



HAL
open science

Le cerveau en trompe-l'œil des sciences cognitives: Critique du plongement dans le fonctionnement cérébral de notions qui lui sont étrangères

Laurent Goffart

► To cite this version:

Laurent Goffart. Le cerveau en trompe-l'œil des sciences cognitives: Critique du plongement dans le fonctionnement cérébral de notions qui lui sont étrangères. Histoire, Philosophie et Sociologie des sciences. Aix Marseille Université (AMU), 2022. Français. NNT: . tel-04070171

HAL Id: tel-04070171

<https://amu.hal.science/tel-04070171>

Submitted on 19 Apr 2023

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

THÈSE DE DOCTORAT

Soutenue à Aix-Marseille Université

le 14 décembre 2022 par

Laurent Goffart

**Le cerveau en trompe-l'œil des
sciences cognitives : Critique du
plongement dans le fonctionnement
cérébral de notions qui lui sont
étrangères**

Discipline

Philosophie

École doctorale

ED 356 Cognition, Langage,
Éducation

**Laboratoire/Partenaires de
recherche**

Centre Gilles Gaston Granger
UMR 7304
CNRS/Aix Marseille Université
Aix en Provence, France

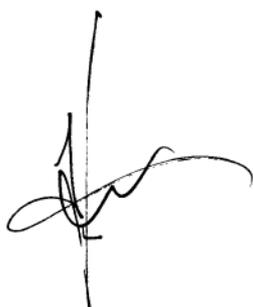
- **Composition du jury**
- Thomas DE VITTORI Rapporteur
- Université de Lille
- Michel DOJAT Rapporteur/Président
- INSERM, Grenoble Institut de Neurosciences
- Thérèse COLLINS Examinatrice
- Université de Paris-Cité
- Jean-René DUHAMEL Examineur
- CNRS, Institut des Sciences Cognitives, Bron
- Gabriella CROCCO Directrice de thèse
- Aix Marseille Université
- Igor LY Co-directeur de thèse
- Aix Marseille Université
-
-
-
-
-
-

Affidavit

Je soussigné, Laurent GOFFART, déclare par la présente que le travail présenté dans ce manuscrit est mon propre travail, réalisé sous la direction scientifique de Gabriella CROCCO et Igor LY, dans le respect des principes d'honnêteté, d'intégrité et de responsabilité inhérents à la mission de recherche. Les travaux de recherche et la rédaction de ce manuscrit ont été réalisés dans le respect à la fois de la charte nationale de déontologie des métiers de la recherche et de la charte d'Aix-Marseille Université relative à la lutte contre le plagiat.

Ce travail n'a pas été précédemment soumis en France ou à l'étranger dans une version identique ou similaire à un organisme examinateur.

Fait à Marseille, le 25 septembre 2022



Cette œuvre est mise à disposition selon les termes de la [Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Liste de publications et participation aux conférences

1) Liste des publications réalisées dans le cadre du projet de thèse :

1. Goffart L. De la représentation cérébrale spatio-temporellement distribuée à la capture ici et maintenant d'un objet visuel en mouvement. In: *L'avenir de la complexité et du désordre* (Eds. J-C. Lévy & S. Ofman) Editions matériologiques, pp 267-294, 2018.
2. Goffart L, Bourrelly C & Quinton J-C. Neurophysiology of visually-guided eye movements: Critical review and alternative viewpoint. *Journal of Neurophysiology* 120: 3234–3245, 2018.
3. Goffart L. Kinematics and the neurophysiological study of visually-guided eye movements. *Progress in Brain Research* 248: 375-384., 2019.

2) Participation aux conférences et écoles d'été au cours de la période de thèse :

COMMUNICATIONS ORALES :

1. Goffart L. Entre les mesures comportementales et le milieu de fonctionnement intracérébral: réflexions sur le dynamisme visuomoteur. *Journée d'étude sur la mesure* (Igor Ly) CNRS-Aix Marseille Université, juin 2017.
2. Goffart L. Critical revision of some mathematical notions used in the neurophysiology of visually-guided eye movements. *Colloque complexité et désordre 2019*, Université Paris Diderot, Paris, janvier 2019.
3. Goffart L. La cinématique est-elle en-corporée dans le cerveau? *Journée d'étude "Embodiment"*, Centre Gilles Gaston Granger, CNRS-AMU, avril 2019.
4. Goffart L. Does the brain perform arithmetical computations with neurally embedded kinematic parameters? *Colloque GDR Vision*, Marseille, oct. 2019.
5. Goffart L. Are kinematic parameters embedded within the brain activity while an accurate movement is being achieved ? *Colloque complexité et désordre 2020*, Université Paris Diderot, Paris, janvier 2020.
6. Goffart L. Are kinematic parameters encoded within the brain activity while a gaze movement is being achieved toward a visual target. *Colloque Conceptual Innovation in Classical Mechanics* (María de Paz, José Ferreirós & Daniel Nieto), Séville septembre 2022.

POSTERS :

1. Goffart L, Bourrelly C & Quinet J. The relations between some mathematics and the neurophysiology of visually-guided eye movements. *Mathematical modeling in motor neuroscience*. Pavia, Italie, juin 2018.
2. Goffart L. Critical revision of the neurophysiology of tracking eye movements. *Meeting du GDR Neural Net*, Paris, dec 2018.

Résumé

Comme la plupart des animaux, nous avons un accès privilégié à notre environnement car dotés d'une sensibilité qui nous distingue du monde minéral. Celle-ci devient une irritation à laquelle s'associent des capacités motrices qui s'organisent en une activation mobilisant de multiples canaux sensori-moteurs, des ensembles engendrant un geste dirigé qui engage l'organisme dans son intégralité.

Dans le domaine des neurosciences cognitives, de nombreux auteurs défendent la conception selon laquelle, à partir des interactions avec le milieu extracorporel, des représentations internes seraient présentes dans le cerveau, ajustées peu à peu par l'exercice répété. A partir des contacts créés par les actions, tels des mesures confirmant ou décevant plus ou moins des attentes, des modèles internes se constitueraient plus ou moins exacts. Des processus de mémoire prendraient ensuite le relais pour assurer une permanence. Alors que dans la nature, tout est voué à changer et à se désagréger, une entité résisterait au délitement, engendrant dans le fonctionnement cérébral, un "espace" doté d'une géométrie.

Dans cette thèse, nous adressons plusieurs critiques aux sciences cognitives pour avoir cérébralisé des notions relevant des sciences physico-mathématiques, comme si une passerelle existait entre les concepts qui structurent ces domaines de la pensée scientifique et les propriétés intrinsèques du système nerveux central. Au-delà du fait que celui-ci ne soit pas créé par l'homme, cette méthode est comparable à celle qui consiste à comprendre le programme logiciel d'un ordinateur à partir de son organisation matérielle. Elle est inappropriée car un ensemble complexe d'actions signifiantes est constamment requis en provenance de l'extérieur. L'espace et les notions physico-mathématiques sont des idéalités, des instruments créés ou découverts par quelque chose qui n'est pas biologique, mais le fait de l'histoire et de la culture, avec ses habitudes, ses coutumes et ses innovations disruptives.

Mots clés : grandeur, espace, mesure, quantification, cerveau, acculturation

Abstract

Like most animals, we have privileged access to our environment because we are endowed with a sensitivity that distinguishes us from the mineral world. This sensitivity becomes an irritation associated with motor capacities that are organized in an activation mobilizing multiple sensory-motor channels, sets generating a directed gesture that engages the body in its entirety.

In the field of cognitive neuroscience, many authors defend the idea that internal representations of our interactions with the extracorporeal environment are present in the brain, gradually adjusted by repeated exercise. From the contacts created by the actions, such as measurements confirming or disappointing more or less expectations, internal models would be built more or less exact. Memory processes would then take over to ensure permanence. While in nature, everything is doomed to change and disintegrate, an entity would resist disintegration, generating in the cerebral functioning, a “space” endowed with a geometry.

In this thesis, we address several criticisms to the cognitive sciences for having cerebralized notions pertaining to the physico-mathematical sciences, as if a bridge existed between the concepts that structure these areas of scientific thought and the intrinsic properties of the central nervous system. Beyond the fact that the latter is not created by man, this method is comparable to that which consists in understanding the software program of a computer from its material organization. It is inappropriate because a complex set of meaningful actions is constantly required from outside. Space and physico-mathematical notions are idealities, instruments created or discovered by something that is not biological, i.e., the history and the culture, with its habits, customs and disruptive innovations.

Keywords : magnitude, space, measurement, quantification, brain, enculturation

Remerciements

Les réflexions épistémologiques exposées dans ce document sont les fruits d'un questionnement personnel de plusieurs décennies au sujet de la notion d'espace et de sa liaison au fonctionnement cérébral. Se lancer dans la résolution d'un problème aussi vaste et aussi fondamental tout en menant en parallèle une recherche neurophysiologique rigoureuse, féconde et utile chez le singe macaque n'aurait pas été possible si je n'avais pas été libéré de plusieurs fardeaux.

Cette libération, je la dois à la présence, la confiance et l'accompagnement de trois jeunes chercheurs et de zootechniciens responsables, tous professionnellement engagés. Je vais donc commencer par remercier Mme Julie Quinet, Mme Clara Bourrelly et M. Nicolas Orlando-Dessaints de m'avoir aidé à préserver ma légitimité de neurophysiologiste primatologue et ma crédibilité scientifique alors que je franchissais les frontières des sciences contemporaines du cerveau pour les examiner d'un emplacement situé en dehors d'elles et y porter un regard critique. Je veux remercier aussi M. Marc Martin, Mme Laurence Boes, Mme Emilie Rapha et M. Philippe Castets pour leur aide dans l'entretien des animaux qui m'avaient été confiés. Le sérieux qu'ils ont mis dans l'exécution de leur mission m'a libéré d'une multitude de soucis et de tracasseries. Enfin, je remercie M. Luc Renaud pour son aide précieuse et très professionnelle lors des opérations chirurgicales. Là encore, son expertise et son efficacité m'ont libéré du stress considérable qu'est celui de mener une recherche expérimentale dont la paucité des animaux utilisés, le caractère chronophage et le coût financier n'autorisent aucune erreur.

Je remercie Mme Gabriella Crocco d'avoir accepté de diriger mon travail de thèse. Quand en janvier 2014, je lui ai fait part de mon souhait de développer une thèse de philosophie au sujet de la notion d'espace et de son emploi dans les sciences du cerveau, elle ne m'a pas considéré comme une personne mentalement dérangée. Contrairement à ce que j'avais pu constater jusque-là, elle comprenait que la cérébralisation de l'espace et de plusieurs notions qui lui sont liées n'est pas du tout une affaire évidente ou triviale. De même que je remercie M. Igor Ly pour les mêmes raisons, ainsi que pour la précision de ses enseignements sur les thèses défendues par Emmanuel Kant et par Henri Poincaré au sujet de l'espace. Grâce aux encouragements et au soutien de mes deux directeurs de thèse, j'ai pu affronter diverses hostilités et surtout parvenir à proximité du sommet de cette montagne que j'avais décidé de gravir. Je dis à proximité car le travail et la réflexion épistémologique ne vont pas s'arrêter. Beaucoup de travail demeure encore avant d'atteindre la satisfaction ressentie au moment de l'accomplissement d'un ouvrage. J'espère que tous les deux continueront de m'apporter leur soutien et leurs encouragements car la solitude rend le combat plus rude.

Je remercie aussi M. Thomas de Vittori et M. Michel Dojat d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ma thèse doctorale, ainsi que Mme Thérèse Collins et M. Jean-René Duhamel d'en être les examinateurs. J'espère qu'ils continueront aussi de m'apporter leur soutien dans la réalisation du travail qu'il reste à faire.

Au cours de l'ascension de mon étrange montagne, j'ai eu la chance de rencontrer M. Thierry Rolland. Je le remercie chaleureusement pour ses encouragements et son soutien alors que je traversais certaines zones tempétueuses dans le petit monde des neurosciences des mouvements oculaires. De même que je remercie M. Michel Le Du de m'avoir montré que je n'étais pas tout seul dans cette zone située au-delà des frontières des sciences du cerveau et de laquelle on découvre d'autres absurdités.

Alors que je m'approchais du dépôt légal de cette thèse, j'ai bénéficié de commentaires très éclairants de la part de M. Stéphane Ballet et de Mme Maryvonne Sorel. Je les remercie vivement car leurs conseils m'ont été très utiles. Je remercie aussi Mme Isabelle Leparcoffart, M. Lionel Nowak et Mme Julie Quinet d'avoir relu mon texte pour en corriger les petites imperfections.

Enfin, je remercie Messieurs Pascal Taranto et Giuseppe Di Liberti, directeurs du Centre d'épistémologie et d'ergologie comparatives (CEPERC) et du Centre Gilles Gaston Granger de m'avoir ouvert les portes de leur laboratoire pour que je puisse y développer cette thèse.

*Je dédie ce travail à mes parents,
à mes grands-parents,
à leurs parents et leurs grands-parents
à mes enfants, Charlie, Gabie et Sasha,
à leurs enfants et petits-enfants ...*

PLAN DU DOCUMENT

Table des matières

Affidavit	3
Liste de publications et participation aux conférences	5
Résumé	7
Abstract	8
Remerciements	9
INTRODUCTION	15
1. L'ESPACE ET LA GÉOMÉTRIE AU COURS DE L'HISTOIRE	33
1.1. Les thèse pré-kantiennes	38
1.1.1. La thèse aristotélicienne	39
1.1.2 Les thèses cartésienne et gassendienne	40
1.1.3. La thèse newtonienne	42
1.2. La thèse kantienne	47
1.3. Les thèses post-kantiennes	52
1.3.1. La théorie des idées motrices de Johann Steinbuch	54
1.3.2. La thèse des signes locaux de Rudolf Lotze	58
1.3.3. La théorie des forces motrices d'Alexander Bain	64
1.3.4. La thèse évolutionniste et nativiste d'Herbert Spencer	66
1.3.5. La thèse d'Ernst Mach	69
1.3.6. La thèse de Konrad Lorenz	74
1.3.7. La thèse d'Alain Berthoz	77
1.3.8. Les critiques de la cérébralisation de la géométrie	80
2. LE CERVEAU ET LES MÉTHODES POUR ÉTUDIER SON FONCTIONNEMENT	97
2.1. L'approche anatomique	98
2.2. L'approche électrophysiologique	99
2.3. L'étude des corrélations inter-échelles	100
2.4 Découverte de corrélations entre des paramètres spatiaux	103
3. CRITIQUE DE LA CÉRÉBRALISATION DE NOTIONS PHYSICO-MATHÉMATIQUES	111
3.1. L'espace et le temps, domaines de mesure	111
3.2. Le principe d'inertie	113
3.3. Critique de la modularité cérébrale	115
3.4. Les notions physiques sont-elles applicables au fonctionnement cérébral ?	116
3.5. La notion de population de neurones	118
3.6. Une refondation à partir de la notion d'équilibre	122
3.7. A propos du codage neuronal de la vitesse des saccades	125
3.8. Le cerveau fait-il des calculs cinématiques quand un mouvement est produit?	131
3.9. La thèse des rétrocontrôles négatifs dans le cerveau	135
CONCLUSION	141
Réfutation des thèses évolutionnistes	144

Critique de la thèse de Didier Dacunha-Castelle	149
A propos de l'efficacité des mathématiques	153
Considérations sociales et politiques	155
A propos du temps	160
BIBLIOGRAPHIE	163

INTRODUCTION

«Étrange coïncidence que toute personne dont on a ouvert le crâne avait un cerveau !»¹

«La tâche du neurobiologiste consiste donc, pour réaliser une épistémologie matérialiste forte, à décrire en particulier comment le cerveau de l'homme engendre les objets parmi lesquels se rangent entre autres les objets mathématiques»²

Le présent travail est le fruit d'une réflexion critique permanente menée par un neurophysiologiste primatologue, entretenue et amplifiée par l'exercice de son métier. A partir des expérimentations que ses collègues, prédécesseurs et contemporains, et lui-même ont menées sur des animaux (chat ou singe), sa mission a été de caractériser la neurophysiologie de l'orientation visuelle du regard, c'est-à-dire d'identifier les chaînes de relation causale par lesquelles l'apparition d'un objet dans le champ visuel conduit à tourner les yeux et la tête vers l'endroit où il se trouve, même lorsqu'il bouge. Les connaissances acquises dans ce domaine scientifique sont nombreuses. Elles constituent un vaste édifice qui, lorsqu'on prend le temps de le contempler, inspire une profonde admiration envers la vie animale et les moyens dont elle est dotée pour explorer le monde visuellement accessible. Mais il arrive un moment où une réflexion épistémologique envahit les activités expérimentales pourtant déjà très chronophages. Ce moment critique, vraisemblablement d'ordre langagier et sémantique, survient quand des tensions apparaissent de plus en plus fortes dans la diversité des discours véhiculés par les acteurs de la recherche scientifique. Il est très bien illustré par la réponse que le philosophe Georges Canguilhem donne à la question de savoir si la science a besoin de la philosophie. Le philosophe de la médecine et de la biologie nous dit en effet que *"la science n'a pas besoin de la philosophie si par la philosophie, vous entendez ce que vous et moi, ce que les philosophes en général, peuvent sécréter, pour cette raison qui maintenant ne peut être contestée par personne : c'est que, c'est la science qui fait elle-même la philosophie dont elle a besoin. Dans la mesure où la science est un projet vers la*

¹ Wittgenstein L. (2006) *De la certitude*. Paris: Gallimard. Aphorisme 207.

² Changeux J.-P. & Connes A. (1989) *Matière à pensée*. Paris: Odile Jacob, page 48.

*vérité, elle fait elle-même la critique de ses fondements. Et c'est finalement elle qui surmonte ses propres difficultés, les difficultés qui ont pu paraître à certaines époques, du fait de ce qu'on appelait des crises de fondement, des difficultés qui ont pu paraître des antinomies de caractère logique. Et bien ce sont les mathématiques, par exemple, qui ont résolu elles-mêmes les antinomies de la théorie des ensembles. C'est la physique aujourd'hui qui essaie de résoudre sur son propre terrain, la question philosophiquement si mal posée de l'indéterminisme. Par conséquent, les sciences ne peuvent pas se passer de philosophie, si par philosophie d'une science, on entend la réflexion critique qui accompagne son développement et son progrès*¹³.

La récente publication d'une étude d'imagerie cérébrale nous donne une autre occasion d'introduire l'objectif du travail de recherche épistémologique et historique que nous avons mené et que nous proposons de poursuivre : étudier la validité et les limites des arguments que certaines études menées dans le domaine des sciences cognitives avancent pour expliquer ces mécanismes neuronaux et cérébraux qui sous-tendraient les performances, des plus élémentaires comme le mouvement d'orientation du regard aux plus abstraites comme la résolution de problèmes arithmétiques ou géométriques. Dans cet article, publié dans un journal académique relevant des sciences du cerveau⁴, les auteurs d'une étude d'imagerie cérébrale justifient d'une manière plutôt inhabituelle l'importance d'expliquer les mécanismes neuronaux qui sous-tendent les performances mathématiques et scientifiques ainsi que leur apprentissage. La raison qu'ils invoquent ne mentionne pas du tout le fait que les connaissances mathématiques et scientifiques contribuent à l'épanouissement intellectuel de l'individu ou à la multiplication des savoirs plus précis sur les phénomènes du monde et sur nous-même. Les auteurs avancent plutôt un argumentaire sociopolitique en expliquant que les capacités mathématiques et scientifiques contribuent au développement économique d'un pays. Sur la base de conclusions émises par un économiste spécialiste des rapports entre la croissance économique d'un pays et le niveau d'éducation de ses citoyens, les auteurs rapportent que, si au cours des années 1960, pour un pays donné, le résultat des étudiants aux tests des capacités mathématiques et scientifiques était supérieur de 0,5 fois

³ Texte extrait de l'enregistrement vidéo accessible sur la plateforme youtube à partir de l'instant 15:50: <https://www.youtube.com/watch?v=SKBNSabxhUA>

⁴ Wang L., Li M., Yang T. & Zhou X. (2021) Mathematics meets science in the brain. *Cerebral Cortex* 32: 123-136.

l'écart-type du score d'autres pays, alors son taux de croissance économique était supérieur de un pourcent à celui des autres pays, chaque année et cela pendant les quarante années qui suivent⁵. Des arguments économiques et géopolitiques sont avancés dans un journal neuroscientifique pour justifier une étude sur le fonctionnement du cerveau.

Nous verrons que des auteurs ont établi un lien entre l'orientation du regard et la résolution de problèmes arithmétiques ou géométriques, les uns parce qu'une mensuration du monde visuel pourrait accompagner les saccades oculaires et ainsi, construire une représentation mentale de l'espace; les autres, parce qu'un apport d'oxygène serait accru dans une même zone cérébrale pendant les deux types d'activité, oculomotrice et mathématique. Certains chercheurs en psychologie cognitive déclarent en effet qu' "*avec l'avènement des techniques d'imagerie cérébrale, ... il est devenu possible de commencer à explorer les fondements neuronaux du calcul logique et mathématique*"⁶. Or, nous expliquerons que le signal mesuré en imagerie par résonance magnétique (IRM) ne correspond pas nécessairement à une émission accrue de potentiels d'action par les neurones qui occupent la zone détectée dans la mesure où les neurones peuvent aussi être inhibés et rendus silencieux⁷. De plus, un changement d'activité neuronale ne signifie pas nécessairement qu'il contribue au changement observable au niveau comportemental; il peut simplement l'accompagner. Mais plus fondamentalement encore, une évaluation critique et épistémologique de ces travaux est nécessaire pour éviter les égarements qui peuvent survenir quand on explore un territoire qui n'a pas été préalablement balisé conceptuellement.

La question qui va particulièrement retenir notre attention concerne les relations qu'il est possible d'établir entre le fonctionnement cérébral et certaines notions provenant des mathématiques et de la mécanique classique. Pour illustrer notre questionnement, nous allons commencer par ces déclarations faites par un neurophysiologiste dont les travaux chez le chat ont contribué à démontrer l'importance de la neuroanatomie fonctionnelle, une

⁵ Hanushek E.A., Jamison D.T., Jamison E.A. & Woessmann L. (2008). Education and economic growth: It's not just going to school, but learning something while there that matters. *Education next* 8: 62-71.

⁶ Houdé O. & Tzourio-Mazoyer N. (2003) Neural foundations of logical and mathematical cognition. *Nature Reviews Neuroscience* 4: 507-514.

⁷ Lippert M.T., Steudel T., Ohl F., Logothetis N.K. & Kayser C. (2010) Coupling of neural activity and fMRI-BOLD in the motion area MT. *Magnetic resonance imaging* 28: 1087-1094.

discipline qui siège parmi les moins spéculatives des sciences du cerveau. Selon Alain Berthoz, académicien des sciences, les découvertes et les démonstrations mathématiques seraient *"issues d'opérations présentes dans le cerveau vivant"*. Les mathématiques ne seraient *"ni des créatures qui existent quelque part dans l'Univers et que le mathématicien découvrirait du fond de sa caverne platonicienne ni des inventions ex nihilo du cerveau"*. Elles seraient *"l'expression de lois et de mécanismes qui sont en opération dans le cerveau"*, *"un langage du cerveau sur le cerveau lui-même, c'est-à-dire, puisque le cerveau fait partie du monde physique, sur l'Univers et ses lois"*⁸. Pareillement, le neurobiologiste Jean-Pierre Changeux, académicien lui aussi, défend que *"les mathématiques sont dans le cerveau du mathématicien, en particulier dans sa mémoire à long terme"*, un lieu aujourd'hui encore peu connu où selon lui, *"sont stockées ... un certain nombre de représentations mathématiques"*⁹. Dans la mesure où de nombreuses innovations technologiques dépendent des sciences physico-mathématiques et de leur formalisation, on peut comprendre l'intérêt pour certains à tenter de sonder dans le fonctionnement du cerveau la genèse des vérités mathématiques. Mais le cerveau dissimule-t-il vraiment quelque chose qui nous permettrait de comprendre la nature et l'efficacité des mathématiques, voire de clarifier leur rôle dans notre adaptation au monde. Si, contrairement à ce que croient Alain Berthoz et Jean-Pierre Changeux, la réalité mathématique existe indépendamment de l'homme et de son appareillage cérébro-musculaire, alors il n'est pas du tout certain qu'une meilleure compréhension du fonctionnement cérébral soit de quelque utilité. Pour le mathématicien Alain Connes, l'exploration mathématique mobilise *"un «sens», irréductible à la vue, à l'ouïe et au toucher, qui lui permet de percevoir une réalité tout aussi contraignante mais beaucoup plus stable que la réalité physique, car non localisée dans l'espace-temps"*¹⁰. Même si certains objets mathématiques mobilisent le cerveau du mathématicien sous la forme d'une activité distribuée sur plusieurs assemblées neuronales, il est très peu probable que nous puissions discerner les corrélats neuronaux des objets mathématiques de tout ce qui constitue son contexte à la fois opératoire, physiologique et métabolique. Un autre problème que nous risquons de rencontrer est du même ordre que

⁸ Berthoz A. (2005) Espace perçu, espace vécu, espace conçu. In : Berthoz A. & Recht R. *Les espaces de l'homme*. Paris: Odile Jacob, page 129.

⁹ Changeux J.-P. & Connes A. (1989) *Matière à pensée*. Paris: Odile Jacob, page 168.

¹⁰ *Ibid.*, page 49.

celui de rechercher le support cérébral de la mémoire et du rappel des souvenirs quand on sait que beaucoup d'éléments critiques ne se trouvent pas dans le cerveau mais en dehors.

Sur une ligne pareillement évolutionniste et aussi nativiste, le neuropsychologue Stanislas Dehaene déclare que *“les nombres, comme tous les objets mathématiques, sont des constructions mentales dont les racines plongent en dernière analyse dans l'adaptation du cerveau humain aux régularités de l'univers”*¹¹. Selon lui, *“tous les cerveaux humains reçoivent en partage, dès la naissance, des représentations mentales sophistiquées, indépendantes du langage que l'on peut qualifier de «proto-mathématiques».* Au cours de son évolution, notre cerveau a été doté de représentations élémentaires de l'espace, du temps et du nombre, que nous partageons avec de nombreuses autres espèces animales, et qui sont au fondement de nos intuitions mathématiques”¹². L'actuel président du conseil scientifique de l'Education Nationale reprend ici la thèse de Jean-Pierre Changeux, pour qui l'existence de la réalité mathématique, *“liée à la pensée de l'homme, est le produit de l'évolution des espèces”*¹³. Cette prédisposition dont nous parle Stanislas Dehaene ne se limite pas aux catégories d'espace, de temps et de nombre ; elle concernerait même l'arithmétique. Selon lui, *“des circuits cérébraux dédiés, hérités de notre histoire évolutive, ... engagés dans la reconnaissance de la numérosité (le nombre d'objets dans un ensemble)”* nous fourniraient *“l'intuition de base qui guide l'acquisition de l'arithmétique formelle”*¹⁴. Dans le domaine des sciences cognitives, cette hypothèse surprenante d'une innéité des capacités mathématiques¹⁵ repose sur des observations faites chez le nouveau-né. Malheureusement, ce que les vulgarisateurs nous ne disent pas, c'est que cette innéité est l'explication la plus simple, ou, comme dirait le

¹¹ Dehaene S. (2010). La bosse des maths: quinze ans après. Paris: Odile Jacob, page 276.

¹² Dehaene S. (2012). Les formes de la géométrie et l'universalité des intuitions mathématiques. Dans Jean-Pierre Changeux (Ed) *La vie des formes et les formes de la vie*. Paris: Odile Jacob, page 38.

¹³ Changeux J.-P. & Connes A. (1989) Matière à pensée. Paris: Odile Jacob, page 42.

¹⁴ Dehaene S., Molko N., Cohen L. & Wilson A.J. (2004). Arithmetic and the brain. *Current Opinion in Neurobiology* 14: 218-224.

¹⁵ Carey S. & Spelke E. (1994) Domain-specific knowledge and conceptual change. In: *Mapping the mind: Domain specificity in cognition and culture*, L.A. Hirschfeld & S.A. Gellman (Eds) pp 169-200; Spelke E.S. & Kinzler K.D. (2007). Core knowledge. *Developmental science* 10: 89-96.

philosophe Emmanuel Kant, la plus paresseuse¹⁶. De même, il n’y a pas si longtemps de cela, le grand psychologue du développement Jean Piaget déclarait encore que *“l’explication du comportement cognitif au moyen d’idées innées est, en général, une solution facile et paresseuse”*¹⁷. Dans le cas de l’arithmétique, la philosophe Helen de Cruz nous explique que la thèse nativiste est en fait l’explication par défaut qui n’est pas réfutée tant que les psychologues du développement ne seront pas parvenus à fournir une autre explication aux observations qui ont été faites auprès des nouveau-nés. Curieusement, nulle part les défenseurs de la thèse nativiste nous expliquent comment la mesure de durée d’immobilité du regard et la compétence mathématique sont liées. Comment fait-on pour passer de la durée pendant laquelle un nouveau-né ne détourne pas le regard d’une scène à ces opérations qui consistent à ajouter ou à soustraire des nombres ? Les connaissances anatomo-physiologiques ont pourtant considérablement progressé au cours des dernières décennies au sujet de la fixation visuelle. Nous verrons que Stanislas Dehaene aura recours à l’imagerie cérébrale pour faire le lien entre la motricité oculaire et l’arithmétique. Mais, même en admettant que la dyscalculie soit d’origine génétique, la connaissance de cette cause n’explique rien de la pathophysiologie sous-jacente, rien des dynamiques d’activation neuronale qui conduisent à ce qu’une personne peine à faire des calculs. Un défaut moléculaire n’explique pas comment un désordre neurologique se manifeste, c’est-à-dire les processus et la dynamique des réseaux neuronaux par lesquels le déficit est exprimé. Il n’explique pas non plus quelle prothèse peut compenser les symptômes. Enfin, il est possible que l’hypothèse innéiste ne soit pas encore réfutée tout simplement parce qu’elle n’est pas réfutable. Dès le 19ème siècle, le polymathe allemand Hermann von Helmholtz avait reconnu l’impossibilité de réfuter cette hypothèse. Il expliquait aussi que les sensations d’espace innées, *“originelles”* devaient être *“surmontées par une connaissance plus approfondie, acquise par l’expérience”*. Par conséquent, il est *“plus simple et plus facile d’admettre que toutes les notions d’espace nous sont fournies par l’expérience seule, sans que celle-ci ait à combattre des notions innées, fausses dans la plupart des cas”*¹⁸. De même, Jean Piaget

¹⁶ Kant E. (1770) De la forme et des principes du monde sensible et du monde intelligible (Dissertation de 1770). *Œuvres philosophiques* tome 1, Paris : Bibliothèque de la Pléiade, page 658.

¹⁷ Piaget J. (1968) Quantification, conservation, and nativism. *Science* 162: 976-979.

¹⁸ Helmholtz H. von (1821-1894). *Optique physiologique*. Paris: Masson, page 578-579.

déclarait que “*s'il est impossible de réfuter le prédéterminisme, il est au contraire totalement inutile*”¹⁹. Comment se fait-il donc qu'une thèse irréfutable et inutile soit devenue aussi populaire de nos jours?

Stanislas Dehaene admet que les mathématiques soient trop récentes pour que “*la sélection naturelle leur ait dédié des mécanismes cérébraux spécifiques*”²⁰. Il propose que les mathématiques “*co-optent ou recyclent des circuits neuronaux évolutionnairement plus anciens impliqués dans des fonctions liées*”²¹. Cette conception est vraisemblable mais le “recyclage” neuronal n'explique pas mieux les compétences mathématiques que d'autres compétences, comme les talents artistiques, sportifs ou rhétoriques. En fait, l'idée de talents innés en mathématiques semble plutôt être un raccourci de pensée qui empêche de découvrir une réalité évolutive autrement plus complexe parce qu'elle repose sur une multitude d'apprentissages successifs. Considérons un enfant en train d'effectuer une démonstration mathématique à partir d'un ensemble de données. Il y parvient parce qu'il est doté d'un cerveau qui le rend capable de voir, d'écouter ou de lire attentivement, et d'apprendre. A cet organe précieux s'ajoute une multitude d'autres facteurs dont les origines n'ont rien de biologique, comme par exemple l'environnement socioculturel qui lui a permis d'apprendre à parler et comprendre une langue, à lire et écrire. Les enseignants de l'Education nationale lui ont aussi montré non seulement comment griffonner des symboles utiles sur une feuille de papier, mais aussi qu'il était autorisé, pour faire une démonstration, de raturer les symboles qui devenaient superflus au bout d'un moment, parce que leurs valeurs s'annulaient ou étaient négligeables. Au-delà des programmes génétiques, des traductions moléculaires intracellulaires et de la sélection naturelle, il y a l'écriture, cette formidable invention qui facilite considérablement la mémorisation, des prémices jusqu'aux résultats intermédiaires. Elle réduit aussi le nombre d'éléments que l'enfant doit prendre en compte. Comment peut-on concevoir que cette mise en suspens graphique puisse avoir quelque correspondance dans le fonctionnement cérébral quand elle est simplement extraite visuellement de la feuille de papier, puis interprétée?

¹⁹ Piaget J. (1968) *Op. cit.*

²⁰ Knops A., Thirion B., Hubbard E.M., Michel V. & Dehaene S. (2009) Recruitment of an area involved in eye movements during mental arithmetic. *Science* 324: 1583-1585.

²¹ *Ibid.*

Jadis président du Conseil National des Programmes du Ministère de l'Éducation Nationale, le mathématicien Didier Dacunha-Castelle a récemment publié un ouvrage dans lequel il défend une position qui pourrait sembler contraire à celles des académiciens que nous avons mentionnés dans la mesure où selon lui, *"il n'y a pas de mathématiques dans le cerveau"*²², il n'y aurait que des programmes. Si *"certains objets mathématiques comme les entiers, l'espace ou les probabilités ont été ... longtemps considérés comme des axiomes au sens où ils faisaient consensus, cela venait du fait qu'ils étaient traduits de programmes universels du cerveau"*²³. Cette assimilation du cerveau à un automate programmé n'est pas récente. A plusieurs reprises, certains neurophysiologistes ont eux-aussi cultivé cette idée, contribuant alors au développement de cette branche contemporaine des sciences cognitives que sont les neurosciences computationnelles, située au croisement de l'informatique, de la psychologie et de la neurophysiologie. La thèse de Didier Dacunha-Castelle s'inspire des réflexions d'un autre mathématicien, Jean-Louis Krivine pour qui *"la réalité matérielle des mathématiques est celle des programmes installés tout au long de l'évolution dans le cerveau des espèces animales concernées"*²⁴. Didier Dacunha-Castelle anticipe même que *"le travail commencé par Krivine et d'autres mathématiciens en traduisant preuves et surtout axiomes mathématiques en programmes, objets bien finis, donnera ... une des clés qui nous manquent pour que les mathématiques contribuent de manière efficace à la recherche sur le code neuronal"*²⁵. Cette analogie entre le programme exécuté par une machine et le fonctionnement du cerveau est surprenante au regard des différences fondamentales que le concepteur et constructeur du premier ordinateur avait signalées entre le cerveau et un automate logique. Dans un ouvrage où il comparait leurs caractéristiques respectives, John von Neumann concluait en effet que *"quel que soit le langage utilisé par le système nerveux, il se caractérise par une profondeur logique et arithmétique moindre que ce à quoi nous sommes habitués"* et que dans le cerveau *"nous sommes en présence de structures logiques différentes de celles auxquelles nous sommes accoutumés en logique et en mathématiques"*. Si *"la logique et les mathématiques du système nerveux central, considérées comme des*

²² Dacunha-Castelle D. (2020) *Les mathématiques, le cerveau de l'âne et l'évolution*. Paris : Cassini, page 185.

²³ *Ibid.*, page 82.

²⁴ *Ibid.*, page 72.

²⁵ Dacunha-Castelle D. (2020) *Op. cit.* page 243.

langages, doivent être structurellement, fondamentalement différentes des langages de notre expérience courante”²⁶, comment peut-on établir une correspondance entre d’un côté, un programme informatique, c’est-à-dire, si on reprend la définition de Didier Dacunha-Castelle, “une suite d’instructions destinées à faire effectuer une tâche spécifique par un ordinateur”²⁷, et de l’autre côté, les processus biochimiques et anatomo-physiologiques opérant simultanément sur plusieurs échelles et qui, à chacun de leur niveau, sont organisés non seulement en parallèle, mais surtout se chevauchent les uns sur les autres? La correspondance neurobio-informatique emprunte des raccourcis qui masquent les contraintes caractérisant chacun de ces deux milieux, le milieu logico-électronique dans lequel le programme informatique est exécuté et le milieu dans lequel les activités cérébrales sensori-motrices se propagent et se dissipent. Comme nous allons l’expliquer dans le chapitre 4, le caractère non-uniforme des vitesses de transmission des signaux dans le cerveau et la distributivité des connexions anatomiques rendent quasiment inaccessible la notion de code neuronal²⁸. Il est même possible qu’elle soit caduque quand on considère ces deux grands principes neurophysiologiques qui déterminent l’efficacité de la propagation des signaux dans le cerveau : la masse neuronale mobilisée et le synchronisme des signaux présynaptiques²⁹.

Comme nous avons pu le constater plus haut avec Stanislas Dehaene, la cérébralisation ne se limite pas aux opérations numériques³⁰. Depuis plus longtemps encore, elle s’est attaquée à cette notion communément appelée “espace” ainsi qu’à la géométrie. A partir de la découverte, chez le rongeur, d’une activité caractéristique enregistrée au niveau de certaines cellules situées dans une structure appelée hippocampe pendant que l’animal navigue dans une enceinte homogène, une multitude de travaux ont été menés afin d’étudier la représentation cérébrale de “l’espace” dont l’activité de cette région hippocampique

²⁶ Neumann J. von (1996) *L’ordinateur et le cerveau*. Paris: Champs Flammarion. Voir aussi Berry G (2017) *L’hyperpuissance de l’informatique: algorithmes, données, machines, réseaux*. Paris: Odile Jacob.

²⁷ Dacunha-Castelle D. (2020) *Op. cit.* page 33.

²⁸ Goffart L., Bourrelly C. & Quinton J.-C. (2018) Neurophysiology of visually guided eye movements: critical review and alternative viewpoint. *Journal of Neurophysiology* 120: 3234-3245.

²⁹ Goffart L., Bourrelly C. & Quinet J. (2017) Synchronizing the tracking eye movements with the motion of a visual target: Basic neural processes. *Progress in Brain Research* 236: 243-268.

³⁰ Gallistel C.R. (2017) Finding numbers in the brain. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 373: 201701119

témoignerait³¹. Considérant évidente une telle représentation, certains chercheurs ont ensuite commencé à défendre l'idée que les petits animaux à quatre pattes feraient de la géométrie³². Giorgio Vallortigara, par exemple, déclare que “dans certaines conditions, les animaux peuvent user de la géométrie pour déterminer leur orientation, identifier des points de repère ou trouver un lieu; c'est-à-dire qu'ils peuvent identifier des emplacements spatiaux non par leur apparence mais par leurs relations spatiales avec d'autres emplacements”³³. Les erreurs produites par les animaux témoigneraient selon lui d'une géométrisation de l'enclos ; les animaux mesureraient des distances et des directions sans que l'on sache trop comment. Or l'enclos présente une structure asymétrique qui se répercute sur les mouvements d'orientation des yeux et de la tête des animaux. Autrement dit, les asymétries visuelles se retrouvent au niveau des commandes prémotrices et des mouvements exploratoires. L'absence de prise en compte de ces aspects résulte là encore de la méthodologie employée. Les études chez le rongeur ont recours à une caméra qui surplombe la scène. Le problème est étudié du point de vue de l'expérimentateur plutôt que de celui de l'animal. De ce fait, il n'est pas surprenant que les chercheurs soient enclins à tirer des conclusions sur un “espace” interne de navigation, qui ressemble un peu à ces cartes imprimées sur papier que nous utilisons. S'ils avaient disposé de la possibilité d'enregistrer l'orientation du regard et le champ visuel qui lui est associé, ils auraient été contraints de rendre compte des processus qui permettent de définir ce qu'est un emplacement, malgré les multiples manières avec

³¹ Grieves R.M. & Jeffery K.J. (2017) The representation of space in the brain. *Behavioural processes* 135: 113-131.

³² Vallortigara G. (2009) Animals as natural geometers. *Cognitive biology: Evolutionary and developmental perspectives on mind, brain and behavior*, 83-104; Thinus-Blanc C., Chabanne V., Tommasi L., Peruch P. & Vauclair J. (2010) The encoding of geometry in various vertebrate species. *Spatial cognition, spatial perception: mapping the self and space*, 99-116. Tommasi L., Chiandetti C., Pecchia T., Sovrano V.A. & Vallortigara G. (2012) From natural geometry to spatial cognition. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 36: 799-824; Vallortigara G. (2017) Comparative cognition of number and space: the case of geometry and of the mental number line. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 373: 20170120.

³³ Vallortigara G. (2009) *Op. cit.* traduction de: “Under some conditions, animals can use geometry to determine their orientation, to identify landmarks, or to find a place; that is, they can identify spatial locations not by their appearance but by their spatial relationships to other locations”.

lesquelles il apparaît du point de vue visuel³⁴. Certains se posent la question de savoir quelle géométrie, euclidienne ou non-euclidienne, ces rongeurs “appliqueraient” à leur espace de navigation³⁵. Les activités neuronales étant supposées fusionner pour constituer un supposé “espace” interne, d’autres chercheurs se demandent si un isomorphisme peut être considéré entre ces activités neuronales et cette potentielle géométrie³⁶.

Pour celles et ceux qui reconnaissent une différence fondamentale entre l’espace mathématique et le contexte sensorimoteur, la notion de “proto-géométrie” a récemment été introduite par le philosophe des mathématiques José Ferreiros³⁷. Nous verrons dans le prochain chapitre que cette distinction fut déjà signalée au début du 20ème siècle par Henri Poincaré, avec une géométrie primitive qu’il qualifiait aussi de grossière³⁸. En revanche, le caractère conventionnel de la géométrie qu’il défendait n’est pas du tout considéré. Du mathématicien-philosophe français, on ne retient que l’usage du mot “espace” alors que le terme de “modalité” aurait suffi pour désigner chacun des cadres rassemblant respectivement les sensations visuelles, les sensations tactiles, les signaux d’origine musculaire et pourquoi pas, les sensations d’effort. Ces modalités pourraient s’associer et contribuer à la genèse d’un “espace représentatif”, plurimodalitaire dans lequel les mouvements pourraient éventuellement être représentés. Or Henri Poincaré explique que *“quand on dit ... que nous « localisons » tel objet en tel point de l’espace ... cela signifie simplement que nous nous représentons les mouvements qu’il faut faire pour atteindre cet objet ; ... nous nous représentons les sensations musculaires qui les accompagnent et qui n’ont aucun caractère géométrique, et par conséquent n’impliquent nullement la préexistence de la notion d’espace”*³⁹. D’imaginer un geste n’implique en effet ni une géométrie ni un monde mental isomorphe au monde physique. Henri Poincaré prend soin aussi de récuser une origine

³⁴ Ce type de question sera en fait abordé par des études neurophysiologiques menées chez le singe.

³⁵ Warren W.H. (2019). Non-euclidean navigation. *Journal of Experimental Biology* 222: jeb187971.

³⁶ Ekstrom A.D., Harootonian S.K. & Huffman D.J. (2020) Grid coding, spatial representation, and navigation: Should we assume an isomorphism? *Hippocampus* 30: 422-432.

³⁷ Ferreirós J. & García-Pérez M.J. (2020). Beyond natural geometry: on the nature of proto-geometry. *Philosophical Psychology* 33: 181-205.

³⁸ Poincaré H. (1906). La relativité de l'espace. *L'année psychologique* 13: 1-17.

³⁹ *Ibid.*

empirique de la géométrie, expliquant que l'espace est *“un instrument qui nous sert, non à nous représenter, mais à raisonner sur les choses”*. C'est un instrument pour nous déplacer dans le monde des idées comme une lampe torche nous aide à trouver un chemin dans l'obscurité, ou comme une carte IGN en milieu montagnard. Plus fondamentalement encore, Poincaré déclarait que *“ce que nous appelons la géométrie n'est pas autre chose que l'étude des propriétés formelles d'un certain groupe continu ; si bien que nous pouvons dire que l'espace est un groupe”*⁴⁰. Dans ces conditions, comment l'espace et la géométrie pourraient-ils être des objets d'enquête neuropsychologique et neurophysiologique si, avec le concept de groupe, nous nous élevons, comme le dit le philosophe allemand Ernst Cassirer, *“au-dessus de toute considération d'éléments déterminés de la pensée mathématique pour accéder à une théorie des opérations”*⁴¹, si nous accédons *“entièrement dans le champ des pures mathématiques intellectuelles”*⁴²?

La conception d'un "espace" de représentation ou de simulation interne des mouvements, radicalement distinct de l'espace géométrique, fut proposée à une époque où les connaissances anatomo-physiologiques étaient rudimentaires. On sait aujourd'hui que différents lieux du monde physique mobilisent non seulement des populations distinctes de neurones prémoteurs et moteurs, mais aussi des assemblées distinctes de neurones sensoriels. La simulation du mouvement avant qu'il ne soit exécuté ou, en termes neurophysiologiques, le recrutement préalable des réseaux prémoteurs et moteurs, n'est pas la seule condition qui permette de distinguer un lieu d'un autre. Deux cibles situées à différents endroits mobilisent des canaux sensoriels tellement distincts qu'il n'est pas nécessaire qu'un mouvement soit produit ou préparé pour les distinguer. Le milieu cérébral n'est pas du tout homogène. Les réseaux de neurones qui supportent les champs visuels central et périphérique sont distincts l'un de l'autre, comme le sont les champs visuels supérieur et inférieur, gauche et droit. Ces derniers ne sont pas non plus symétriques⁴³. Les

⁴⁰ Poincaré H. (2002) *L'opportunisme scientifique*. Basel : Birkhäuser, pages 30-31.

⁴¹ Cassirer E. (1995) *Le problème de la connaissance dans la philosophie et la science des temps modernes*. Volume 4 : De la mort de Hegel aux temps présents. Paris: Les éditions du Cerf, page 58.

⁴² *Ibid.*

⁴³ Van Essen D.C., Newsome W.T. & Maunsell J.H. (1984). The visual field representation in striate cortex of the macaque monkey: asymmetries, anisotropies, and individual variability.

canaux visuomoteurs ne mobilisent pas seulement la modalité sensorielle par laquelle une cible est détectée. Interviennent également des signaux issus de la proprioception musculaire⁴⁴ et des signaux moteurs qui en permanence entretiennent le tonus musculaire⁴⁵. Nous verrons que dans le fonctionnement cérébral, l'image (au sens mathématique du terme) de l'ensemble des lieux du monde physique est un milieu qui n'est ni homogène, ni isotrope, ni permanent comme l'espace de la géométrie. Un isomorphisme entre l'espace géométrique (euclidien ou non) et cette chose multidimensionnelle au sein de laquelle les activités neuronales se propagent est inconcevable aussi parce qu'un même lieu du monde externe peut être regardé d'une multitude de façons. De plus, quand l'association entre ce lieu et l'activation cérébrale est changée, par exemple dans le cas où la projection des photons sur la rétine est déviée par le port de lunettes prismatiques, un apprentissage est mis en œuvre qui graduellement rétablit la congruence entre l'endroit vers lequel le regard est dirigé et l'endroit vers lequel se dirige la main pour toucher ou saisir l'objet. Le lieu physique se trouve alors assorti d'un nouvel ensemble de sensations proprioceptives et de commandes motrices. Il est pourtant perçu comme étant le même, peut-être à cause de l'impossibilité du sujet à distinguer ce qui discerne entre eux de vastes ensembles de sensations proprioceptives, ou alors, à cause de la prépondérance des signaux visuels dans la définition de ce qu'est un lieu. Tout au long de l'adaptation à la déviation prismatique du champ visuel, l'objet demeure dans une sorte de creux, campé au milieu du champ visuel central.

Dans une recherche des conditions de possibilité d'une connaissance apodictique, et en particulier de la géométrie, de l'arithmétique et de la mécanique newtonienne, le philosophe allemand Emmanuel Kant proposait que la mathématique pure reposait sur deux intuitions fondamentales, l'espace et le temps. Plus de deux siècles plus tard, la psychologue Kelly Mix déclare que *"le lien entre l'espace et les mathématiques est peut-être l'une des*

Vision Research 24: 429-44; Hafed, Z.M., & Chen, C.Y. (2016). Sharper, stronger, faster upper visual field representation in primate superior colliculus. *Current Biology* 26: 1647-1658.

⁴⁴ Biguer B., Donaldson I.M., Hein A. & Jeannerod M. (1988) Neck muscle vibration modifies the representation of visual motion and direction in man. *Brain* 111:1405-1424; Roll J.P., Roll R. & Velay J.L. (1991) Proprioception as a link between body space and extra-personal space. In: *Brain and space*, J. Paillard (Ed) Oxford: Oxford University Press pp 112-132.

⁴⁵ Gauthier G.M., Nommay D. & Vercher J.L. (1990) The role of ocular muscle proprioception in visual localization of targets. *Science* 249: 58-61.

*découvertes les plus solides et les mieux établies de la psychologie cognitive*⁴⁶ tandis que Stanislas Dehaene et la psychologue américaine Elizabeth Brannon affirment que "si Emmanuel Kant ou Blaise Pascal étaient nés aujourd'hui, ils seraient probablement des neuroscientifiques cognitifs"⁴⁷. Cette convergence dans les conclusions émises par le grand philosophe de Königsberg et les neurosciences contemporaines nous conduit à nous demander s'il s'agit du même espace et des mêmes "mathématiques" auxquelles les études psychologiques font allusion. Car les motivations intellectuelles et la méthodologie employée par Emmanuel Kant étaient différentes de celles des neuroscientifiques actuels. Au cours des dernières décennies, une multitude de travaux neurophysiologiques menés chez l'animal ont été réalisés et permettent de mieux comprendre le fonctionnement cérébral, cette boîte noire dans laquelle les psychologues et cognitivistes ajoutent d'autres boîtes diversement nommées. Est-ce que ce sont les limitations du vocabulaire qui poussent les chercheurs engagés dans les sciences cognitives à plonger dans l'organe cérébral des notions qui relèvent d'autres sciences? Ou la cause se trouve-t-elle dans la difficulté à apprendre et retenir la complexe cartographie des réseaux fonctionnels et à poursuivre la construction de l'édifice que les études neuro-anatomo-physiologiques ont commencée. Cet édifice est constitué de connaissances solides qui, comme les mathématiques ou les sciences physico-chimiques, s'accumulent et reposent les unes sur les autres. Intégrer les notions d'"espace", de "temps", de "nombre" ou de "géométrie" dans le fonctionnement cérébral risque de provoquer une confusion chez les lecteurs naïfs ou même chez les mathématiciens, physiciens et philosophes. Quand des chercheurs en psychologie cognitive déclarent que les saccades oculaires déforment l'espace, le temps et les nombres⁴⁸, ils semblent postuler l'espace, le temps et les nombres comme des entités stables dont la permanence est bouleversée pendant chaque saccade. Si on suppose que l'espace est une entité engendrée par le fonctionnement cérébral et que les saccades en provoquent une certaine déformation, alors il faut accepter l'idée

⁴⁶ Mix K.S. & Cheng Y.L. (2012). The relation between space and math: Developmental and educational implications. *Advances in child development and behavior* 42: 197-243, page 198.

⁴⁷ Dehaene S. & Brannon E.M. (2011) Foreword. In: *Space, time and number in the brain. Searching for the foundations of mathematical thought*. Dehaene S. & Brannon E.M. (Eds), London: Academic Press. p. xii.

⁴⁸ Burr D.C., Ross J., Binda P. & Morrone M.C. (2010) Saccades compress space, time and number. *Trends in cognitive sciences* 14: 528-533; Morrone M.C., Ross J. & Burr D. (2005). Saccadic eye movements cause compression of time as well as space. *Nature neuroscience* 8: 950-954

paradoxe que les saccades contribuent à la fois à localiser les objets dans le monde “extérieur” tout en désagrégant l’espace perçu. Toutes ces complications pourraient être évitées si nous reconnaissons que ces notions ne sont pas celles étudiées par les philosophes ou les mathématiciens et que le problème se trouve dans une interprétation des mesures comportementales qui est soit abusive, soit incompatible avec les enseignements apportés par la neurophysiologie.

L’histoire des mathématiques nous enseigne que la géométrie et l’arithmétique ont évolué de manière relativement indépendante pendant de nombreux siècles, jusqu’à ce qu’il devienne possible, grâce à René Descartes, d’utiliser les nombres pour attribuer des coordonnées à différents points du plan. Quand les études de sciences cognitives annoncent l’existence de connexions entre les compétences spatiales et numériques⁴⁹, et que ces connexions ont un substrat anatomique alors on s’interroge sur ce dont elles parlent. S’agit-il de ces disciplines mathématiques que sont la géométrie et l’arithmétique ou s’agit-il tout simplement de leur pratique? L’historien des sciences Vincenzo De Risi nous enseigne que le terme d’espace (*spatium*), en tant que réceptacle est apparu au 16^{ème} siècle avec Francesco Patrizi⁵⁰. Nous verrons que d’autres conceptions ont été développées au sein de discours tous logiquement construits mais faisant intervenir des ontologies différentes. Certains auteurs

⁴⁹ Hawes Z. & Ansari D. (2020) What explains the relationship between spatial and mathematical skills? A review of evidence from brain and behavior. *Psychonomic Bulletin and Review* 1-18. Cipora K., Schroeder P.A., Soltanlou M. & Nuerk H.-C. (2018) More space, better mathematics: Is space a powerful tool or a cornerstone for understanding arithmetic? In: *Visualizing mathematics*, K.S. Mix & MT Battista (Eds), pp 77-116; Mix KS & Cheng Y-L (2012) The relation between space and math: Developmental and educational implications. In: *Advances in child development and behavior*. J.B. Benson (Ed) pp 197-243; Mix K.S. (2019) Why are spatial skill and mathematics related? *Child Development Perspectives* 13: 121-126; Young C.J., Levine S.C. & Mix K.S. (2018) The connection between spatial and mathematical ability across development. *Frontiers in Psychology* 9: 755; Newcombe N.S., Levine S.C. & Mix K.S. (2015) Thinking about quantity: the intertwined development of spatial and numerical cognition. *WIREs Cognitive Science* 6: 491-505; Toomarian E.Y. & Hubbard E.M. (2018) On the genesis of spatial-numerical associations: evolutionary and cultural factors co-construct the mental number line. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 90: 184-199. Vallortigara G. (2012) Core knowledge of object, number, and geometry: A comparative and neural approach. *Cognitive Neuropsychology* 29: 213-236; Umilta C., Priftis K. & Zorzi M. (2009) The spatial representation of numbers: evidence from neglect and pseudoneglect. *Experimental Brain Research* 192: 561-569.

⁵⁰ De Risi V. (2016) Francesco Patrizi and the new geometry of space. In: *Boundaries, extents and circulations*, K. Vermeir & J. Reger (Eds) pp. 55-106, Springer.

défendent que les notions de temps et d'espace auraient été inventées pour organiser la vie sociale⁵¹. Quand les sciences cognitives prononcent un recouvrement entre la cognition spatiale et la représentation cérébrale du temps⁵², nous sommes donc conduits à nous demander si les mots "espace" ou "temps" désignent les mêmes choses en mathématiques, en physique et en sciences cognitives.

Dans le texte qui suit, nous allons exposer quelques-unes des conceptions de l'espace qui sont apparues au cours de l'histoire. Notre objectif est de comprendre comment, malgré la médiation cruciale du fonctionnement cérébral et de l'esprit, des savants sont parvenus à affecter la notion d'espace à ce qui se trouve à l'extérieur de nous, puis à supposer une correspondance de cette "chose" dans le cerveau ou dans l'esprit. Notre présentation historique n'est pas du tout exhaustive mais elle permet de comprendre un peu mieux comment la notion d'espace s'est retrouvée intégrée dans le vocabulaire des neurosciences cognitives pour être assimilée au fonctionnement cérébral. Cette enquête historique nous conduira à nous interroger sur la correspondance entre le fonctionnement cérébral et l'emplacement occupé par un objet dans le monde "extérieur", mais aussi sur le statut de cette relation quand l'objet bouge. Si la science mécanique nous permet de quantifier le mouvement d'un objet dans un espace mathématique spécifique, aucune solution satisfaisante ne permet aujourd'hui de procéder à une pareille quantification quand on s'intéresse à ce qui se passe dans le cerveau d'un sujet qui voit un objet bouger devant lui ou quand il produit lui-même un mouvement. Démunis ou alors insouciant, une multitude de chercheurs ont cru bon de plonger dans le fonctionnement cérébral des notions cinématiques, oubliant que l'image (au sens mathématique du terme) cérébrale de l'objet réel en mouvement n'est ni un corps rigide ni réductible à un point. Ce questionnement nous amènera à nous poser la question de savoir si la façon dont le cerveau d'un animal permet de

⁵¹ Capek M. (2014) *The concepts of space and time: their structure and their development*. Springer. Jammer M. (2008) *Concepts d'espace. Une histoire des théories de l'espace en physique*. Paris : Vrin. Toulmin S. & Goodfield J. (1982) *The discovery of time*. Chicago: University of Chicago Press.

⁵² Srinivasan M. & Carey S. (2010) The long and the short of it: On the nature and origin of functional overlap between representations of space and time. *Cognition* 116: 217-241. Bonato M., Zorzi M. & Umiltà C. (2012) When time is space: evidence for a mental time line. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 36: 2257-2273; Hasselmo M.E. & Stern C.E. (2015) Current questions on space and time encoding. *Hippocampus* 24: 744-752; Buzsáki G. & Llinás R. (2017) Space and time in the brain. *Science* 358: 482-485.

capturer un objet visuel est comparable à un programme informatique qui a été écrit et corrigé tout au long de l'évolution animale, dans l'organisation ou le fonctionnement cérébral. Pour aider le lecteur à mieux appréhender ces études qui défendent l'idée que l'espace, le temps et le nombre auraient un substrat neuronal, nous présenterons dans le troisième chapitre les éléments que nous pensons être les plus importants du vocabulaire de la neurophysiologie ainsi que des méthodes qu'elle emploie pour faire progresser nos connaissances du fonctionnement du cerveau. A plusieurs reprises, nous nous référerons à la neurophysiologie de la motricité oculaire non seulement parce que c'est dans cette discipline qu'ont pu être faites les avancées les plus importantes mais aussi pour deux raisons principales. La première est que la direction du regard est comme une zone d'équilibre à partir de laquelle ce qui se trouve dans le champ visuel supérieur est qualifié de "situé en haut" et peut ainsi être distingué de ce qui se trouve en bas, de même que ce qui se trouve à gauche peut être distingué de ce qui se trouve à droite, et ce qui est proche de ce qui est plus loin devant soi. Nous verrons que cette catégorisation des directions de mouvements n'est ni arbitraire ni conventionnelle, qu'elle repose sur l'organisation neuromusculaire responsable des mouvements oculaires⁵³. La deuxième raison est liée au fait qu'à partir de ce point singulier les animaux manifestent la capacité d'estimer la distance à laquelle se trouve différents objets situés à l'extérieur du champ visuel central. A chaque fois, nous exposerons une analyse critique de certaines études afin que le lecteur soit bien informé de la signification des résultats, pour que soit reconnue fallacieuse cette suggestion que les sciences du cerveau pourraient résoudre le problème de la nature de l'espace, voire même expliquer l'efficacité des mathématiques dans les sciences. Tout au long de notre enquête, nous rappellerons ce problème fondamental préalable à toute science qu'est celui de son jargon plus ou moins spécifique, avec des notions et des symboles lui permettant de réduire et de rendre concevable la portion de réalité qu'elle cherche à capturer et à communiquer. Nous verrons comment son discours est en permanence remué et remis en question par les membres de sa communauté.

⁵³ Goffart L., Quinet J. & Bourrelly C. (soumis) Neurophysiology of gaze orientation: Core neuronal networks. In: J. Grafman (Ed) *Encyclopedia of the Human Brain*. Elsevier.

1. L'ESPACE ET LA GÉOMÉTRIE AU COURS DE L'HISTOIRE

"Comprendre les fondements cognitifs de la géométrie exige que l'on comprenne aussi les fondements de la notion d'espace"⁵⁴

"Dans ces conditions l'espace a-t-il des propriétés géométriques indépendantes des instruments qui servent à le mesurer?"⁵⁵

Pour la majorité d'entre nous, le monde dans lequel nous évoluons ne se présente pas comme un épais brouillard. Nous sommes capables de discerner des objets localement compacts et impénétrables parmi d'autres phénomènes de nature différente, moins saisissables comme les sons, les souffles, les odeurs ou les vertiges. Nous pouvons agir sur certains qui peuvent eux-aussi, avec d'autres, influencer nos actions. Nous interagissons avec beaucoup d'entre eux et leur présence est attestée par cette capacité que nous avons de pouvoir y attacher notre regard et notre attention ou de les en détacher, de pouvoir saisir certains ou les lâcher à volonté, de les affronter ou de nous en éloigner. Mais il faut se rappeler qu'il n'en a pas toujours été ainsi. La capacité de discerner tous les objets d'une scène visuelle suppose une certaine maturation cérébrale. Qu'elles soient multiples ou non, les choses du monde sont l'occasion d'un accrochage sensorimoteur ; elles constituent ce monde que nous éprouvons avec nos sens et nos actions. Au cours de ces accrochages, des activités électrochimiques se mettent en branle dans de multiples régions de notre cerveau et y sont entretenues. Ces activités sont distinctes de celles qui nous conduisent à ressentir le vertige, la chaleur, la peur ou de celles qui nous envahissent lorsque nous plongeons dans un état de somnolence.

Dans ce chapitre, nous allons étudier comment la notion d'espace est devenue un objet d'étude pour les sciences cognitives. Nous verrons qu'elle n'a pas toujours désigné la même chose au cours des siècles. L'espace n'a pas toujours été conçu comme ce réceptacle

⁵⁴ Berthoz A. (2005). Espace perçu, espace vécu, espace conçu. In: *Les Espaces de l'homme*. A. Berthoz & R. Recht (Eds), Paris: Odile Jacob.

⁵⁵ Poincaré H. (1913). *Dernières pensées*. Paris: Flammarion, page 40.

dans lequel les corps sont soit campés dans un lieu, soit en mouvement. L'idée qu'il y ait dans le fonctionnement cérébral une équivalence de cette instance stable et permanente n'aurait peut-être pas été exploitée de la même manière si, plutôt que du conséquent qu'est le vécu psychologique, les chercheurs avaient démarré leurs investigations à partir de l'antécédent, les contraintes physiologiques du fonctionnement cérébral. Il est fréquent de lire ou d'entendre qu'un objet bouge dans l'espace plutôt que dans le monde. Cette formulation n'est pas du tout évidente à comprendre quand on s'interroge sur ce qui se passe dans le cerveau de la personne qui déclare voir un objet quelconque devant elle. Nous comprenons parce que les mots qu'elle prononce ont un sens et que nous pouvons imaginer ce dont elle parle. Mais il n'est pas certain que nous puissions parvenir au même résultat en étudiant en détail le fonctionnement cérébral. Il est même improbable que nous puissions y découvrir le substrat cérébral de l'espace. L'observation d'un échiquier ne nous enseigne rien de ce qu'est une partie de jeu d'échec parce que ce qu'il s'y passe ne se trouve pas seulement dans le cerveau du joueur, ni sur le plateau quadrillé ou dans le jardin public où les joueurs se rencontrent; la partie se trouve aussi dans les règles du jeu dont la mémoire peut très bien être distribuée entre les deux joueurs voire rappelée par un autre observateur. Et si ces règles étaient comme le cadre et la toile d'une peinture, alors nous ne verrions pas les couleurs. Le nombre de publications de neurosciences dont le titre contient le terme "espace" est extrêmement grand. On trouve même dans certaines la formule "codage de l'espace", dans les zones frontales du cortex cérébral⁵⁶, dans les zones pariétales⁵⁷ ou dans les deux⁵⁸. Cette notion de codage signifie la représentation neuronale de l'espace, son implémentation et sa correspondance. Elle fut introduite et utilisée principalement par la communauté des électrophysiologistes alors qu'ils s'efforçaient de déchiffrer un "code" qu'ils imaginaient caché dans les séquences de potentiels d'action émises par les cellules nerveuses.

⁵⁶ Graziano M., Yap G.S. & Gross C. (1994) Coding of visual space by premotor neurons. *Science* 266: 1054-1057; Fogassi L., Gallese V., Di Pellegrino G., Fadiga L., Gentilucci M. & Luppino G. & Rizzolatti G. (1992) Space coding by premotor cortex *Experimental Brain Research* 89: 686-690.

⁵⁷ Bremmer F., Schlack A., Duhamel J.-R., Graf W. & Fink G.R. (2001) Space coding in primate posterior parietal cortex. *Neuroimage* 14: S46-S51.

⁵⁸ Boussaoud D. & Bremmer F. (1999) Gaze effects in the cerebral cortex: reference frames for space coding and action. *Experimental Brain Research* 128: 170-180.

Nous avons vu que Stanislas Dehaene et Elizabeth Brannon imaginaient que "si Emmanuel Kant ou Blaise Pascal étaient nés aujourd'hui, ils seraient probablement des neuroscientifiques cognitifs"⁵⁹. Nous allons voir qu'Emmanuel Kant considérait l'espace et le temps comme des formes de notre sensibilité, préalables et rendant possible toute expérience empirique. Ils seraient selon lui "*des déterminations inhérentes, non aux choses en elles-mêmes, mais simplement à leur rapport à la sensibilité*"⁶⁰. Selon lui, l'espace et le temps ne sont pas que de simples filtres perceptifs; ils sont fondamentalement constitutifs du processus de connaissance. Emmanuel Kant proposait en effet que l'espace et le temps sont "*les intuitions sur lesquelles la mathématique pure fonde toutes ses connaissances et tous ses jugements qui se présentent à la fois apodictiques et nécessaires*"⁶¹. Avec Kant, le questionnement sur la nature de l'espace et du temps conduit donc à s'interroger sur les mathématiques car la géométrie est fondée sur l'intuition de l'espace tandis que l'arithmétique forme ses concepts de nombre "*par addition successives des unités dans le temps*"⁶². Sa thèse s'étend même à la science newtonienne du mouvement car la mécanique ne pourrait "*former ses concepts de mouvement qu'au moyen de la représentation du temps*"⁶³. Pour le philosophe de Königsberg, "*l'entendement ne puise pas ses lois ... dans la nature mais les lui prescrit*"⁶⁴. Il est "*occupé à chaque instant à épier les phénomènes dans le but d'y découvrir une règle quelconque*"⁶⁵. Comme le rappelle le philosophe Karl Popper, la thèse kantienne considère que "*la science newtonienne ... n'est pas produite par les observations mais par nos manières de penser, par nos efforts pour ordonner les données des sens, les comprendre et les assimiler intellectuellement*"⁶⁶. Dit autrement par le philosophe Jacques Bouveresse, Kant nous invite à concevoir que les lois newtoniennes de la nature sont

⁵⁹ Dehaene S. & Brannon E.M. (2011) Foreword. In : Space, time and number in the brain. Searching for the foundations of mathematical thought. Dehaene S. & Brannon E.M. (Eds), London: Academic Press. p. xii.

⁶⁰ Kant E. (1783/1967) Prolégomènes à toute métaphysique future qui pourra se présenter comme science. Paris: Vrin, pages 44-45.

⁶¹ *Ibid.*

⁶² *Ibid.*

⁶³ *Ibid.*

⁶⁴ *Ibid.*, page 96.

⁶⁵ Kant E. (1781/1787, 1980) Critique de la raison pure A126/1425.

⁶⁶ Popper K.R. (1985) *Conjectures et réfutations. La croissance du savoir scientifique*. Paris: Payot, page 271.

prescrites par l'entendement; elles sont "le résultat d'une projection effectuée sur la réalité à partir de propriétés ou de dispositions qui sont constitutives de la nature du sujet connaissant lui-même"⁶⁷

A partir d'Emmanuel Kant, nombreux sont celles et ceux qui vont s'efforcer d'aller au-delà pour étayer davantage sa théorie, ou alors pour en montrer les limites, ou encore pour l'infirmer. Dans la mesure où le cerveau est l'organe qui nous met en relation avec les événements qui se produisent en dehors de notre corps, que cette mise en relation est permise par une multitude de cellules organisées en réseaux, on peut en effet être amené à imaginer que l'espace et le temps soient engendrés par l'organisation anatomo-physiologique du système nerveux central, comme le feront les artisans du courant physiologiste néo-kantien⁶⁸ dont Hermann von Helmholtz sera l'un des acteurs majeurs. Aussi, à l'aube du vingtième siècle, la découverte de géométries nouvelles qui ne soient pas euclidiennes conduira Henri Poincaré à nuancer la thèse kantienne de l'espace. Il ne serait plus une forme de l'intuition mais un concept de l'entendement, et donc quelque chose de beaucoup plus abstrait et plus intégré. Que l'espace et le temps relèvent de l'intuition, de l'entendement ou de ces instruments de mesure distincts dont nous nous servons pour mathématiser nos mouvements, nous sommes conduits à nous interroger sur la signification de ces démonstrations qu'auraient apportées certaines études psychophysiques, neuropsychologiques et de neuro-imagerie au sujet de ces "dimensions entrelacées dans le cerveau"⁶⁹.

Nous avons coutume de considérer que nous nous orientons, que nous nous déplaçons dans l'espace et dans le temps. Mais quelles sont les raisons qui nous amènent à avoir recours à ces deux notions plutôt qu'à celle de monde propre, comme l'avait fait Jakob von Uexküll avec le terme de "Umwelt"? Comment l'espace et le temps ont-ils été extirpés de ce monde? Caractérisent-ils vraiment cette réalité que nous cherchons à comprendre ou ne sont-ils rien de plus que des concepts, des hypothèses de l'esprit humain, voire des tournures d'esprit

⁶⁷ Bouveresse J. (1991) Le problème de l'a priori et la conception évolutionniste des lois de la pensée. *Revue de théologie et de philosophie* 123: 353-368.

⁶⁸ Pecere P. (2021) "Physiological Kantianism" and the "organization of the mind": a reconsideration. *Intellectual History Review* 31: 693-714.

⁶⁹ Binetti N., Hagura N., Fadipe C., Tomassini A., Walsh V. & Bestmann S (2015) Binding space and time through action. *Proceedings of the Royal Society Biological Sciences* 282:20150381.

appartenant à notre histoire culturelle? L'anthropologue américain Edward Sapir défendait la thèse selon laquelle *“les êtres humains ne vivent pas uniquement dans le monde objectif ni dans le monde des activités sociales tel qu'on se le représente ordinairement, mais ils sont en grande partie conditionnés par la langue particulière qui est devenue le moyen d'expression de leur société”*⁷⁰. Il est, selon lui, *“tout à fait illusoire de croire qu'on s'ajuste à la réalité essentiellement sans l'intermédiaire de la langue et que celle-ci n'est qu'un moyen accessoire pour résoudre des problèmes spécifiques de communication ou de réflexion”*. Selon cette thèse, notre monde est donc *“dans une large mesure édifié inconsciemment sur les habitudes de langage du groupe”*⁷¹ et *“nous voyons, entendons et expérimentons très largement comme nous le faisons parce que les habitudes langagières de notre communauté prédisposent certains choix d'interprétation”*⁷². Si l'espace et le temps ne sont pas des habitudes linguistiques, ils peuvent désigner ce qui, dans le fonctionnement cérébral, engendre cet état mental constitutif de la permanence de notre monde propre et nous permet d'échapper à la désorientation totale. Après une chute ou au sortir d'un sommeil, nous nous redressons et nous nous engageons dans une direction particulière. Nous ne démarrons pas cette marche caractéristique de la personne paniquée, totalement désorientée, qui ne sait ni où elle est, ni où elle va.

Au cours des dernières décennies, les notions d'espace et de temps sont devenues très populaires dans le domaine des sciences cognitives parce qu'elles sont considérées constituer les ingrédients fondamentaux de notre expérience et de notre présence dans le monde. La notion de nombre est venue se joindre à celles d'espace et de temps dans des études sur les mécanismes de la pensée et de l'esprit: *“le nombre et l'espace sont intégralement liés dans l'esprit humain”* affirmait encore récemment Elizabeth Brannon⁷³. Inscrits dans notre langage depuis plusieurs siècles, l'espace et le temps n'ont pourtant pas toujours été considérés comme des dimensions de l'esprit humain voire des émanations intellectuelles du fonctionnement cérébral. Ils ont été et ils restent encore largement considérés comme des dimensions de ce monde “extérieur”, extra-corporel et extra-mental dans lequel évoluent

⁷⁰ Sapir E. (1929) The status of linguistics as a science. *Language* 5: 207-214, page 209.

⁷¹ Sapir E. (1929) *Ibid.*

⁷² Sapir E. (1929) *Ibid.* page 210.

⁷³ Drucker C.B. & Brannon E.M. (2014) Rhesus monkeys (*Macaca mulatta*) map number onto space. *Cognition* 132: 57-67.

notre corps et beaucoup d'autres objets qui nous sont étrangers. L'idée a même été proposée, nous le verrons avec la thèse évolutionniste, que la vie et la pensée, les organes et les catégories soient modelées par les interactions avec le monde "extérieur". Le monde et ses contraintes seraient comme une sorte de moule dans lequel ces matières malléables, plus ou moins résistantes, que seraient la pensée et le corps seraient façonnés.

Nous allons donc maintenant étudier le chemin que la notion d'espace a parcouru pour sortir du vide et, à partir de quelque chose relevant du monde "extérieur", devenir, avec les sciences cognitives, un produit de l'esprit puis du fonctionnement cérébral. Cette métamorphose conceptuelle pourrait ne pas paraître surprenante dès lors que l'on sait que le cerveau est l'organe central des fonctions physiologiques grâce auquel nous avons accès à ce monde "extérieur". Pourtant, malgré cet incontournable intermédiaire, les physiciens produisent un corpus de connaissances permettant de comprendre, prédire et contrôler le mouvement des objets qui ne font partie ni de notre corps ni de notre esprit. Il faudra attendre Emmanuel Kant pour qu'apparaissent l'idée que les lois de la mécanique newtonienne soient prescrites par l'esprit humain.

1.1. Les thèse pré-kantiennes

L'existence de l'espace n'est pas évoquée dans les *Éléments d'Euclide*, le premier traité de géométrie. Thomas de Vittori, historien de la géométrie nous explique que "*l'espace n'est jamais pensé en tant que tel*" et que "*les concepts philosophiques les plus proches que l'on puisse trouver pour rendre compte des propriétés spatiales sont le lieu et le vide*"⁷⁴. Un autre philosophe et historien des sciences, Vincenzo de Risi, nous enseigne que le terme d'espace (*Spatium*), considéré à la fois comme une entité incorporelle pouvant faire l'objet de la géométrie est apparu en Italie au 16ème siècle avec Francesco Patrizi⁷⁵. C'est à ce penseur que nous devons cette notion d'espace accueillant les différents corps matériels et qui puisse être, elle aussi, quantifiée. Ainsi, les mathématiques vont pouvoir être appliquées à une chose

⁷⁴ de Vittori T. (2009) *Les notions d'espace en géométrie. De l'antiquité à l'âge classique*. Paris: L'harmattan, page 30.

⁷⁵ de Risi V. (2016) Francesco Patrizi and the new geometry of space. In: *Boundaries, extents and circulations. Space and spatiality in early modern philosophy*. K. Vermeir & J. Regier (Eds) Springer p55-106.

incorporelle, et non plus seulement aux corps étendus. Vincenzo de Risi explique que la thèse patrizienne est *“sans doute l'une des premières grandes tentatives métaphysiques pour justifier la mathématisabilité du monde dans son ensemble, alors que l'épistémologie antique considérait d'abord l'applicabilité des mathématiques à certaines formes ou substances spécifiques (le ciel, par exemple), sans passer par la notion d'un espace général”*⁷⁶. Il est possible que des facteurs sociaux aient indirectement contribué à la naissance de cette idée, avec notamment cette interdiction ecclésiastique d'enseigner à partir de 1277 que les anges ne sont pas localisables. L'historienne Suarez-Nani explique en effet que suite à cette interdiction, l'idée fut promue et répandue que la relation à l'espace physique est *“une condition nécessaire et intrinsèque à toutes les créatures, matérielles et immatérielles”*⁷⁷.

Compte tenu des vues anti-aristotéliennes de Francesco Patrizi⁷⁸, nous allons donc commencer par rappeler la thèse aristotélienne car elle permet, par raisonnement antithétique, de comprendre cette nouvelle géométrie qui va se développer et conduire aux conceptions newtonienne et kantienne de l'espace.

1.1.1. La thèse aristotélienne

Contrairement aux thèses atomistes, Aristote refusait l'existence du vide. Sa conception à propos de cette chose que nous désignons aujourd'hui avec le terme d'espace repose sur la notion de lieu. L'existence du lieu est prouvée par le fait que deux corps différents peuvent occuper à différents moments le même emplacement, lequel doit donc être *“quelque chose de nature différente des corps qui l'occupent”*⁷⁹. Le lieu et le corps sont co-existants dans la conception aristotélienne : *“le lieu n'apparaît pas par lui-même ... Il n'y a pas d'objet sans lieu ni de lieu sans objet”*⁸⁰. Il n'est pas possible de concevoir ce que nous

⁷⁶ de Risi V. (2016) *Op. cit.* page 84

⁷⁷ Suarez-Nani T. (2018) Space and movement in medieval thought: The Angelological shift. In: *Space, imagination and the cosmos from antiquity to the early modern period*, F.A. Bakker, D. Bellis & C.R. Palmerino (Eds) pp. 69-89, Springer, page 75.

⁷⁸ Patrizi F. & Brikman B. (1943) On physical space. *Journal of the History of Ideas* 4: 224-245; Edelheit A. (2009) Francesco Patrizi's two books on space: geometry, mathematics, and dialectic beyond Aristotelian science. *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 40: 243-257.

⁷⁹ de Vittori T. (2009) *Op. cit.* page 31

⁸⁰ *Ibid.*

appelons aujourd'hui "espace" comme un corps car cela reviendrait à mettre un corps dans un autre. Cette chose ne peut pas non plus être séparé des corps puisque ce qui définit l'emplacement d'un corps le délimite du reste. Pour le physicien-philosophe Ernst Mach, *"toutes les difficultés à concevoir l'espace se retrouvent dans les explications qu'[Aristote] donne du mouvement"*⁸¹ car la notion d'espace repose sur la possibilité d'existence du vide, ce que refuse Aristote. Et si les notions de corps et d'espace sont confondues, le vide n'est plus concevable. En revanche, si l'espace est conçu comme une sorte de vase, un réceptacle, alors le vide devient concevable et la géométrie nous conduit vers cette idée car elle fait *"abstraction de toutes les propriétés des corps, sauf de leur limitation solide. Ce développement se trouve confirmé par l'observation naïve et sensible du mouvement des corps dans un milieu transparent, peu dense, comme l'air, qui, à l'occasion, peut être considéré comme un rien, comme un vide"*⁸², même si le vide n'est aucunement un rien, qu'*"il a au contraire des propriétés physiques très importantes"*⁸³. Pour Aristote, la certitude qu'il n'y ait pas de vide séparé des corps résultait du fait physique suivant : si *"un corps se déplace d'autant plus vite que le milieu est moins dense"*, alors *"dans le vide, le mouvement devrait se faire en un temps nul, ce qui est impossible"*⁸⁴. Ce paradoxe sera levé avec un principe physique que nous allons voir avec Pierre Gassendi, le principe d'inertie.

1.1.2 Les thèses cartésienne et gassendienne

Avant de présenter ce principe et la thèse de l'espace comme cadre à l'intérieur duquel les mouvements des corps seront décrits et mesurés, nous devons mentionner la contribution majeure de René Descartes (1596-1650). Ses travaux mathématiques vont en effet permettre d'attribuer des valeurs numériques aux différents points du plan et transformer la géométrie en calcul algébrique. En revanche, pour le savant français, l'espace n'est pas le vide; il est intimement lié à cette propriété des corps matériels d'être caractérisés par une certaine étendue. Selon lui, *"la nature de la matière ou du corps en général ne consiste point en ce qu'il*

⁸¹ Mach E. (1919) *La connaissance et l'erreur*. Paris: Flammarion, page 357.

⁸² *Ibid.*, page 358.

⁸³ *Ibid.*, page 363-364. Pour une exposition historique des débats autour de l'existence du vide, voir Grant E. (2008) *Much ado about nothing: Theories of space and vacuum from the middle ages to the scientific revolution*. Cambridge : Cambridge University Press.

⁸⁴ de Vittori T. (2009) *Op. cit.* page 32.

*est une chose dure, ou pesante, ou colorée ou qui touche nos sens de quelque autre façon, mais seulement en ce qu'il est une substance étendue en longueur, largeur et profondeur*⁸⁵ et c'est cette étendue du matériel qui autorise l'usage de l'arithmétique par le truchement de mesures de distance effectuées selon trois axes passant par une seule et même origine. Descartes nous explique que cette distinction que nous faisons entre les corps et les lieux qu'ils occupent est le fait de notre pensée. Il écrit en effet que "*l'espace ou le lieu intérieur, et le corps qui est compris en cet espace, ne sont différents aussi que par notre pensée. Car, en effet, la même étendue en longueur, largeur et profondeur qui constitue l'espace constitue le corps*"⁸⁶. Autrement dit, "*la même étendue qui constitue la nature du corps constitue aussi la nature de l'espace, en sorte qu'ils ne diffèrent entre eux que comme la nature du genre ou de l'espèce diffère de la nature de l'individu ... la véritable idée qui nous fait concevoir qu' [une pierre] est un corps consiste en cela seul que nous apercevons distinctement qu'elle est une substance étendue en longueur, largeur et profondeur; or cela même est compris en l'idée que nous avons de l'espace, non seulement de celui qui est plein de corps, mais encore de celui qu'on appelle vide*"⁸⁷. Comme Aristote, René Descartes rejette l'idée d'un vide qui séparerait les corps entre eux. Si ceux-ci nous paraissent distincts les uns des autres, c'est à cause de la raréfaction de la matière.

Son contemporain, le mathématicien et théologien Pierre Gassendi (1592-1655) défend une conception radicalement opposée⁸⁸. Non seulement il était atomiste et considérait la réalité physique faite d'atomes et d'objets contigus, mais il défendait aussi la thèse selon laquelle l'espace n'est pas du tout quelque chose qui soit attaché aux corps. En fait, pour Gassendi, l'espace en est la négation. C'est quelque chose d'incorporel que l'on peut concevoir en imaginant l'annihilation d'un objet corporel qui se présente à nos sens. C'est ce qui reste quand on retire un corps. Ce n'est pas le vide mais quelque chose qui est homogène, isotrope, immobile et immuable. Contrairement aux corps, cette chose est indivisible, comme

⁸⁵ Descartes R. (1681) Les principes de la philosophie. 2ème partie, paragraphe 4. Dans Œuvres de Descartes, publiées par Victor Cousin (1824-1826) tome 3, Paris: Levrault, page 306.

⁸⁶ *Ibid.* paragraphe 10.

⁸⁷ *Ibid.* paragraphe 11.

⁸⁸ Bellis D. (2013) Lieu et espace dans la philosophie de Gassendi. In : L. Petterschmitt (Ed) *Espace et métaphysique de Gassendi à Kant* (pp. 61-75) Hermann; Bellis D. (2018) Imaginary spaces and cosmological issues in Gassendi's philosophy. In: *Space, imagination and the cosmos from antiquity to the early modern period* (pp. 233-260). Springer.

le temps. Nous pouvons désigner certaines de ses régions mais cela relève d'une opération de notre esprit. Aussi Gassendi considère-t-il la réalité fondamentalement distincte des entités mathématiques dans la mesure où leur continuité résulte d'une abstraction faite par l'esprit humain⁸⁹. Selon lui en effet, *"il est faux que les idées de figures géométriques ne soient pas tirées des sens et qu'elles puissent exister dans le monde telles qu'elles sont conçues par les géomètres, à savoir indivisibles"*⁹⁰.

Isaac Newton va lui aussi s'opposer à l'identification cartésienne de l'espace aux seuls lieux qu'occupent les corps matériels. En revanche, nous allons voir que pour lui les mathématiques sont constitutives du monde. Il va bâtir une philosophie de la nature, une physique où le temps et l'espace sont des cadres immatériels et indépendants auxquels nous continuons aujourd'hui de nous référer pour situer le mouvement d'un corps.

1.1.3. La thèse newtonienne

Galileo Galilei (1565-1642) déclarait que *"la philosophie est écrite dans ce vaste livre qui constamment se tient ouvert devant nos yeux ... et on ne peut le comprendre si d'abord on n'apprend pas à connaître la langue et les caractères dans lesquels il est écrit ... [à savoir] en langue mathématique ... [dont les] caractères sont les triangles, les cercles et autres figures géométriques, sans lesquelles il est humainement impossible d'en comprendre un seul mot, sans lesquelles on erre vraiment dans un labyrinthe obscur"*⁹¹. De même, Isaac Newton (1643-1727) affirmait qu'il y avait *"partout toutes sortes de figures, partout des sphères, partout des lignes droites, partout des lignes circulaires, elliptiques, paraboliques, et toutes les autres sortes de lignes et ce, de toutes formes et grandeurs, même si elles ne sont pas tracées de manière visible. Car, le tracé matériel d'une figure quelconque est non pas une nouvelle production de cette figure eu égard à l'espace, mais seulement sa représentation corporelle de telle sorte qu'elle apparaît maintenant aux sens alors qu'auparavant elle était insensiblement*

⁸⁹ Bellis D. (2018) *Op. cit.* page 257.

⁹⁰ Gassendi P. (1644) *Disquisitio metaphysica* 254, cité par Bellis D (2018) *Imaginary spaces and cosmological issues in Gassendi's philosophy*. In: FA Bakker et al. (Eds) *Space, imagination and the Cosmos from Antiquity to the early modern period*. *Studies in History and Philosophy of Sciences* 48, note 101 de la page 256.

⁹¹ Galilée G. (1980) *L'Essayeur*, trad. C. Chauviré. Besançon : Presses Universitaires de Franche-Comté, page 141

présente dans l'espace"⁹². A propos de l'espace, Isaac Newton défendait qu'"il est nécessaire de rapporter la détermination des lieux et donc le mouvement local à quelque être immobile tel que l'étendue seule ou l'espace considéré comme quelque chose de réellement distinct des corps"⁹³. Dissocié de la matière des corps, l'espace n'est plus limité par leurs bordures; il est absolu. C'est une entité infinie, un réceptacle qui contiendrait toutes les parties matérielles de l'univers. Il est aussi une condition nécessaire à ce qui existe, une "*affection de l'être en tant qu'être. Aucun être n'existe ni ne peut exister sans être rapporté, de quelque manière, à l'espace*"⁹⁴.

Comme chez René Descartes, le discours newtonien fait souvent intervenir des arguments théologiques, probablement à cause d'une époque où la science et la religion n'étaient pas encore séparées. On trouve en effet dans les écrits newtoniens que "*Dieu est partout, les esprits créés sont quelque part, le corps est dans l'espace qu'il remplit et toute chose qui est ni partout ni quelque part, n'a pas d'être. Il suit de là que l'espace est un effet émanant d'un être qui existe à titre premier, puisque, quel que soit l'être que l'on pose, l'espace est posé par là même*"⁹⁵. L'espace est une entité absolue, compacte car indivisible, homogène aussi car sa nature est mathématique: "*l'espace lui-même n'a de parties qui puissent être séparées l'une de l'autre, ou être déplacées les unes par rapport aux autres, ou être distinguées l'une de l'autre par quelques marques inhérentes. L'espace n'est pas composé de parties agrégées ... En chacun de ses points il est pareil à lui-même et uniforme et il n'a vraiment pas d'autres parties que des points mathématiques, c'est-à-dire partout infini en nombre et rien en taille. Car c'est un seul être, le plus simple et le plus parfait dans son genre*"⁹⁶. L'espace et

⁹² Newton I. (1985) De la gravitation ou des fondements de la mécanique classique (traduction M.F. Biarnais). Paris: Les Belles Lettres, page 38.

⁹³ Newton I. (1985) *Ibid.* page 34.

⁹⁴ *Ibid.*, page 44.

⁹⁵ *Ibid.*

⁹⁶ Newton I. (1692) Tempus et locus. In : J.E. McGuire (1978) Newton on Place, Time and God : an unpublished source. *The British Journal for the History of Science* 11: 114-129, traduction de "*Space itself has no parts which can be separated from one another, or be moved among themselves, or be distinguished from one another by any inherent marks. Space is not compounded of aggregated parts... In each of its points it is like itself and uniform nor does it truly have parts other than mathematical points, that is everywhere infinite in number and nothing in magnitude. For it is a single being, most simple, and most perfect in its kind.*", page 117.

le temps newtonien ne peuvent cependant pas être appréhendés par nos sens. L'historien des sciences James McGuire explique que les notions de Dieu, d'espace et de temps sont intimement connectées dans l'esprit de Newton, dès son manuscrit "*De gravitatione*" (1684-1685), un texte qui contient déjà le cadre ontologique qui est au fondement de son œuvre maîtresse, les principes mathématiques de la philosophie naturelle⁹⁷ (1686). Ces trois notions vont devenir centrales dans une dispute qu'il aura indirectement avec un de ses contemporains, Gottfried Wilhelm Leibniz. Dans une correspondance entre le philosophe-mathématicien allemand et un proche d'Isaac Newton, le théologien Samuel Clarke (1675-1729), on apprend que dans la conception newtonienne, "*l'espace n'est pas une substance, un être éternel et infini, mais une propriété ou une suite de l'existence d'un être infini et éternel*". Aussi n'est-il pas l'être divin créateur de l'univers ou le "lieu de Dieu" comme le concevait un de leurs prédécesseurs, le philosophe anglais Henry More (1614-1687)⁹⁸. Isaac Newton et Samuel Clarke se démarquent en effet clairement de la thèse de More quand ils expliquent que "*l'espace infini est l'immensité, mais l'immensité n'est pas Dieu; donc l'espace infini n'est pas Dieu*"⁹⁹. Bien que Dieu et l'espace partagent des propriétés d'éternité et d'infinité, "*l'espace est immense, immuable et éternel; et l'on doit dire la même chose de la durée. Mais il ne s'ensuit pas de là qu'il y ait rien d'éternel hors de Dieu; car l'espace et la durée ne sont pas hors de Dieu: ce sont des suites immédiates et nécessaires de son existence, sans lesquelles il ne serait point éternel et présent partout*"¹⁰⁰. Isaac Newton distinguait donc bien l'espace de l'Être divin dans la mesure où celui-ci est caractérisé par des propriétés étrangères à la notion d'espace, comme la sagesse, la puissance et la vie. Il prenait en effet soin de préciser qu'"*en raison de son éternité et de son infinité, l'espace ne sera ni Dieu ni sage ni puissant ni vivant, mais augmentera simplement en durée et en ampleur; tandis que Dieu en raison de l'éternité et de l'infinité de son espace (c'est-à-dire en raison de son éternelle omniprésence) sera rendu la chose la plus parfaite. Une étoile fixe, que son existence soit*

⁹⁷ Ducheyne S. (2001) Isaac Newton on space and time: metaphysician or not? *Philosophica* 67:77-114, page 80.

⁹⁸ Power J.E. (1970) Henry More and Isaac Newton on absolute space. *Journal of the History of Ideas* 31:289-296; Monnoyeur F. (1995) Henry More: plaidoyer pour un espace infini et divin. In: F. Monnoyeur (Ed) *Infini des philosophes, infini des astronomes*, p 77-92, Paris: Belin.

⁹⁹ Lettres entre Leibniz et Clarke (1745), 3ème paragraphe de la 3ème réplique de M. Clarke, page 428 dans M.A. Jacques (1842) *Œuvres de Leibniz*, série II, Paris: Charpentier.

¹⁰⁰ *Ibid.*, 10ème paragraphe de la 4ème réplique de M. Clarke, page 440.

apparue en premier parmi toutes les étoiles ou après une succession éternelle d'étoiles préalables, que le nombre d'étoiles soit fini ou infini, ne sera pas ou plus parfaite ou plus imparfaite".¹⁰¹

Si dans plusieurs de ses écrits, Isaac Newton apparente l'espace à une sorte d'organe sensoriel de Dieu, au *sensorium dei*, c'est en guise de métaphore pour rendre plus intelligible cette conception de l'espace qu'il propose¹⁰². Samuel Clarke précise en effet que "*M. le chevalier Newton ne dit pas que l'espace est l'organe dont Dieu se sert pour apercevoir les choses ; il ne dit pas non plus que Dieu ait besoin d'aucun moyen pour les apercevoir. Au contraire, il dit que Dieu, étant présent partout, aperçoit les choses par sa présence immédiate dans tout l'espace où elles sont, sans l'intervention ou le secours d'aucun organe ou d'aucun moyen. Pour rendre cela plus intelligible, il l'éclaircit par une comparaison. Il dit que comme l'âme, étant immédiatement présente aux images qui se forment dans le cerveau par le moyen des organes des sens, voit ces images comme si elles étaient les choses mêmes qu'elles représentent ; de même Dieu voit tout par sa présence immédiate, étant actuellement présent aux choses mêmes, à toutes les choses qui sont dans l'univers, comme l'âme est présente à toutes les images qui se forme dans le cerveau. M. Newton considère le cerveau et les organes des sens comme le moyen par lequel ces images sont formées, et non comme le moyen par lequel l'âme voit ou aperçoit ces images lorsqu'elles sont ainsi formées ... C'est tout ce que M. Newton a voulu dire par la comparaison dont il s'est servi, lorsqu'il suppose que l'espace infini est, pour ainsi dire, le sensorium de l'Être qui est présent partout*"¹⁰³. Dans l'*Optique*, un autre de ses ouvrages, Isaac Newton fait là encore la distinction entre d'un côté l'omniprésence divine et sa perception immédiate, et de l'autre côté, l'étroitesse à la fois de nos sens et de

¹⁰¹ TdA : "*By reason of its eternity and infinity space will neither be God nor wise nor powerful nor alive, but will merely be increased in duration and magnitude ; whereas God by reason of the eternity and infinity of his space (that is, by reason of his eternal omnipresence) will be rendered the most perfect being. A fixed star, whether it has come into existence as the first of all stars or after an eternal succession of previous stars, whether the number of the stars be finite or infinite, will not thereby be either more perfect or more imperfect*". Newton I. (1692) *Tempus et locus*. In : J.E. McGuire (1978) *Newton on Place, Time and God : an unpublished source. The British Journal for the History of Science* 11(38): 114-129.

¹⁰² Hamou P. (2014) *Sensorium Dei. Espace et présence sensible de l'esprit chez Newton. Revue philosophique de la France et de l'Étranger* 139: 47-72. Belkind O. (2013) *Leibniz and Newton on Space. Foundations of Science* 18: 467-497.

¹⁰³ *Lettres entre Leibniz et Clarke (1745) Op.cit.*, première réplique de M. Clarke, page 415

notre entendement: *“Ne paraît-il pas, par les phénomènes, qu’il y a un être incorporel, vivant, intelligent, tout présent? Qui dans l’espace infini comme si c’était dans son sensorium, voit intimement les choses en elles-mêmes, les aperçoit, les comprend entièrement et à fond, parce qu’elles lui sont immédiatement présentes : desquelles choses il n’y a que les images seules qui étant portées par les organes des sens dans le lieu étroit de nos sensations puissent être aperçues par ce qui sent et pense en nous”*¹⁰⁴.

Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) s’opposait lui aussi à l’idée que l’espace soit comme un organe par lequel Dieu “perçoit” les choses car *“si Dieu avait besoin d’un organe pour percevoir les choses, il s’ensuit qu’elles ne dépendraient pas toutes de lui, ni n’auraient été produites par lui”*¹⁰⁵. En revanche, le mathématicien-philosophe allemand s’opposa à la notion d’espace absolu, indivisible et infini. Selon lui, l’espace et le temps sont des ordres de relation par lesquels les corps du monde sont agencés les uns aux autres. L’espace n’est donc pas absolu mais relationnel, correspondant à l’ordre des choses qui coexistent simultanément alors que le temps correspond à l’ordre de la succession, définissant donc la façon dont s’ordonnent les choses qui ne coexistent pas. On retrouve cette conception dans la correspondance avec Samuel Clarke. Gottfried Leibniz y déclare en effet tenir *“l’espace pour quelque chose de purement relatif, comme le temps ; pour un ordre des coexistences, comme le temps est un ordre des successions. Car l’espace marque en termes de possibilité, un ordre des choses qui existent en même temps autant qu’elles existent ensemble ; sans entrer dans*

¹⁰⁴ Newton I. (1720) *Optique* cité dans Hamou P. (2014) *Op. cit.* page 56. Koyré A & Cohen IB (1961) expliquent que ce texte diffère de celui écrit dans la première version de l’ouvrage *“Optique”* d’ Isaac Newton (*Annon Spatium Universum, Sensorium est Entis Incorporei, Viventis, et Intelligentis; quod res Ipsas cernat et complectatur intimas, totasq; penitus et in se praesentes perspicat; quarum id quidem, quod in Nobis sentit et cogitat, Imagines tantum in Cerebrum contuetur?*) et qu’il sera à l’origine d’une discussion polémique avec Gottfried Wilhelm Leibniz. Ce dernier n’avait apparemment pas eu accès à la modification ultérieure qui sera faite plus tard, le texte ayant été remplacé par ceci: *“Annon Sensorium Animalium, est locus cui Substantia sentiens et in quem sensibiles rerum species per nervos & cerebrum deferuntur, ut ibi praesentes a praesente sentiri possint? Atq; his quidem rite expeditis, Annon ex phaenomenis constat, esse Entem Incorporeum, Viventem, Intelligentem, Omnipraesentem, qui in Spatio infinito, tanquam Sensorio suo, res res Ipsas intime cernat, penitusq; perspicat, totasq; intra se praesens praesentes complectatur; quarum quidem rerum Id quod in nobis sentit & cogitat, Imagines tantum ad se per Organa Sensuum delatas, in Sensoriolo suo percipit & contuetur?”*.

¹⁰⁵ extrait d’une lettre de Leibniz à la princesse de Galles Caroline trouvé dans Belkind O. (2013) *Op. cit.*

leur manière d'exister. Et lorsqu'on voit plusieurs choses ensemble, on s'aperçoit de cet ordre des choses entre elles"¹⁰⁶. La querelle entre Newton et Leibniz ne repose pas non plus sur cette autre distinction car le savant anglais avait exposé une conception voisine plusieurs années auparavant, notamment dans la troisième édition des *Principia*: "il y a des parties successives dans la durée et des parties co-existantes dans l'espace ; il n'y a rien de semblable dans ce qui constitue la personne de l'homme ou dans son principe pensant ; et bien moins y en aura-t-il dans la substance pensante de Dieu. Tout homme, en tant qu'il est un être sentant, est un seul et même homme pendant toute sa vie et dans tous les divers organes de ses sens."¹⁰⁷. Le philosophe Alain Séguy-Duclot nous explique que le désaccord majeur entre les deux grands savants du XVII^{ème} siècle résidait dans une conception ontologique de l'espace et du temps pour Isaac Newton tandis que Gottfried Leibniz rejetait leur caractère ontologique. A la suite de ce conflit, Emmanuel Kant va proposer une solution qui est "dans la continuité de la thèse cartésienne qui fait du sujet, et non de Dieu, le principe premier de la connaissance"¹⁰⁸.

1.2. La thèse kantienne

Avec Emmanuel Kant (1724-1804), les références théologiques vont disparaître et sans laisser planer la moindre ambiguïté, l'espace et le temps vont perdre le statut ontologique que Francesco Patrizi, Thomas More, Isaac Newton et d'autres leur attribuaient. Ils vont devenir *sensorium hominis*¹⁰⁹. Tous les deux relèvent de "notre attirail mental, des moyens qui nous servent à appréhender le monde"¹¹⁰ et vont rendre possibles ces jugements synthétiques a priori que l'on découvre en géométrie et en arithmétique. Alors qu'ils étaient définis par Isaac Newton comme les cadres du monde "extérieur" rendant possible les mouvements, l'espace et le temps vont relever de la sensibilité: "l'espace n'est pas autre chose que la forme de tous les phénomènes extérieurs sous laquelle seule des objets des sens peuvent nous être

¹⁰⁶ Lettres entre Leibniz et Clarke (1745) *Op. cit.* 4^{ème} paragraphe du 3^{ème} écrit de M. Leibniz, page 424

¹⁰⁷ Newton I. (1726) Scholium Generale (*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, 3^{ème} édition) cité par Hamou P (2014) *Op. cit.* page 71

¹⁰⁸ Séguy-Duclot A. (2019) *Généalogie des mathématiques*. Paris: Spartacus, page 79

¹⁰⁹ Bayer R. (1954) *Epistémologie et logique depuis Kant jusqu'à nos jours*. Paris: Presses universitaires de France

¹¹⁰ Popper K.R. (1985) *Conjectures et réfutations*. Paris: Payot, page 270

donnés"¹¹¹. Dès sa Dissertation de 1770, le philosophe de Königsberg critiquait sévèrement, sans fournir trop d'explication¹¹², la conception newtonienne de l'espace comme réceptacle absolu de toutes les choses possibles, la qualifiant de "*vaine chimère de la raison*" appartenant "*au monde de la fable*". Pour lui, l'espace "*n'est pas quelque chose d'objectif et de réel; il n'est ni substance, ni accident, ni relation*"¹¹³. Dans la Critique de la raison pure, il expose une théorie de la connaissance qui dépasse les thèses empiristes dans la mesure où selon lui, le savoir ne s'acquiert pas uniquement sur la base de l'expérience. Quelque chose l'accueille et la rend possible, des intuitions qu'il qualifie de pures, deux formes de la sensibilité qui précèdent la réelle apparition des objets: l'espace et le temps. Ils sont ce qu'il reste "*si des intuitions empiriques des corps et de leurs modifications (mouvement) on élimine tout l'élément empirique, c'est-à-dire ce qui appartient à la sensation*"¹¹⁴.

Quelque chose vient en plus s'ajouter aux impressions que les objets créent sur nos sens : les concepts. "*Bien que toute notre connaissance commence avec l'expérience, elle ne résulte pas pour autant toute de l'expérience*"¹¹⁵. Sans eux, les intuitions sont aveugles. Interviennent donc des cadres constitutifs du sujet qui lui permettent d'appréhender les phénomènes tout en produisant *a priori*, c'est-à-dire sans recours à l'observation, des énoncés qui soient exacts. C'est ainsi qu'Emmanuel Kant explique la découverte des énoncés de la géométrie euclidienne ou de la mécanique newtonienne. Ils ne sont pas le résultat d'une accumulation de données sensibles mais le fruit d'une synthèse. La réalité du monde "extérieur" n'est pas du tout niée chez Kant. En fait, dans les interrogations qu'elle adresse à

¹¹¹ Kant E. (1783/1967) *Op.cit.* page 50

¹¹² Federigo Enriques explique bien pourquoi cette notion n'a pas de sens. Imaginons une sphère capable de constamment gonfler. Nous pourrions penser que lorsqu'elle sera devenue infinie, qu'elle aura rempli l'intégralité de l'espace. Or "*la notion de sphère impliquant un certain mode de distinguer les sensations qui se rapportent à l'intérieur de celles qui se rapportent à l'extérieur, une sphère infinie, à laquelle ne correspond aucune distinction de ce genre, n'a plus de signification réelle. L'espace ainsi défini [comme sphère infiniment grande] est un mot vide de sens*" : Enriques F. (1914) Les concepts fondamentaux de la Science. Paris : Flammarion, page 8

¹¹³ Kant E. (1770, 1980) De la forme et des principes du monde sensible et du monde intelligible (Dissertation de 1770). Œuvres philosophiques tome 1, Bibliothèque de la Pléiade, page 654

¹¹⁴ *Ibid.* page 45

¹¹⁵ Kant E. (1781/1787, 1980) Critique de la raison pure. Œuvres philosophiques. Bibliothèque de la Pléiade, Gallimard, B1 page 757

la nature, la raison projetterait des sortes de filets sur lesquels les sensations viendraient s'accrocher. Sans eux, la raison ne pourrait rien apprendre de la nature. Ces filets sont "*un réseau de cases ou un système de classement destinés au traitement des observations*"¹¹⁶. Nécessaires et *a priori*, l'espace et le temps relèvent de l'intuition, c'est-à-dire "*le mode par lequel [une connaissance] se rapporte immédiatement aux objets*"¹¹⁷. L'esprit joue un rôle actif dans la connaissance du monde et la découverte de ses lois. Nous ne sommes pas des observateurs passifs. Les lois de la Nature ne viennent pas s'imprimer dans notre esprit pendant que nous la contemplons. A partir de la thèse kantienne, Karl Popper dira que "*le cosmos qui nous entoure porte la marque de l'esprit humain*"¹¹⁸. Lors de l'assimilation des signaux que nous transmettent les sens, "*nous imprimons ... de manière active [sur eux] l'ordre et les lois émanant de notre entendement*"¹¹⁹. Les hommes sont des explorateurs et "*la découverte est une création*"¹²⁰. Notre entendement impose sur les phénomènes des règles et celles-ci, comme l'explique le philosophe Jacques Bouveresse, "*n'enregistrent pas simplement la présence d'un ordre et d'une régularité que nous avons pu constater dans l'expérience, ce sont elles qui imposent aux phénomènes l'ordre et la régularité avec lesquels nous les voyons se présenter*"¹²¹. Autrement dit, "*les lois n'existent pas plus dans les phénomènes - mais relativement seulement au sujet, auquel les phénomènes sont inhérents, en tant qu'il est doué d'entendement - que les phénomènes n'existent en soi, mais relativement seulement au même être, en tant qu'il est doué de sens*"¹²².

Au sujet de l'espace, Isaac Newton déclarait que "*bien que peut-être nous puissions imaginer qu'il n'y ait rien dans l'espace, nous ne pouvons cependant pas penser que l'espace n'existe pas*"¹²³. Pareillement, Emmanuel Kant considérait l'espace nécessaire, qu' "*on ne peut jamais se représenter qu'il n'y ait point d'espace, quoiqu'on puisse bien penser qu'il ne s'y*

¹¹⁶ Popper K.R. (1985) *Op.cit.* page 229

¹¹⁷ Kant E. (1781/1787, 1980) *Op.cit.* A19/B33, page 781

¹¹⁸ Popper K.R. (1985) *Op.cit.* page 272

¹¹⁹ *Ibid.*

¹²⁰ *Ibid.* page 273

¹²¹ Bouveresse J. (1991) Le problème de l'a priori et la conception évolutionniste des lois de la pensée. *Revue de théologie et de philosophie* 123: 353-368

¹²² Kant E. (1781/1787, 1980) *Op.cit.* B164, page 875

¹²³ Newton I. (1985) De la gravitation. *Les Belles Lettres* page 46. Il ajoute aussi "*de même nous ne pouvons pas penser que la durée n'existe pas même s'il était possible de concevoir que absolument rien ne dure*"

*trouve pas d'objets*¹²⁴, non pas parce qu'il est le réceptacle absolu et extérieur à nous dans lequel les phénomènes se réalisent et dont les impressions sur nos sens nous rendraient les témoins. Il est constitutif de notre esprit, *"subjectif et idéal, et provient, par une loi fixe, de la nature de l'esprit, à la manière d'un schéma destiné à coordonner dans leur ensemble toutes les données du sens externe"*¹²⁵. Une distinction fondamentale est donc faite entre le monde tel qu'il est, indépendamment de notre perception, et le monde tel qu'il nous paraît, le monde de la perception. *"Les choses que nous intuitionnons ne sont pas en elles-mêmes telles que nous les intuitionnons, ... leur rapports ne sont pas non plus constitués en eux-mêmes comme ils nous apparaissent"*¹²⁶. Si nous ôtons de la perception ce qui relève de la constitution des sens, *"tous les rapports des objets dans l'espace et dans le temps, l'espace et le temps eux-mêmes disparaîtraient, et ne peuvent en tant que phénomènes, exister qu'en nous, et non en soi"*¹²⁷. La thèse kantienne met le sujet au centre du processus de connaissance: *"nous ne connaissons rien de ces objets que la manière dont nous les percevons, manière qui nous est propre, et peut fort bien n'être pas nécessaire pour tous les êtres, bien qu'elle le soit pour tout homme"*¹²⁸. L'espace ne s'acquiert pas par le truchement de quelques expériences, c'est *"une représentation nécessaire, a priori, qui sert de fondement à toutes les intuitions externes"*¹²⁹. Il n'est pas une détermination des phénomènes, il est leur condition de possibilité. Pour pouvoir déclarer que des choses soient en dehors de nous, placées à différents endroits les unes à côté des autres, il faut que la notion d'espace soit préalablement posée. Nous ne pouvons concevoir une chose hors de nous sans nous la *"représenter comme située dans un lieu distinct de celui que [nous occupons nous-même]"* et nous ne pouvons pas nous *"représenter les choses comme extérieures les unes aux autres, si [nous] ne les [plaçons] pas en différents lieux de l'espace. La possibilité des perceptions externes comme telles suppose donc le concept d'espace, elle ne le crée pas"*¹³⁰.

¹²⁴ Kant E. (1781/1787, 1980) *Op. cit.* A24/B39 page 785

¹²⁵ Kant E. (1770) *Op. cit.*, page 654

¹²⁶ Kant E. (1781/1787, 1980) *Op. cit.* A42/B59 page 801

¹²⁷ *Ibid.*

¹²⁸ *Ibid.*

¹²⁹ *Ibid.*, A24 page 785

¹³⁰ Kant E. (1770) *Op. cit.*, page 652

Emmanuel Kant a eu l'intelligence de ne pas défendre sa conception sans exposer certaines des conséquences qui résulteraient d'une conception autre que la sienne, comme notamment une conception empirique de l'espace. Une première conséquence qu'il tire est la possibilité de géométries dont les axiomes ne seraient plus universels comme ceux de la géométrie euclidienne. Il explique en effet que *"si toutes les modalités de l'espace étaient empruntées, par la seule expérience, aux relations extérieures"*, alors *"les axiomes de la géométrie n'auraient plus qu'une universalité comparative, semblable à celle qu'on obtient par induction, universalité dont le champ ne dépasserait pas celui des observations"*¹³¹. Il ajoute aussi qu'une conception alternative rendrait possible une géométrie de laquelle serait exclu le sixième postulat d'Euclide, à savoir qu'un espace ne peut être enclos par deux droites. Il écrit en effet que *"l'on pourrait espérer, comme il arrive dans le domaine empirique, découvrir un jour un espace doué de modalités primitives différentes, et peut-être même une étendue que deux lignes droites suffiraient à délimiter"*¹³². Sur la sphère terrestre, deux méridiens délimitent en effet le continent américain. La découverte de nouvelles géométries viendra réfuter l'universalité qu'Emmanuel Kant accordait à la géométrie euclidienne tout en confirmant le mode projectif du processus de connaissance. Une dernière conséquence qu'il tire est que notre connaissance de la nature ne reposerait plus que sur des conventions, une thèse qui sera développée par le mathématicien français Henri Poincaré: *"elle n'aurait alors d'autre nécessité que celle qui garantit la stabilité des lois de la nature, d'autre précision que celle qui résulte des conventions"*¹³³. La puissance de la thèse kantienne de l'espace vient de ce qu'elle ne se limite pas aux règles qui régissent la façon par laquelle l'esprit humain appréhende les sensations. Parce qu'il n'aura jamais accès à ce monde autrement que par des règles qu'il impose, il en résulte que *"les lois de la connaissance sensible seront les lois de la nature en tant qu'elle peut tomber sous les sens. Voilà pourquoi la nature est rigoureusement soumise aux principes de la géométrie: en cette science, toutes les modalités de l'espace sont démontrées selon une hypothèse qui n'est pas arbitrairement forgée, mais intuitivement*

¹³¹ *Ibid.*, page 655

¹³² *Ibid.*, page 655.

¹³³ *Ibid.*

donnée, comme la condition subjective de tous les phénomènes, par lesquels la nature puisse jamais être révélée aux sens"¹³⁴.

Dans la Dissertation de 1770, Emmanuel Kant envisageait que l'espace et le temps soient "*deux concepts ... sans doute acquis, non point ... abstraits des objets de sens ... mais ... abstraits de l'action même par laquelle l'esprit coordonne, selon des lois permanentes, ses sensations*"¹³⁵. Dans le même temps, il nous invitait à ne pas croire que l'espace et le temps soient innés. En effet, cette hypothèse nous dit-il "*fraie le chemin à une philosophie paresseuse, proclamant l'inutilité de toute recherche ultérieure, et se contentant de faire appel à une cause première: il faut se garder de l'admettre à la légère*"¹³⁶. Après Emmanuel Kant, plusieurs penseurs, philosophes logiciens ou expérimentalistes vont s'interroger sur ce caractère *a priori* et nécessaire de l'espace et défendre l'hypothèse innéiste. D'autres savants vont tenter de la réfuter en développant une position empiriste qui explique de quelle expérience l'espace pourrait être le produit. Nous allons voir que les solutions imaginées sont multiples.

1.3. Les thèses post-kantiennes

A partir de la thèse kantienne, un champ de réflexion va s'ouvrir dans le domaine des sciences physiologiques pour apporter un fondement naturel à cette forme de l'intuition qu'est l'espace¹³⁷. Avec l'étude des fonctions visuelles et somesthésiques, certains néo-kantiens vont tenter de comprendre la notion d'étendue. Hermann von Helmholtz, élève de Johannes Müller, nous signale que la plupart des physiologistes allemands soutenaient la thèse kantienne¹³⁸, probablement en raison de l'admiration que suscitaient l'ampleur et la profondeur des réflexions du philosophe de Königsberg. Le physiologiste allemand Johannes Müller affirmait que "*l'idée d'espace ne peut pas être un produit d'éducation ; au contraire, la notion de l'espace et du temps sont nécessaires, et toutes les sensations se soumettent nécessairement à ces notions : aucune sensation ne peut exister en dehors de la notion*

¹³⁴ *Ibid.*, page 656.

¹³⁵ *Ibid.*

¹³⁶ *Ibid.*, page 658.

¹³⁷ Pecere P. (2021) *Op. cit.*

¹³⁸ *Ibid.*, page 1011.

d'espace et de temps"¹³⁹. Pour lui, "*dans chaque champ visuel, la rétine voit sa propre étendue à l'état d'affection; lorsque nous gardons le repos le plus absolu et que les yeux sont fermés, elle se perçoit à l'état obscur dans l'espace*"¹⁴⁰. Si la localisation de l'origine des sensations dans le champ visuel était conçue comme une disposition innée, la perception de la profondeur était en revanche une connaissance qui était acquise par l'exercice et l'expérience. "*La faculté de saisir des formes simples n'est pas le résultat de l'éducation ; mais celle de juger des différentes dimensions du corps d'après les images exige de l'exercice, parce que toutes les intuitions visuelles ne sont originairement que des surfaces et que, pour procurer la représentation d'un corps, le jugement doit ajouter les différentes faces qu'on aperçoit à ce corps, quand on lui donne une autre situation. Il en résulte pour nous la représentation de la profondeur du champ visuel, qui n'est qu'une idée et non une sensation*"¹⁴¹. Une thèse nativiste de la sensation sera défendue par Ewald Hering, pour qui des sentiments d'espace sont attribués aux différents points de la rétine. Chaque point serait selon lui caractérisé par une valeur de largeur et de hauteur qui croît avec son éloignement du champ visuel central. Les valeurs seraient contraires pour les points situés symétriquement par rapport à la fovéa¹⁴². Quant au sentiment de profondeur, il serait donc inné et aurait "*des valeurs égales, mais de signe contraire, pour les points rétinien identiques ; des valeurs égales et de même signe pour les points symétriques. Le sentiment de profondeur des deux moitiés externes des rétines est positif : il répond à une profondeur plus grande. Celui des moitiés internes est négatif ; il répond à une profondeur moindre*"¹⁴³. La thèse d'Ewald Hering continue d'inspirer les travaux

¹³⁹ Müller J. (1826) *Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns*. Cité par Helmholtz H. von (1865) *Optique physiologique. Des perceptions visuelles*. Tome 3. Paris: L'Harmattan, page 1010.

¹⁴⁰ *Ibid.*, page 1011.

¹⁴¹ Ribot T. (1879) *La psychologie allemande contemporaine*. Paris: Baillière. page 128.

¹⁴² La fovéa est la zone de la rétine qui jadis, fut appelée tâche jaune en raison de son apparence lorsqu'on inspecte le fond de l'œil. Elle est caractérisée par une plus grande densité de cellules photoréceptrices appelées photorécepteurs à cône. Les voies nerveuses dont elle est l'origine définissent le champ visuel central, celui pour lequel nous sommes dotés de la plus grande acuité visuelle et que nous mobilisons lorsque nous inspectons les détails d'une scène.

¹⁴³ Ribot T. (1879) *Op. cit.*, page 133.

neurophysiologiques contemporains menés pour rendre compte des signaux qui contrôlent les mouvements oculaires de convergence et de divergence¹⁴⁴.

1.3.1. La théorie des idées motrices de Johann Steinbuch

Dans un ouvrage qui mériterait d'être traduit et étudié plus en profondeur, Johann Georg Steinbuch (1770-1818) va proposer l'hypothèse que l'espace dérive d'expériences intérieures¹⁴⁵. Il soutient en effet que l'espace est une forme de l'intuition qui est acquise par la production de mouvements. On trouvera un exposé de sa thèse empiriste dans un chapitre rédigé par l'historien des sciences Gary Hatfield¹⁴⁶. Pour Johann Steinbuch, les sensations ne seraient absolument pas spatiales à l'origine; c'est le mouvement qui contribuerait à la formation d'un espace interne. Johann Steinbuch n'accordait d'ailleurs de représentation interne bidimensionnelle ni à la rétine ni à la peau. Il rejetait en particulier l'idée que la spatialité des sensations puisse être déterminée par la topologie des cellules et des fibres qui les véhiculent dans le cerveau: "*la différence entre l'activation physiquement spatialisée dans le cerveau et les représentations spatiales de l'esprit est aussi large que la différence entre l'activité cérébrale et les idées en général*"¹⁴⁷. Une activité distribuée de manière topographique dans le cerveau ne suffit pas à expliquer une représentation spatiale dans l'esprit. Johann Steinbuch proposait que le développement d'une représentation spatiale commence avec les mouvements du fœtus, dans l'utérus maternel. Selon lui, des idées motrices (ou idées¹⁴⁸ de mouvement; traduction de "*Bewegideen*") accompagneraient chaque mouvement, représentant à la fois l'état d'activation musculaire et l'acte de volonté qui en est la cause. Les idées motrices ne revêtent aucun caractère spatial; elles signalent seulement que "ça" bouge. Elles diffèreraient selon le degré de contraction du muscle et selon les muscles

¹⁴⁴ Mays L. (1998) Has Hering been hooked? *Nature Medicine* 4: 889-890; Quinet J, Schultz K, May P.J. & Gamlin P.D. (2020). Neural control of rapid binocular eye movements: Saccade-vergence burst neurons. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117: 29123-29132.

¹⁴⁵ Steinbuch J. (1811) *Beiträge zur Physiologie der Sinne*. Nürnberg: Johann Leonard Schragg

¹⁴⁶ Hatfield G. (1990) *The natural and the normative. Theories of spatial perception from Kant to Helmholtz*. Cambridge: MIT Press, pages 131-143.

¹⁴⁷ *Ibid.* citation de Steinbuch par Hatfield G. (1990) *Ibid.*: "*the difference between the physical-spatial action of the brain and the spatial representations in the mind is just as large as the difference between brain activity and ideas in general*".

¹⁴⁸ Il est important de noter que Steinbuch a recours à la notion d'idée plutôt qu'à celle de sensation.

qui sont mis en jeu. A partir de ces idées motrices, qualitativement distinctes, non spatiales mais corrélées avec des configurations musculaires et posturales spécifiques, Steinbuch propose une explication psychologique de la représentation spatiale : *"le simple fait que parallèlement au mouvement externe des organes des sens il y ait des idées internes de la volonté est le principe sur lequel notre intuition sensorielle repose et sur la base duquel notre espace subjectif (l'espace de notre intuition) s'érige au cours du développement"*¹⁴⁹. Sur la base de ces idées motrices, des représentations spatiales seraient élaborées conformément à deux lois d'association: la loi de similarité et la loi de simultanéité. La première permettrait de créer l'idée d'extension (longueur) tandis que la seconde contribuerait au développement de représentations multidimensionnelles. Les idées simples simultanées fusionneraient pour former une idée complexe, c'est-à-dire une idée dont la qualité diffère de celle de ses parties: *"Si deux, trois ou plusieurs idées simples viennent simultanément à la conscience, elles s'associent les unes avec les autres, selon cette loi [d'association], de telle sorte toutes apparaissent ensemble comme une seule idée"*¹⁵⁰.

La perception des rapports de contiguïté ou de position entre les différentes régions du champ visuel, et donc de la rétine, viendrait de ce que les sensations correspondantes soient associées à une structure bidimensionnelle (appelée espace visuel interne) que le fœtus aurait préalablement élaboré *in utero* à l'occasion de ses mouvements oculaires spontanés: *"tous les points de la rétine sont en rapport avec certains degrés de contraction des muscles de l'œil ; de là résulte que, par l'effet de l'éducation, la sensation lumineuse de points particuliers de la rétine soit liée tacitement à la conscience des degrés de contraction correspondant à ces points"*¹⁵¹. Cette structure bidimensionnelle interne¹⁵² serait déterminée

¹⁴⁹ Hatfield G. *Op. cit.*, page 317. Citation de Steinbuch : *"The simple fact that parallel to the outer movement of the sense organs there run inner ideas of will is the principle upon which our sensory intuition is based, and out of which our subjective space (the space of our intuition) arises through successive development"* .

¹⁵⁰ Hatfield G. *Op. cit.*, page 317 : Traduction de *"If two, three, or more simple ideas come to consciousness simultaneously, they become associated with one another, by virtue of this law, in such a way that all of them appear together as but a single idea"* .

¹⁵¹ Ribot T. (1879) *Op. cit.*, page 137.

¹⁵² Gary Hatfield parle d'un "hémisphère bi-dimensionnel interne" page 136. Nous ne savons pas si Steinbuch a recours à cette notion qui suppose une surface à courbure constante décrite par deux axes de rotation. Nous n'y aurons pas recours ici car les rotations de l'œil ne se font

par quatre ensembles de contractions de ces muscles qui sont attachés aux globes oculaires et qui en permettent les rotations : les rotations vers la droite, vers la gauche, vers le haut et vers le bas. On sait aujourd'hui qu'une organisation neuronale se cache derrière le fait que la contraction (ou raccourcissement) d'un muscle (que nous appellerons agoniste) soit associée au relâchement (ou allongement) du muscle antagoniste (pour les déplacements horizontaux) ou des muscles antagonistes (pour les déplacements verticaux), pendant que la contraction des muscles responsables des déplacements "orthogonaux" ne change pas¹⁵³. Avec la loi de similarité, des degrés croissants de contraction de chacun des muscles constitueraient les idées motrices correspondant à chacune des quatre directions cardinales (gauche, droite, haut et bas)¹⁵⁴. La conjonction de ces idées motrices élémentaires serait à l'origine d'une idée motrice plus complexe "bidimensionnelle", propre à chaque œil. C'est ainsi que le nouveau-né construirait l'intuition d'une surface étendue en plus des sensations de lumière et de couleur. Ces dernières ne présenteraient aucune organisation topologique à la naissance parce qu'elles ont une origine nerveuse différente¹⁵⁵. La simultanéité de cette intuition et de l'idée motrice et leur association seraient à l'origine de la spatialisation des sensations visuelles. Là encore, cette association ne serait pas innée et donnée *a priori*. *"Le fait que la connexion de points individuels de la rétine avec des points correspondants de l'espace visuel interne ne peut pas être donnée a priori résulte clairement du fait que l'espace visuel interne est lui-même acquis. C'est pourquoi cette connexion doit nécessairement être aussi acquise ... La période de formation de cette connexion de la surface rétinienne avec l'espace visuel interne commence donc après la naissance de l'individu"*¹⁵⁶.

Différentes zones de la surface rétinienne deviendraient différents lieux de l'espace visuel interne par la loi de simultanéité car celle-ci conjuguerait les signaux engendrés par

pas autour d'axes fixes. Il est par conséquent possible que la courbure de la voûte imaginaire ne soit pas constante.

¹⁵³ Goffart L., Quinet J. & Bourrelly C. (soumis) Neurophysiology of gaze orientation: Core neuronal networks. In: J. Grafman (Ed) *Encyclopedia of the Human Brain*. Elsevier.

¹⁵⁴ La situation est un peu plus compliquée pour les directions haut et bas car elles mettent en œuvre la contraction non pas d'un seul muscle mais de deux muscles, laquelle est conjuguée avec le relâchement de deux autres muscles antagonistes et le maintien du niveau de contraction des muscles responsables de mouvements horizontaux.

¹⁵⁵ L'origine se trouve le feuillet de cellules photosensibles qui tapisse le fond de la rétine. Les signaux rétiens sont transmis dans le cerveau par les deux nerfs optiques.

¹⁵⁶ Hatfield G. *Op. cit.*, page 318.

l'excitation de la rétine avec les contractions musculaires extra-oculaires. Le foyer d'activité sur la rétine suscitée par la présence d'une source lumineuse ponctuelle peut en effet correspondre à ce que nous considérons comme un lieu dans le monde "extérieur". Il peut être situé à gauche ou à droite de l'objet que nous sommes en train d'examiner, ou alors au-dessus ou en-dessous. Aller regarder cette source lumineuse périphérique consiste à changer l'orientation des globes oculaires, c'est-à-dire à commander, au niveau des muscles extra-oculaires¹⁵⁷, un ensemble de contractions et de relâchements¹⁵⁸ tel que l'image de la source se retrouve alors projetée sur la zone de la rétine appelée fovéa, à la place de l'objet qui fut précédemment regardé. La sensation associée au précédent objet regardé a disparu, laissant pour ainsi dire le champ libre à un autre objet¹⁵⁹. Une même source lumineuse située à droite ou à gauche de l'objet regardé se distingue par les contractions musculaires requises pour orienter la fovéa vers elle. Ce n'est pas la saccade, cette transition extrêmement rapide qui change l'orientation du regard, que Steinbuch considère comme l'événement qui permettrait d'établir cette distinction que nous sommes capables de faire entre différents lieux; c'est l'ensemble des contractions soutenues (toniques) qui sont appliquées au niveau des muscles extra-oculaires au terme des saccades, et qui maintiennent le regard dirigé vers l'objet qui occupe désormais le champ visuel central.

Nous pouvons apprécier la rigueur de Johann Georg Steinbuch par les solutions qu'il propose pour expliquer l'origine de ce que Kant posait *a priori*¹⁶⁰. Il tentait en effet de dériver ces postulats théoriques à partir d'éléments plus simples gouvernés par un minimum de lois également simples. Il soutenait aussi que "*les facultés de l'esprit devaient être expliquées par le développement du corps*"¹⁶¹, et donc que rien n'était préformé. Gary Hatfield nous explique

¹⁵⁷ Chez les animaux vertébrés, ces muscles sont au nombre de six pour chaque œil.

¹⁵⁸ Fort heureusement, nous n'avons pas à réfléchir et à rechercher comment procéder pour produire ce type de commande; le mouvement est produit de manière spontanée grâce au câblage des réseaux neuronaux intercalés entre la rétine et les cellules motrices responsables de la contraction des muscles extra-oculaires.

¹⁵⁹ La persistance de l'activité sensorielle induite par une stimulation extérieure est déterminée par les propriétés d'adaptation du système sensoriel concerné. L'excitation nerveuse produite par une stimulation persiste plus longtemps dans un réseau neuronal à adaptation lente, plus brièvement dans un réseau neuronal qui s'adapte plus rapidement.

¹⁶⁰ Il n'y a ici aucune dévalorisation de la démarche kantienne, dirigée vers d'autres buts. Nous voulons seulement souligner la complémentarité apportée par l'analyse de Steinbuch.

¹⁶¹ Hatfield G. *Op. cit.*, page 133.

que pour Steinbuch "à l'origine, l'esprit n'a seulement que le simple pouvoir de réceptivité – c'est-à-dire, le pouvoir de recevoir des impressions du cerveau. Toutes ses autres capacités et aptitudes doivent être expliquées par l'interaction de ce pouvoir originel avec le corps en développement, une interaction qui stimule l'esprit"¹⁶², une interaction qui se prépare chez le fœtus, *in utero*, dans un milieu différent du milieu post-natal. Nous allons voir que sa théorie empiriste porte en elle les germes qui vont conduire à d'autres conceptions empiristes de l'espace comme la thèse des signes locaux de Rudolf Lotze et la thèse de Hermann von Helmholtz.

1.3.2. La thèse des signes locaux de Rudolf Lotze

Sensible lui aussi au développement des recherches physiologiques, le philosophe logicien Rudolf Hermann Lotze (1817-1881) défendait une thèse également empiriste de l'espace. Contrairement à Johann Steinbuch, il se réfère à la notion d'âme plutôt qu'à celle d'esprit. Son opposition au caractère a priori de l'espace est témoignée par l'affirmation que "on ne saurait [selon lui] imaginer que, avant d'avoir reçu des impressions extérieures, l'âme déploie, comme un filet prêt à prendre tout ce qui y tombera, l'intuition d'un espace infini à trois dimensions toute formée et déjà achevée"¹⁶³. De l'espace, Rudolf Lotze affirme que "nous n'en avons pas d'abord l'intuition vide, pour y disposer ensuite les images de ce qui peut faire impression sur nous"¹⁶⁴. L'espace serait construit en réaction aux sollicitations du monde "extérieur", à partir de la localisation des impressions qu'elles engendrent. "Réagissant selon les lois de notre nature contre les excitations déjà subies, nous commençons par localiser une impression *p* près d'une autre *q*, en imaginant une ligne *mn* qu'on peut appeler élément de l'espace futur, mais non pas une ligne dans l'espace, car cet espace entier dans lequel elle pourrait être tracée n'existe pas encore"¹⁶⁵. La localisation est donc une construction de l'imagination réalisée dans un cadre de représentation où les impressions sont réduites à des points et ces derniers reliés par des segments. "C'est plus tard, en observant ce que nous avons fait ou ce qui s'est fait en nous, que nous nous apercevons de la possibilité de réunir deux de

¹⁶² *Ibid.*

¹⁶³ Lotze H. (1877) Sur la formation de la notion d'espace. *Revue philosophique de la France et de l'Etranger* 4: 345-368, page 364.

¹⁶⁴ *Ibid.*, page 365.

¹⁶⁵ *Ibid.*

ces lignes pq, rs par deux autres pr, qs, et que continuant les observations, nous acquérons la conviction que cette possibilité de lier des points donnés n'a pas de borne. Alors est formée l'intuition de l'espace infini; c'est le résultat de la combinaison des réactions élémentaires innées dans l'âme et lui appartenant, comme on dit, a priori"¹⁶⁶. Si l'espace est pour Lotze une sorte de canevas que l'imagination tisse et dont l'infinitude résulte de son pouvoir de répéter à l'infini des liaisons entre des sensations qu'il réduit à des points.

Il est important de signaler que cette combinaison se fait dans l'âme, un milieu radicalement différent du monde physique "extérieur". Pour Rudolf Lotze, "*l'âme n'est ni un milieu sans résistance, ni un milieu étendu, où [un] ensemble de points [ordonnés et situés dans le monde qui nous entoure] puisse pénétrer et occuper la place qu'il lui faut*"¹⁶⁷. L'âme est une "chose" immatérielle dénuée d'étendue. Dans la vie mentale, les éléments n'auraient donc aucune dimension spatiale. Cette conception est intéressante à noter quand on sait que de nos jours certains auteurs proposent de géométriser le domaine des concepts¹⁶⁸. Dans le passage du monde externe vers l'âme, "*il doit nécessairement arriver un moment où toute relation géométrique se perd sans laisser de traces et fait place à des relations d'un tout autre genre, qui lient entre elles des impressions purement intensives, sans qu'il subsiste aucune indication d'étendue et de position*"¹⁶⁹. La localisation nécessite donc une reconstruction: "*si nous connaissons la vraie position des choses extérieures, ce n'est plus par une sorte de tradition, mais par une véritable reconstruction que nous parvenons à cette connaissance*"¹⁷⁰. Les relations spatiales seraient reconstruites à partir des impressions intensives suscitées par les événements du monde "extérieur". L'âme construirait l'idée d'une étendue dans laquelle des positions distinctes se trouveraient attribuées aux images des différents objets. La question qui se pose est en effet de savoir "*comment l'âme parvient à la conscience du fait qu'en ce moment les trois points du système nerveux central qui sont stimulés se trouvent au*

¹⁶⁶ *Ibid.*

¹⁶⁷ *Ibid.*, page 346.

¹⁶⁸ Gardenfors P. (2004) *Conceptual spaces: The geometry of thought*. MIT press; Gardenfors P (2014). *The geometry of meaning: Semantics based on conceptual spaces*. Cambridge: MIT press.

¹⁶⁹ *Ibid.*

¹⁷⁰ *Ibid.*

*coin d'un triangle or sur une ligne droite?*¹⁷¹ L'activité qui se propage dans les différents canaux neuronaux pourrait rendre compte de la stimulation de trois points mais elle n'explique pas comment la forme triangulaire apparaît.

Pour mieux décrire cette perte de spatialité des sensations au niveau de l'âme, Rudolf Lotze prendra l'analogie d'une lentille " *qui condenserait en un seul point indivisible tous les rayons réfléchis par une surface colorée ; en ce point, il n'y aurait plus à distinguer la position relative des rayons qui s'y trouveraient concentrés et n'y formeraient qu'une clarté unique ; mais, au-delà de ce point, les rayons reprendraient leur divergence et dessineraient sur un plan opposé la copie fidèle de la surface donnée*"¹⁷². Dans cette analogie, les rayons correspondent aux influx nerveux causés par différentes régions ordonnées et situées dans le monde "extérieur" tandis que le point de concentration correspond à l'unité de la conscience. Lotze précise que "seule la reconstruction dans l'âme des relations d'espace d'abord anéanties diffère sensiblement de la divergence des rayons qui n'est que la simple continuation d'un mouvement antérieur"¹⁷³.

Pour expliquer le processus de localisation, Rudolf Lotze introduit la notion de signe local. La peau et la rétine sont des surfaces qui, en plus de sensations intensives, sont à l'origine de sensations extensives. Nous trouverons une explication de cette distinction dans un article rédigé par Théodule-Armand Ribot (1839-1916) et consacré à la théorie lotzienne. Le psychologue français explique en effet qu'entre la sensation d'un seul son et celle de plusieurs sons identiques présentés simultanément, il n'y a qu'une différence d'intensité. Les sons se fondent ensemble pour augmenter l'intensité de la sensation. De même, entre l'odeur ou la saveur produite par une molécule et celles produites par des milliers de semblables, "il n'y a de différence que du moins au plus. Tel est le cas de toutes les sensations intensives"¹⁷⁴. Avec les sensations visuelles et cutanées, une autre qualité apparaît: l'extensivité. Quand plusieurs points de la peau ou de la rétine sont stimulés de manière simultanée, il ne se produirait pas une fusion des sensations en une sensation plus intense. Les sensations se

¹⁷¹ Lotze H. (1879) *System der Philosophie*. Zweiter Theil : Drei Bücher der Metaphysik. Leipzig, Hirzel. Citation de Rollinger R.D. (2001). Lotze on the sensory representation of space. In : L. Albertuzzi (Ed). *The dawn of cognitive science. Early european contributors*, Kluwer Academic Publishers pp 103-122, page 106.

¹⁷² *Ibid.*, page 347.

¹⁷³ *Ibid.*

¹⁷⁴ Ribot T (1879) *Op. cit.*, page 83.

combinent les unes aux autres pour former un ensemble où chacune garde son individualité. La sensation globale n'est pas ressentie plus forte mais autrement. De cette nouvelle sensation, nous disons qu'elle est plus étendue. Rudolf Lotze appelle signe local cette individualité qui est maintenue. Ainsi, sur l'une ou l'autre de ces deux surfaces sensibles que sont la peau ou la rétine, un point **A** subissant une excitation quelconque (d'intensité légère ou forte, de couleur rouge ou jaune) ajouterait aux sensations résultantes un signe local **a** qui serait toujours le même, quelle que soit la qualité de la sensation provoquée par l'excitation. De même, d'autres points **B** et **C** ajouteraient leur signe local **b** et **c** à toutes les sensations produites par les excitations qui y seraient appliquées. Les mêmes sensations provoquées par l'excitation simultanée des points **A, B et C** recevraient les signes locaux de chacun de ces points, **abc**. C'est ainsi que l'intuition de l'espace serait la "*forme donnée sous laquelle nous apercevons les relations de certaines multitudes de sensations simultanées*"¹⁷⁵. Les connaissances contemporaines sont tout à fait compatibles avec cette conception. Nous pouvons même ajouter qu'à la répartition topographiquement distribuée des récepteurs sensoriels sur la surface de la peau ou de la rétine s'ajoute aussi la persistance plus ou moins longue de leur réponse. Ensemble les différents motifs de simultanéité et les interactions peuvent ainsi engendrer un complexe des sensations tout à fait singulier, distinct des sensations suscitées par chacune des stimulations locales, un peu comme le barycentre des trois points du triangle vis-à-vis du barycentre de trois points alignés. On ne comprend pas pourquoi Rudolf Lotze réserve cette complexité aux sensations tactiles ou rétinienne car différentes ondes sonores peuvent créer un accord musical de même que différents mélanges d'épices produisent différents saveurs. En tout cas, on retrouve dans la conception lotzienne de l'espace cet ordre de co-existence que nous avons vu chez Isaac Newton et Wilhelm Leibniz: "*il n'y a pas de localisation possible si l'organe, ne recevant qu'une seule impression dans le même moment, doit entièrement perdre la première pour recevoir la seconde*"¹⁷⁶. La différence avec les savants du 17ème siècle est que Lotze décrit non pas l'espace "extérieur" mais sa perception.

Rudolf Lotze envisage deux systèmes possibles. Le premier fait intervenir un système de sensations musculaires tandis que le second est "*un système de mouvements qui seraient*

¹⁷⁵ Lotze H. *Op. cit.*, page 353.

¹⁷⁶ Lotze H. *Op. cit.*, page 363.

*produits, soit par l'entrée de l'excitation, soit au moins par une tendance se développant dans ce sens ... En effet, chaque portion [de l'organe] aurait le pouvoir d'éveiller une tendance au mouvement, non seulement déterminée en grandeur, mais encore déterminée en direction par rapport aux trois coordonnées de l'espace*¹⁷⁷. En d'autres termes, les signes locaux pourraient avoir une origine motrice centrale, non musculaire, c'est-à-dire reposer sur la mobilisation de ces régions cérébrales dont l'excitation est capable de provoquer un mouvement. La tendance au mouvement qui est éveillée présente une certaine similitude avec l'idée de mouvement proposée par Johannes Steinbuch. Lotze ne précise pas si les mouvements sollicités correspondent à des mouvements d'orientation ou des mouvements d'évitement dont la neurophysiologie contemporaine a montré qu'ils mobilisent des réseaux neuronaux distincts. En tout cas, cette *"localisation dans l'espace appartient ... à ce que l'âme exécute d'une manière inconsciente par le fait de la mécanique de ses états intérieurs"*. Cette précision d'une exécution inconsciente que fait Lotze est intéressante à noter car elle nous indique que sa théorie ne se base pas sur une introspection mais sur une "mécanique" intérieure au sujet. *"Ce n'est ni aux mouvements réels ni à leurs sensations conscientes que nous rapportons la coordination des points dans le champ visuel ... La première localisation, totalement inconsciente, repose sur la connexion entre les nerfs sensitifs et les nerfs moteurs, et c'est l'excitation de ces derniers à leur extrémité centrale qui donne à chaque impression de couleur son signe local propre"*¹⁷⁸. Nous avons ici, semble-t-il les germes de ce qui deviendra plus tard la théorie de la copie d'efférence. Les signes locaux ne proviendraient donc ni des mouvements oculaires ni de la constitution histologique de la rétine. Une stimulation ponctuelle entraînerait une tendance au mouvement à l'origine d'un état psychique: le signe local. Répété un grand nombre de fois, il résulterait de cet enchaînement excitation-mouvement-impression psychique une mémoire de la topologie de la rétine et de ses différents lieux qui permettrait la localisation de l'excitation, même lorsque l'œil est au repos. Aussi est-il important de comprendre que cette connaissance ne présente, selon Lotze, aucune commune mesure avec la façon dont nous avons l'habitude de géométriser l'espace. *"Ce qui se passe dans les nerfs ne peut donner lieu qu'à une rotation de l'œil, c'est-à-dire à un*

¹⁷⁷ Lotze H. (1852) Medizinische Psychologie, tome 2, n° 292 ; cité par Ribot Th. *Op. cit.*, page 86.

¹⁷⁸ *Ibid.*, page 92.

*phénomène du monde physique ; les affections psychiques qui en proviennent méritent seules le nom de signes locaux, car elles seules peuvent provoquer la localisation qui est un acte d'imagination sans aucun rapport de ressemblance avec un mouvement quelconque et n'est en aucune manière mesurable d'après les notions de la mécanique des corps*¹⁷⁹. Ce passage est important car il souligne l'applicabilité des notions de la science mécanique à la description des phénomènes de la vie mentale, idée que nous retrouverons avec le mathématicien Andras Pellionisz et le neurobiologiste Rodolfo Llinas.

Dans un ouvrage consacré à Hermann von Helmholtz, Michel Meulders offre une interprétation de la thèse lotzienne qui nous semble discutable dans la mesure où il introduit une notion que nous n'avons pas été en mesure de retrouver dans les écrits de Rudolf Lotze, à savoir celle de calcul. Selon le neurophysiologiste belge, *"l'âme aurait une intuition générale de l'espace qui la rendrait non seulement capable, mais l'obligerait à appliquer cette notion au contenu des sensations. Elle l'effectuerait en calculant la distance entre points lumineux situés dans le champ visuel, grâce à l'amplitude du déplacement du regard qui les fixe successivement. Ce que Lotze appelle "signe local" est la marque spéciale qui différencie chaque impression intensive d'une autre, et qui permet d'en situer l'origine dans l'espace grâce à un mouvement oculaire quantifiable toujours identique, qu'il soit réel, ou même virtuel par la seule intention de faire le mouvement*¹⁸⁰. Cette proposition ne nous semble pas correspondre à la conception de Rudolf Lotze puisque celui-ci prenait soin de préciser que la localisation est un acte psychique qui n'est ni mesurable ni géométrique: *"les signes locaux constituent toujours un système sériel en soi tout à fait non spatial ... arithmétique-qualitatif"*¹⁸¹. L'âme et son contenu ne sont pas un milieu étendu dans la thèse lotzienne ; *"les relations spatiales ne peuvent accéder à l'esprit qu'à titre d'impressions non extensives mais intensives : en une série graduellement ordonnée"*¹⁸².

¹⁷⁹ Lotze H. *Op. cit.*, page 359.

¹⁸⁰ Meulders M. (2001) *Helmholtz. Des Lumières aux neurosciences*. Paris : Odile Jacob, page 221.

¹⁸¹ Lotze H. *Kleine Schriften*, Bd III, page 518 cité par Morel C (2007). Localisation spatiale et théorie de l'intuition sensible chez R.H. Lotze : le transcendantal et l'affection. Séminaire de recherche, Clermont-Ferrand.

¹⁸² Morel C. *Ibid.*, page 6.

1.3.3. La théorie des forces motrices d'Alexander Bain

La nature *a priori* de l'espace fut également remise en question en Grande-Bretagne où la thèse empiriste fut largement développée par les philosophes John Locke et David Hume. L'idée sera défendue ici aussi que l'espace n'est pas donné préalablement à l'expérience mais qu'il est une conséquence du mouvement. Pour Alexander Bain (1818-1903), une représentation de l'espace serait construite à partir des forces développées pour produire les mouvements et des sensations qui leur sont associées. "*Le sens de la force dépensée est ... le fait le plus saillant de la conscience des états musculaires, il se distingue de tous les modes de sensations passives. Par le sentiment qui distingue le degré et la durée de la force, nous reconnaissons la différence qui existe entre un déploiement plus ou moins grand de tension musculaire*"¹⁸³. Avec les notions de force et d'effort, le philosophe écossais met l'accent sur les résistances qui s'opposent à la réalisation du mouvement. En effet, les différentes forces déployées pour réaliser divers mouvements du bras dans le vide ne suffisent pas à engendrer différentes sensations de distance. "*Quand nous considérons les sensations obtenues par le mouvement seul, par exemple en faisant mouvoir le bras çà et là dans l'espace vide, nous trouvons qu'elles ne rendent pas entièrement compte de l'idée d'espace étendu, ou de matière étendue*"¹⁸⁴. Il faut en effet que des marques viennent indiquer le début et la fin d'un mouvement. Celles-ci seraient établies par des sensations en provenance d'autres modalités. Ainsi, "*la fusion des sensations du tact (ou de la vue) avec le sentiment d'un emploi des forces motrices explique tout ce qui appartient à la notion de grandeur étendue ou d'espace*"¹⁸⁵. Alexander Bain explique aussi comment une succession, une série de contractions musculaires peut conduire à un ordre de coexistence, une co-occurrence et donc à quelque chose de spatial. La contemporanéité se mettrait en place quand les commandes motrices et les sensations proprioceptives qui accompagnent les mouvements sont combinées avec une série de sensations issues d'une autre modalité sensorielle. Les modalités tactiles ou visuelles seront les premières considérées. Lorsque nous frottons de la main le dessus d'une surface matérielle, les sensations de mouvement (peu importe ici qu'elles soient d'origine motrice ou

¹⁸³ Bain A. (1855 ; 1895) *Les sens et l'intelligence*. Traduit par M.E. Cazelles, Paris : Alcan, page 69.

¹⁸⁴ *Ibid.*, page 129.

¹⁸⁵ Bain A. cité par Ribot T. (1879) *Op.cit.* page 120.

proprioceptive) sont accompagnées de sensations cutanées qui cessent dès lors que le mouvement s'arrête et reprennent quand le mouvement redémarre. Pareillement, lorsque nous suivons du regard un mouvement volontaire de la main, les éléments du champ visuel situés derrière la main glissent dans la direction opposée à celle de la poursuite oculaire. Le glissement s'arrête quand la main et le regard cessent de bouger. Il s'inverse aussi lorsque tous les deux reprennent ensemble leur mouvement dans la direction opposée. Une association permanente, une relation de coexistence se trouve ainsi engendrée par l'exécution de mouvements¹⁸⁶. *"Par suite, l'ordre des sensations tactiles [ou visuelles] est considéré comme indépendant de leur succession dans le temps, et par là même elles nous sont données comme ordonnées l'une auprès de l'autre. L'étendue ou l'espace, en tant qu'état de conscience, n'a pas d'autre origine, n'a pas d'autre sens qu'une association de sensations musculaires avec la sensation tactile (ou visuelle)"*¹⁸⁷.

C'est ainsi que Alexander Bain explique pourquoi l'espace n'est pas donné a priori comme le proposait Emmanuel Kant. Il est appris, construit à partir des sensations qui accompagnent les mouvements. *"Nous apprenons à connaître ... la différence entre le coexistant et le successif, entre l'espace et le temps; nous pouvons ... par l'amplitude du mouvement musculaire, c'est-à-dire par la continuation de ce mouvement, distinguer les différences de la matière étendue et de l'espace. Cette sensibilité nous permet d'acquérir dès le principe le sentiment de l'étendue linéaire, comme mesurée par le cours du mouvement d'un membre ou d'un organe mû par des muscles"*¹⁸⁸. Dans un article où il expose la controverse entre les conceptions nativistes et empiristes de l'origine de l'espace, Théodule Ribot résume très bien la thèse d'Alexander Bain: *"L'état de conscience qui accompagne certains modes de mouvement musculaire est l'origine de nos perceptions de longueur, hauteur, largeur, forme, position, direction, c'est-à-dire de toutes les déterminations de l'espace. Si nous mouvons librement un de nos membres, nous avons le sentiment d'un mouvement musculaire plus ou moins long, rien de plus. Si ce mouvement est arrêté à ses deux extrémités par quelque obstacle (comme celui de la main par les deux côtés d'une boîte), il en résulte une première*

¹⁸⁶ *Quand l'ordre sériel de nos sensations ne peut être changé ni renversé, c'est une succession. Quand il peut être renversé, parcouru dans un ordre différent, il y a coexistence"*, Ribot T (1881) *La psychologie anglaise contemporaine*, 3^{ème} édition, Paris: Baillière, page 262.

¹⁸⁷ Ribot T. (1879) *Op.cit.* page 120.

¹⁸⁸ Bain A. (1855 ; 1895) *Les sens et l'intelligence*. Traduit par M.E. Cazelles, Paris: Alcan, page 68.

détermination. De même si nous passons la main ou le doigt sur une surface, et que nous disions que deux points A et B sont séparés par un espace, nous voulons dire simplement qu'il y a une série de sensations musculaires interposées entre le moment où nous partons de A et le moment où nous arrivons à B. C'est donc la sensation d'une durée plus ou moins longue d'effort musculaire qui nous donne l'étendue. La notion de longueur en espace est construite à l'aide de la notion de longueur en temps. Ce qui est dit de la longueur peut s'appliquer à la distance, à la direction, à la forme"¹⁸⁹. Avec cette conception que nous propose Alexander Bain, les notions spatiales ne sont plus seulement engendrées par ce que Wilhelm Leibniz appelait l'ordre de simultanéité ; l'ordre de succession intervient également. Nous trouvons ici les germes de l'hypothèse chronométrique qui fut récemment défendue par Hans Kornhüber puis Peter Thier.

1.3.4. La thèse évolutionniste et nativiste d'Herbert Spencer

La théorie darwinienne de l'évolution va permettre à Herbert Spencer (1820-1903) de marier les conceptions empiriste et nativiste. Si on considère avec les empiristes que l'intelligence est acquise par l'expérience, alors *"il nous suffit [nous dit le philosophe anglais] d'étendre cette doctrine, de manière à ce qu'elle comprenne non seulement l'expérience individuelle, mais celle des ancêtres. En admettant que ces données de l'intelligence sont a priori pour l'individu et a posteriori pour la série entière des individus dont il est le dernier terme, nous échappons aux difficultés des deux hypothèses, telles qu'on les présente communément"*¹⁹⁰. Quelques années après la publication en 1862 de l'Origine des Espèces par Charles Darwin, Herbert Spencer défendait la conception selon laquelle les formes *a priori* de l'intelligence comme celles d'espace et de temps sont un héritage de l'évolution animale qui s'est inscrit dans l'organisation physiologique du système nerveux. Il expliquait en effet que *"si les modifications nerveuses produites par des actes nerveux souvent répétés sont transmises par hérédité, si elles s'accumulent de génération en génération et si elles aboutissent à des structures nerveuses qui sont fixées en proportion des autres rapports auxquels elles répondent, le criterium alors a une valeur qui surpasse infiniment celle d'un criterium fourni par les expériences individuelles. Au lieu d'associations nerveuses relativement*

¹⁸⁹ Ribot T. (1879) *Op.cit.* page 119.

¹⁹⁰ Spencer H. (1892) *Principes de Psychologie*. Tome 2 ; trad. sur la nouvelle édition anglaise par T. Ribot et A. Espinas, page 199.

faibles, produites par la répétition dans une génération, nous avons des connexions nerveuses organisées, produites par habitude dans des milliers de générations, ou plutôt dans probablement des millions de générations. Les rapports d'espace ont été les mêmes, non seulement pour tous les hommes, pour tous les primates et tous les ordres de mammifères dont nous descendons, mais aussi pour tous les ordres d'êtres moins élevés. Ces rapports d'espace constants sont exprimés dans des structures nerveuses définies, congénitalement constituées pour agir d'une manière déterminée, et incapables d'agir d'une manière différente"¹⁹¹.

Façonnées par l'évolution animale et soumises à la sélection naturelle des plus aptes, les habiletés spatiales s'étendraient selon Spencer aux catégories de l'intelligence. Cette thèse a persisté jusqu'à nos jours avec les défenseurs de l'épistémologie évolutionniste, comme le philosophe Karl Popper et l'éthologue, Konrad Lorenz. Pour ce dernier en effet, *"toutes nos formes d'intuition et toutes nos catégories sont ... entièrement naturelles. Comme tous les autres organes, ce sont des réceptacles qui se sont développés au cours de l'évolution phylogénétique pour la réception et l'utilisation rétroactive des conséquences logiques de la nature de la chose en soi à laquelle nous devons nous adapter si nous voulons survivre et préserver la survie de notre espèce"*¹⁹². Les réserves qu'avait formulées son prédécesseur Jakob von Uexküll (1864-1944) ne sont pas parvenues à nuancer cette conception évolutionniste et "universelle" de l'espace. L'inventeur du concept de "monde propre" (Umwelt) déclarait en effet que *"nous nous berçons trop facilement de l'illusion que les relations que le sujet d'un autre milieu entretient avec les choses de son milieu se déroulent seulement dans le même espace et le même temps que les relations qui nous lient aux choses de notre milieu d'humains. Cette illusion est nourrie par la croyance en l'existence d'un monde unique dans lequel sont imbriqués tous les êtres vivants. Il en découle la conviction générale et durable qu'il doit n'y avoir qu'un seul espace et un seul temps pour tous les êtres vivants"*¹⁹³. Cette remarque est cruciale car elle contredit la croyance spencérienne mentionnée plus haut selon laquelle les rapports d'espace ont été et sont les mêmes *"pour tous les hommes, pour*

¹⁹¹ *Ibid.*, page 438.

¹⁹² Lorenz K. (1981) La doctrine kantienne de l'a priori à la lumière de la biologie contemporaine. Dans: *L'homme dans le fleuve du vivant*. Paris: Flammarion, page 107.

¹⁹³ von Uexküll J. (1956/2010) *Milieu animal et milieu humain*, Rivages, page 49.

tous les primates et tous les ordres de mammifères dont nous descendons, mais aussi pour tous les ordres d'êtres moins élevés"¹⁹⁴.

Avant d'étudier plus en détail les développements récents de cette thèse évolutionniste, il nous paraît intéressant de rapporter l'argumentation logique que Herbert Spencer déployait pour expliquer pourquoi il est "*impossible de se représenter jamais qu'il n'y ait pas d'espace*"¹⁹⁵. Cette impossibilité témoignerait selon lui, d'une vérité indubitable, inscrite dans la constitution même de l'esprit. "*L'inconcevabilité [de la négation de l'espace] est ce qui montre qu'une connaissance possède le plus haut rang; ... [elle] est le criterium par lequel on peut reconnaître son extrême certitude. Si la négation d'une connaissance est concevable, cela équivaut à dire que nous pouvons l'accepter ou ne pas l'accepter comme vraie. Si sa négation est inconcevable, nous sommes obligés de l'accepter. Et une connaissance que nous sommes ainsi obligés d'accepter, nous la regardons comme ayant le plus haut degré possible de certitude. Affirmer l'inconcevabilité de sa négative, c'est en même temps affirmer la nécessité psychologique où nous sommes de la penser, et justifier logiquement les raisons que nous avons de la tenir pour indubitable*"¹⁹⁶. Ainsi, Herbert Spencer explique pourquoi Emmanuel Kant concevait l'espace comme une forme *a priori* et nécessaire. L'espace est donné *a priori* au niveau du sujet parce qu'il est hérité de l'évolution, mais en définitive, il est *a posteriori* du point de vue de l'espèce. Il est nécessaire aussi parce que sa négation est inconcevable du fait qu'il soit inscrit dans l'organisation cérébrale : "*l'inconcevabilité de la négation d'un axiome mathématique ... [résulte] de l'impossibilité de changer les actions de la structure nerveuse corrélative, [et] tient réellement lieu de l'infinité d'expériences qui ont causé le développement de cette structure*"¹⁹⁷. On retrouve cette condition neurophysiologique de la concevabilité chez le neurophysiologiste contemporain John O'Keefe. Celui-ci propose en effet que si "*nous ne pouvons pas nous représenter des espaces psychologiques de plus de trois dimensions, ... cela n'est dû à aucun aspect intrinsèque de l'espace physique, mais à l'incapacité du système nerveux à représenter des vecteurs de plus de trois dimensions*"¹⁹⁸. Cette

¹⁹⁴ Spencer H. (1892) *Op. cit.* page 99

¹⁹⁵ Kant E. (1781-1787) *Op. cit.*, page 84.

¹⁹⁶ Spencer H. (1892) *Op. cit.* page 425.

¹⁹⁷ *Ibid.*, page 438.

¹⁹⁸ O'Keefe J. (1993) Kant and the sea-horse: An essay in the neurophilosophy of space. In: *Spatial representation. Problems in philosophy and psychology*. N Eilan, R McCarthy & B Brewer (eds) Oxford University Press, page 45.

explication fournie à propos de la nécessité d'une notion en raison de l'inconcevabilité de sa négation est intéressante quand on la compare à celle de Pierre Gassendi. Nous avons en effet vu que pour le mathématicien, l'espace était une construction de l'imagination, qu'il devenait concevable à partir de la négation de la matière et des corps. Nous verrons plus loin que si nous tentons nous aussi de concevoir l'absence d'espace dans le fonctionnement cérébral, nous n'allons pas pour autant être frappé de désorientation et plonger dans la confusion mentale.

1.3.5. La thèse d'Ernst Mach

Dans son ouvrage intitulé "La connaissance et l'erreur", le physicien-philosophe Ernst Mach (1838-1916) relaiera sur le continent européen cette thèse spencérienne de l'espace et du temps comme héritages inscrits dans la structure biologique de l'organisme. On retrouve sous sa plume l'idée qu "*il n'y a guère lieu de douter aujourd'hui que l'intuition du temps, comme celle de l'espace, soit déterminée par notre constitution héréditaire : nous nous efforcerions en vain de nous affranchir de ces intuitions*"¹⁹⁹. Il prend cependant soin de préciser que ces intuitions ne sont pas complètement développées à la naissance, que l'exercice et l'expérience permettent de les compléter, comme le défendait, nous le verrons plus loin, son contemporain Hermann von Helmholtz. Avec Ernst Mach, nous pouvons supposer que "*la conception de l'espace est préparée à l'avance par l'organisation congénitale, mais il reste beaucoup de jeu pour le développement individuel, qui doit varier grandement, suivant qu'il s'agit d'un aveugle ou d'un homme qui jouit de la vue, d'un chasseur, d'un musicien, etc*"²⁰⁰. Le développement ultérieur de ces intuitions reposerait sur les capacités adaptatives de l'individu à son environnement. C'est ainsi que "*la sensation de temps et la représentation d'espace se développent par l'adaptation de l'individu au milieu temporel et spatial, dans lequel il se trouve placé*"²⁰¹. Dans cette déclaration, nous remarquons que Mach attribue une structure spatiale et temporelle au monde environnant, une structure que l'individu assimilerait au cours de son développement et de son adaptation. Cette conception réaliste de l'espace et du temps est retrouvée un peu plus loin quand il affirme que "*le trait*

¹⁹⁹ Mach E. (1905) *Erkenntnis und Irrtum* Traduction française par Marcel Dufour, *La connaissance et l'erreur* (1919). Paris: Flammarion, page 342.

²⁰⁰ *Ibid.*, page 338.

²⁰¹ *Ibid.*, page 343-344.

fondamental de nos représentations psychiques est de pouvoir ressembler à l'original au double point de vue non seulement de la qualité des éléments des sensations et de leurs combinaisons, mais aussi de leurs rapports et de leur distribution dans l'espace et dans le temps. Ce sont l'exercice et le degré d'attention de l'individu, qui ont la plus grande influence sur la précision atteinte par cette ressemblance"²⁰².

La production de mouvements et l'exercice donneraient donc à l'organisme l'occasion de mettre à l'épreuve les représentations dont il dispose de son environnement. Ces représentations sont comme des modèles internes, notion rendue très populaire de nos jours avec les écrits, nous le verrons plus loin, d'Alain Berthoz. Cette notion gagne même le champ d'une "psychiatrie" dite computationnelle contemporaine puisque certains auteurs défendent l'idée que certaines maladies mentales, comme par exemple la schizophrénie ou l'autisme, résultent d'un "cerveau qui s'efforce d'interpréter le monde par le truchement de modèles internes déformés, ou alors combinant de manière incorrecte ces modèles internes avec l'information sensorielle"²⁰³. L'explication physiopathologique est ici remplacée par une narration qui épargne aux médecins-psychiatres, aux neuropsychologues et aux jeunes étudiants des formations en médecine ou en psychologie, d'apprendre le vocabulaire étendu de la neuroanatomie et de la neurophysiologie. Bien que simpliste, il n'est pas certain que cette nouvelle narration soit efficace pour calmer la détresse parentale ou familiale.

Pour Ernst Mach, c'est dans la liberté de se mouvoir et dans la répétition de cette liberté que la représentation d'un espace homogène, infini et isotrope prendrait son origine. Il explique en effet que "si, comme un mollusque au fond de la mer, l'homme gardait toujours la même place et la même orientation, il arriverait difficilement à se représenter l'espace euclidien ... Son espace ... resterait toujours anisotrope et limité. Mais, comme nous pouvons déplacer arbitrairement notre corps dans son ensemble, et l'orienter à notre guise, nous jugeons que nous pourrions exécuter les mêmes mouvements en tous lieux et dans toutes les directions. Nous disons alors que, partout et dans toutes les directions, l'espace a la même constitution, et que nous pouvons nous le représenter comme illimité et infini. Des déplacements réguliers et divers changements d'orientation, par exemple une rotation autour d'un axe vertical, donnent lieu à des modifications constantes dans l'espace, et nous voyons

²⁰² *Ibid.*, page 344.

²⁰³ Series P. (2019) <http://int.univ-amu.fr/Peggy.Series-986>.

intervenir là, avec la régularité, la possibilité de répéter indéfiniment certaines opérations"²⁰⁴. Nous retrouverons ces notions de liberté et de répétition dans les thèses exposées un peu plus loin et défendues par Hermann von Helmholtz et par Henri Poincaré.

L'adaptation phylogénétique et ontogénétique consisterait donc en un mimétisme, une internalisation de la structure du monde "extérieur". Façonnées au cours de l'évolution, nos habiletés spatiales et temporelles deviendraient de mieux en mieux adaptées aux choses qui l'occupent. Ernst Mach propose donc deux définitions de l'espace et du temps: "*au point de vue physiologique, le temps et l'espace sont des systèmes de sensations d'orientation, qui, à côté des sensations proprement dites, mettent en jeu des réactions convenables à l'adaptation biologique*" tandis qu'"*au point de vue physique, le temps et l'espace sont des relations particulières des éléments physiques entre eux*"²⁰⁵. Milic Capek fait remarquer que cette idée d'un aboutissement évolutif, de l'optimalité de certains caractères innés, est proche de l'idée kantienne des formes *a priori* car "*aucune expérience future ne pourra jamais remettre en question la validité de la géométrie euclidienne, du principe classique de causalité, de continuité spatio-temporelle, etc., puisque toute notre expérience future sera, pour ainsi dire, filtrée par l'appareil de la forme a priori de l'espace euclidien et la catégorie a priori de la causalité, qui par définition sont au-delà de tout changement évolutif*"²⁰⁶. Le caractère évident des axiomes de la géométrie euclidienne résulterait donc d'une imprégnation du monde "extérieur", de sa reproduction dans le fonctionnement du système nerveux, mais aussi de son optimalité.

Si Ernst Mach maintient un enracinement physiologique des notions géométriques, il prône aussi un processus d'idéalisation. "*Nos notions d'espace sont enracinées dans notre organisme physiologique. Les concepts géométriques sont les produits de l'idéalisation des expériences physiques de l'espace*" et "*les systèmes géométriques prennent origine dans la*

²⁰⁴ Mach E. (1905) *Ibid.* pages 336-337.

²⁰⁵ *Ibid.*, page 351.

²⁰⁶ Traduction de "*no future experience can ever challenge the validity of the Euclidian geometry, of the classical principle of causality, of spatio-temporal continuity, etc., since all our future experience will be, so to speak, filtered through the apparatus of the a priori form of Euclidean space and the a priori category of causality, which by definition are beyond any evolutionary change*" dans Capek M. (1968) Ernst Mach's biological theory of knowledge. *Synthese* 18 :171-191, page 174.

*classification logique des matériaux conceptuels ainsi obtenus*²⁰⁷. La peau selon lui peut être assimilée à "un espace de Riemann à deux dimensions, fini et fermé"²⁰⁸ tandis que dans l'espace visuel, "les objets ... ne sont pas mobiles sans contraction ni extension comme les objets invariables, qui leur correspondent dans l'espace euclidien"²⁰⁹. Mach soulève tout de même le problème épistémologique qui conduit à projeter nos cadres d'interprétation dans toute analyse. Au sujet de la nature de l'espace, "la principale difficulté ... vient de ce que, à l'âge où les hommes cultivés commencent à réfléchir sur ce sujet, les représentations scientifiques de la géométrie leur sont déjà familières, et qu'ils les transportent naturellement partout. Il faut que ceux qui étudient cette question cherchent à oublier beaucoup de ce qu'ils ont appris auparavant, et à retrouver la fraîcheur d'impression d'un regard non prévenu"²¹⁰. Cette remarque témoigne de l'influence kantienne au sujet de ce que notre esprit transporte pour interpréter les observations que nous faisons. Elle nous rappelle que les mots et les concepts sont comme des instruments, des catégories rassemblant une multitude d'idées et avec lesquelles un sens est donné aux phénomènes dont nous sommes les témoins. "Des pensées sans matière sont vides ; des intuitions sans concepts sont aveugles" disait Emmanuel Kant²¹¹. Mais les concepts peuvent aussi nous aveugler quand on considère la persistance avec laquelle certains concepts, jugés périmés et obsolètes par certains scientifiques, continuent d'être utilisés dans d'autres discours. On ne peut s'empêcher de rappeler ici la thèse de Benjamin Lee Whorf selon laquelle "les apparences physiques ne sont pas les mêmes pour tous les observateurs, qui de ce fait n'aboutissent pas à la même représentation de l'univers, à moins que leurs infrastructures linguistiques ne soient analogues ou qu'elles puissent être en quelque sorte normalisées"²¹². Le linguiste-anthropologue américain expliquait en effet que "nous découpons la nature selon les voies tracées par notre langue maternelle. Les catégories et les types que nous isolons du monde des phénomènes ne s'y trouvent pas tels quels, s'offrant

²⁰⁷ Mach E. (1903) Space and geometry from the point of view of physical enquiry. In: *Space and geometry in the light of physiological, psychological and physical enquiry*. Mineola, USA : Dover Publications Inc., page 94.

²⁰⁸ *Ibid.*, page 329.

²⁰⁹ *Ibid.*, page 328.

²¹⁰ *Ibid.*, page 337.

²¹¹ Kant E. (1781/1787, 1980) *Op. cit.*

²¹² Whorf B.L. (1969) *Linguistique et anthropologie. Les origines de la sémiologie*. Paris : Denoël, page 126.

d'emblée à la perception de l'observateur. Au contraire, le monde se présente à nous comme un flux kaléidoscopique d'impressions que notre esprit doit d'abord organiser, et cela en grande partie grâce au système linguistique que nous avons assimilé. Nous procédons à une sorte de découpage méthodique de la nature, nous l'organisons en concepts, et nous lui attribuons telle signification en vertu d'une convention qui détermine notre vision du monde - convention reconnue par la communauté linguistique à laquelle nous appartenons et codifiée dans les modèles de notre langue"²¹³. Même si le principe de relativité linguistique de Benjamin Whorf a largement été critiqué, il reste indéniable qu'un conventionnalisme caractérise chaque communauté scientifique. L'esprit qui n'est pas préparé ne voit pas toujours ce qu'on lui présente, ou en tout cas, ne voit pas la même chose. Une préparation mentale présente l'écueil d'orienter l'observation et de biaiser le déploiement de la pensée face aux états mentaux ultérieurs.

Comme Rudolf Lotze qui doutait de l'applicabilité des notions mécaniques au monde des idées, Ernst Mach doute de l'applicabilité des notions géométriques. Il rappelle en effet que *"notre géométrie se rapporte toujours à des objets de l'expérience sensible. Mais dès lors que nous commençons à opérer sur des idées ... qui par leur propre nature ne peuvent jamais être des objets de contemplation sensible, rien ne nous oblige de penser qu'ils relèvent des relations spatiales propres à l'espace euclidien tridimensionnel de notre expérience sensible"*²¹⁴. Pareillement, ce n'est pas parce que la mécanique classique est efficace pour décrire la trajectoire du mouvement d'un corps solide que toutes les notions (force, espace, temps) qu'elle véhicule sont transposables au fonctionnement interne du cerveau au prétexte les transformations sensorimotrices qu'il canalise produisent des actions adaptées aux contraintes du monde externe. *"Nous attribuons à l'espace trois dimensions, et notre géométrie considère ces trois dimensions comme équivalentes et l'espace comme isotrope ... Mais si on considère la géométrie comme une science physique, on peut se demander s'il convient toujours de garder cette conception, et le calcul des vecteurs nous force à tenir compte de la non-équivalence des directions ... Si nous admettons l'équivalence des dimensions, cela tient à ce que leur non-équivalence disparaît dans des cas particuliers plus simples et fréquents. Physiologiquement, les dimensions ne sont pas équivalentes sans quoi*

²¹³ *Ibid.*, page 125.

²¹⁴ Mach E. (1903) *Op.cit.*, page 138.

nous ne pourrions pas les distinguer du tout"²¹⁵. Dans l'oreille interne et même dans certains organes comme les reins, des gravicepteurs nous permettent en effet d'apprécier la verticalité tandis que l'horizontalité est signalée par les canaux semi-circulaires horizontaux ou les flux optiques engendrés par les mouvements oculaires horizontaux.

1.3.6. La thèse de Konrad Lorenz

L'hypothèse du mimétisme et l'imprégnation des contraintes du monde "extérieur" dans le système nerveux et dans les catégories de la cognition sera défendue par l'éthologue-zoologiste Konrad Lorenz (1903-1989). Avec la notion d'instinct, il défend l'idée spencérienne que certains comportements dépassent le cadre de l'individu et sont inscrits dans le répertoire des caractères innés de l'espèce. Il avait recours à la notion de reflet pour exprimer cette imprégnation du milieu "extérieur" sur la morphologie et la cognition des organismes. La thèse lorenzienne met l'accent sur une adaptation qui, plutôt que de reposer sur une conduite active des individus à rechercher un environnement plus favorable, consiste principalement en un processus où les individus subissent les contraintes d'un environnement qui les instruit et les modèle. *"Comme c'est l'organisme qui change dans le processus et non... l'environnement, c'est le premier qui développe un moule, en fait une image, de son environnement naturel. La nageoire d'un poisson reflète les propriétés de l'eau, tout comme le sabot d'un cheval celles du sol dur et uniforme d'une steppe, ou comme un œil reflète les propriétés de la lumière émanant du soleil"*²¹⁶. Dans cette thèse, l'adaptation ne se limite pas aux organes et à leur morphologie; elle exerce son influence jusqu'à la pensée même. Elle aurait donné à cette dernière *"une structure innée qui correspond dans une large mesure à la réalité du monde extérieur... Nos formes d'intuition et nos catégories « s'ajustent » à ce qui existe réellement de la même manière que notre pied s'ajuste au sol ou les nageoires du poisson à l'eau"*²¹⁷. Cet ajustement des idées aux contraintes du monde physique se ferait au niveau du système nerveux central: *"de même que le sabot du cheval est adapté au sol des steppes pour lequel il est fait, l'appareil nerveux central qui organise notre image du monde*

²¹⁵ Mach E. (1905) *Op. cit.*, page 365.

²¹⁶ Lorenz K. (2013) Innate bases of learning. In: *Learning as self-organization*. Psychology Press page 2.

²¹⁷ Lorenz K. (1981) La doctrine kantienne de l'a priori à la lumière de la biologie contemporaine. Dans: *L'homme dans le fleuve du vivant*. Paris: Flammarion, page 103.

est adapté au réel dans lequel nous devons nous intégrer. Comme n'importe quel autre organe il a atteint sa forme opportune pour la survie de l'espèce par ce processus d'ajustement du réel au réel tout au long des millénaires d'évolution phylogénétique"²¹⁸.

Malgré l'influence massive que la vie en société, l'acculturation et le langage ont exercé sur notre développement intellectuel, individuel et civilisationnel, "*à la question de savoir pourquoi la forme de sa fonction est adaptée au monde réel*", Konrad Lorenz donne la réponse suivante: "*nos catégories et nos formes de perception antérieures à toute expérience individuelle sont adaptées au monde extérieur exactement pour les mêmes raisons que le sabot du cheval est préadapté au sol de la steppe avant même que le cheval naisse et la nageoire du poisson avant même que le poisson sorte de l'œuf*"²¹⁹. N'étant pas neurophysiologiste, et contrairement à certains de ses prédécesseurs comme Johan Steinbuch ou Rudolf Lotze, il ne donne aucune explication sur la manière avec laquelle le fonctionnement cérébral engendrerait ces catégories. A propos de l'a priori qu'Emmanuel Kant concevait, Konrad Lorenz nous dit qu'il serait "*dû à des différenciations du système nerveux central transmises héréditairement, devenues caractéristiques d'une espèce et produisant des dispositions héréditaires à certaines formes de pensée*"²²⁰. Si aujourd'hui, il nous paraît invraisemblable de considérer que certaines formes de pensée puissent relever de dispositions héréditaires, il convient de nous interroger sur les faits qui ont conduit à prendre conscience des limites d'une telle conception "dé-culturée" autant que sur les arguments qui ont conduit à la raviver au cours des dernières décennies²²¹. Dès 1941, Konrad Lorenz assimilait déjà la quantification numérique à une de ces "*formes de pensée*" innées, à une authentique création de la nature plutôt que le produit d'une certaine histoire socio-culturelle: "*l'un des plus prodigieux outils que la nature ait jamais créés*" écrivait-il²²². Avec la

²¹⁸ *Ibid.*, page 104.

²¹⁹ *Ibid.*

²²⁰ *Ibid.*, pages 100-101

²²¹ La théorie des systèmes et le courant cybernétique ont vraisemblablement contribué à son maintien. Pour Ludwig von Bertalanffy, "les catégories d'expérience ou formes d'intuition, pour reprendre le terme de Kant, ne sont pas un a priori universel, mais dépendent plutôt de l'organisation psychophysique et des conditions physiologiques des animaux qui les expérimentent, y compris l'homme" (von Bertalanffy L. (2008) *General system theory*, New York: Braziller page 232).

²²² Lorenz K. (1941) *Op. cit.*, page 110.

psychologue Elizabeth Spelke²²³, les neuropsychologues Brian Butterworth²²⁴ et Stanislas Dehaene²²⁵, la philosophe Helen de Cruz²²⁶ et une multitude d'autres auteurs, cette conception innéiste est largement diffusée dans les sciences cognitives contemporaines. Avant eux, Konrad Lorenz considérait déjà les mathématiques numériques comme "un organe, une « hypothèse de travail innée » acquise au cours de l'évolution"²²⁷. "La capacité d'estimation immédiate des quantités données, capacité qui existe chez l'homme ainsi que chez un grand nombre d'animaux, résulte très certainement d'un ... processus de quantification de l'intensité"²²⁸.

Le philosophe Karl Popper (1902-1994) défendait lui aussi la conception selon laquelle "chaque organisme a des réactions ou des schémas réactifs innés et, notamment, des réponses adaptées aux événements relevant de l'horizon immédiat. On peut qualifier celles-ci d'«attentes» sans que cela implique qu'elles soient d'ordre conscient ... Étant donné l'étroite relation qui lie attente et connaissance, on est même tout à fait fondé à parler en l'occurrence de «connaissance innée» ... Nous naissons donc avec des attentes, avec une connaissance qui, sans avoir de validité a priori, est a priori du point de vue psychologique ou génétique, c'est-à-dire première par rapport à toute expérience dans l'ordre de l'observation consciente"²²⁹. Le philosophe autrichien prolongera le paradigme évolutionniste darwinien à l'épistémologie dans la mesure où il considérait que "le développement de notre connaissance est le résultat d'un processus qui ressemble étroitement à ce que Charles Darwin a nommé « sélection naturelle »; il s'agit de la sélection naturelle des hypothèses: notre connaissance est constituée, à tout moment, par les hypothèses qui ont montré (comparativement) leur adaptation par leur fait qu'elles ont survécu jusqu'à maintenant dans leur lutte pour l'existence; une lutte entre

²²³ Spelke E.S. (2017) Core knowledge, language, and number. *Language Learning and Development* 13: 147-170.

²²⁴ Butterworth B. (1999) *The mathematical brain*. London: Macmillan.

²²⁵ Dehaene S. (2010) *La bosse des maths*. Paris: Odile Jacob.

²²⁶ de Cruz H. (2009) An enhanced argument for innate elementary geometric knowledge and its philosophical implications. In: van Kerkhove B (ed) *New perspectives on mathematical practices. Essays in philosophy and history of mathematics*, 185-206.

²²⁷ *Ibid.*, page 111.

²²⁸ *Ibid.*

²²⁹ Popper K.R. (1985) *Conjectures et réfutations. La croissance du savoir scientifique*. Paris: Payot, page 81.

concurrentes qui élimine les hypothèses inadaptées"²³⁰. Konrad Lorenz et Karl Popper sont les figures majeures de l'épistémologie évolutionniste. Un autre de ses artisans, Franz Wuketits (1955-2018) déclarera qu' "*à travers le processus d'adaptation, les systèmes vivants accumulent de plus en plus d'informations sur leur environnement et, ainsi, représentent la structure de l'environnement dans lequel ils vivent ; meilleure est la représentation de l'environnement, meilleures sont les chances de survie*"²³¹. Selon lui, il y a une "*relation isomorphique des patterns de la nature aux patterns de la cognition*"²³².

1.3.7. La thèse d'Alain Berthoz

Nous retrouvons cette idée d'une intériorisation des lois de la nature dans la structure interne des organismes chez Stanislas Dehaene et Elizabeth Brannon quand ils nous expliquent qu'"*au cours de leur évolution, les humains et de nombreuses autres espèces animales ont intériorisé des codes de base et des opérations isomorphes aux lois physiques et arithmétiques qui régissent les interactions des objets dans le monde physique*"²³³. La même thèse apparaît aussi chez Alain Berthoz pour qui il y aurait une "*internalisation des lois de la physique newtonienne*"²³⁴; "*le cerveau dispose[rait] de modèles internes des lois de Newton*"²³⁵. Dans un ouvrage écrit avec le philosophe Jean-Luc Petit, on découvre une conception de type kantienne quand ils disent que ces "*grilles de lecture que [le cerveau] projette sur le monde*" sont les "*résultats des trois millions d'années d'expérience*", rendus disponibles par le processus de sélection naturelle et les lois du fonctionnement du cerveau, "*lois qui, elles-mêmes sont dérivées des lois générales de la nature*"²³⁶. Outre le fait que cette notion de modèle interne des contraintes imposées par le monde externe se présentent à nous comme un raccourci de pensée derrière lequel se cache une formidable complexité

²³⁰ Popper K.R. (1991) La connaissance objective. Paris: Aubier, page 391-392.

²³¹ Wuketits F.M. (1984) Evolutionary epistemology - a challenge to science and philosophy. In: F.M. Wuketits (ed) Concepts and approaches in evolutionary epistemology, Reidel Publishing Company, pages 1-33.

²³² *Ibid.* page 26.

²³³ Dehaene S. & Brannon E. (2011) Foreword. In: S. Dehaene & E. Brannon (Eds) Space, time and number in the brain. London: Academic Press, London, page ix.

²³⁴ Berthoz A. (2009) La simplicité. Paris: Odile Jacob, page 76.

²³⁵ *Ibid.*, page 75.

²³⁶ Berthoz A. et Petit J.-L. (2006) Phénoménologie et physiologie de l'action. Paris: Odile Jacob, page 106.

neurobiologique, cette conception suppose aussi que la description newtonienne du monde physique constitue le modèle ultime permettant de décrire les phénomènes de la nature. Or on ne peut pas exclure la possibilité que la mécanique newtonienne ne soit qu'une construction théorique, un discours scientifique particulier dans lequel l'espace et le temps sont séparés, avec des notions qui, comme celle de force, pourraient se révéler indéfinies ou simplement conventionnelles, comme nous le verrons avec Henri Poincaré et comme nous le rappelle l'historienne des sciences Maria de Paz²³⁷. Comme le disent merveilleusement bien le théoricien des sciences du cerveau Andras Pellionisz et le neurobiologiste Rodolfo Llinas, si on considère le système nerveux comme "*une machine dans le sens où elle impose un ordre aux parties mobiles du système musculo-squelettique ... [et que] les mouvements sont descriptibles par la mécanique newtonienne, il ne s'ensuit cependant pas que [son] fonctionnement interne utilise la même mécanique que celle utilisée dans la description du mouvement*"²³⁸.

Partant de l'idée que "*le cerveau est une machine biologique que l'évolution a sélectionnée pour sa capacité à prédire les conséquences futures de l'action, gagner du temps, anticiper*", Alain Berthoz "*cérébralise*" la géométrie en la présentant comme une simulation interne. Elle ferait "*partie des outils inventés au cours de l'évolution qui permettent de prédire le futur en se basant sur la mémoire du passé, et surtout de prédire les conséquences des actions futures en se basant sur les conséquences des actions passées*". Elle serait "*le reflet de cette évolution remarquable du cerveau qui lui a donné la possibilité de simuler en interne la réalité, de mettre en relation des solutions possibles à un projet d'action, et surtout d'envisager des interactions entre des agents extérieurs sans nécessairement ramener toutes ces actions à soi-même*"²³⁹. Malheureusement, aucune explication n'est donnée sur la manière dont ces expériences passées, mémorisées et reproduites produisent un groupe de transformations comme nous le verrons plus loin avec Henri Poincaré. A propos de cette mémoire du passé à partir de laquelle des "prédictions" ou plutôt des attentes sont faites, nous pouvons discuter des deux grandes catégories d'apprentissage par lesquelles l'expérience passée est mémorisée, à savoir l'apprentissage des réponses conditionnées et celui des réponses

²³⁷ De Paz M. (2018) From jurisprudence to mechanics: Jacobi, Reech, and Poincaré on convention. *Science in context* 31: 223–250.

²³⁸ Pellionisz A. et Llinás R. (1982) *Op. cit.*

²³⁹ Berthoz A. (2005) *Op. cit.*, page 131.

instrumentales. Les réponses conditionnées sont celles créées par l'association répétée d'un premier signal neutre avec un second signal qui provoque une réponse réflexe. Chez l'animal soumis à une procédure de conditionnement de type pavlovien par exemple, un signal sonore qui systématiquement précède la présentation de nourriture finit par provoquer une salivation avant même la présentation de nourriture. Cette réponse peut être qualifiée de "prédictive" parce qu'elle précède un événement qui n'est pas encore survenu. Cette "prédiction" n'a rien de comparable avec les prédictions expérimentales de la pratique scientifique. Elle n'est pas non plus comparable aux chaînes de déduction parfois très élaborées que l'on peut trouver en géométrie. La deuxième catégorie de réponses, les réponses instrumentales, sont moins passives dans la mesure où elles naissent dans un geste volontaire qui conduit systématiquement à un résultat, comme celui de tourner une clé dans une serrure pour déverrouiller une porte ou pour démarrer un véhicule automobile. Là encore, Alain Berthoz n'explique pas comment les axiomes ou les théorèmes de la géométrie peuvent être découverts.

La connaissance humaine des lois de la nature, peut-être même aussi du mouvement, est susceptible d'évoluer encore au cours des prochaines décennies. L'avènement de concepts et d'instruments nouveaux ne doit pas être exclu. Si les lois du mouvement sont les mêmes pour la libellule et le colibri, la mante religieuse et le chat, faut-il considérer un substrat commun ou plusieurs formes d'internalisation? Est-il seulement possible de trouver ce qui dans l'organisation et le fonctionnement du système nerveux témoigne de cette internalisation? Il se peut que cette idée ne soit ni testable ni réfutable. L'adaptation des animaux à leur environnement peut simplement résulter du fait que leur physiologie interne est suffisamment plastique pour que l'apprentissage et l'exercice répété permettent leur ajustement aux événements auxquels ils sont soumis²⁴⁰. Car à défaut de cette plasticité et à moins aussi d'augmenter leur potentiel reproductif, les animaux auraient plus de difficultés pour vivre longtemps ou survivre. Contre cette intériorisation des lois de la nature dans la structure interne des organismes, nous défendons une conception plus combative de l'intelligence et des formes vivantes. La cognition, la physiologie et même la morphologie ne sont pas de simples représentations, des copies incarnées du monde extérieur. Elles sont des

²⁴⁰ Goffart L. (2018) De la représentation cérébrale spatio-temporellement distribuée à la capture ici et maintenant d'un objet visuel en mouvement. In: *L'avenir de la complexité et du désordre*, J-C. S. Lévy & S. Ofman (Eds), Editions matériologiques, 267-294.

contre-réactions, des explorations de possibilités d'expansion, des tentatives de tracer des chemins durables à travers un milieu caractérisé par des contraintes propres à chaque niveau de complexité, des niveaux atomiques jusqu'au niveaux culturels.

Nous pouvons résumer la congruence spatiale entre le lieu rempli de nectar et l'extrémité buccale de l'oiseau-mouche par une égalité de coordonnées, c'est-à-dire un ensemble de nombres exprimés dans un référentiel commun. Mais les nombres ne sont pas les seuls ingrédients qui puissent "remplir" l'espace. La répétition et la juxtaposition d'autres types d'éléments, d'autres formes géométriques qui ne soient pas toutes forcément identiques pourraient aussi remplir un médium continu. Le pavage du monde peut être réalisé avec des ingrédients qui ne sont pas dénués d'épaisseur ou d'étendue. Les nombres sont considérés plus simples à manipuler, mais il est possible que cette simplicité ne résulte que d'une habitude. Aussi est-il souhaitable que l'habitude ne devienne pas une résistance au développement d'alternatives, qu'elle ne soit pas un frein à l'imagination car, comme le dit Konrad Lorenz, *"si par malheur un système de pensée est assez bien agencé pour que, pendant longtemps, personne n'ait la force ni le courage de le faire éclater, il pourra bloquer tout progrès pendant des siècles"*²⁴¹.

1.3.8. Les critiques de la cérébralisation de la géométrie

De nombreux auteurs vont corriger cette idée d'une "imprégnation" de la géométrie euclidienne dans l'organisation neuro-psycho-physiologique et insister sur la distinction entre l'espace géométrique et une supposée correspondance neuro-psycho-physiologique. Pour Ernst Mach par exemple, *"l'espace physiologique, l'espace de notre intuition sensible, que nous trouvons tout fait au plein éveil de notre conscience ... [est] très différent de l'espace géométrique, abstrait"*²⁴². Alors que *"l'espace de la géométrie euclidienne a partout et dans toutes les directions la même constitution, et est illimité"*, l'espace visuel lui est *"limité ..., n'a pas la même constitution partout ni dans toutes les directions"*²⁴³. Les corps rétrécissent quand ils s'éloignent de nous, grossissent quand ils s'approchent. *"La différence entre "au-dessus" et "en-dessous", entre "devant" et "derrière" et aussi ... entre "droite et gauche" est commune à*

²⁴¹ Lorenz K. (1981) *Op. cit.*, page 114.

²⁴² Mach E. (1905) *Op. cit.*, page 327.

²⁴³ *Ibid.*

l'espace tactile et l'espace visuel. Dans l'espace géométrique il n'y a pas de telles différences"²⁴⁴. De même, nous allons voir que pour Henri Poincaré, "*l'espace sensible n'a rien à voir avec l'espace géométrique*"²⁴⁵. Le mathématicien français avait recours à une autre notion, l'espace représentatif, "*cadre de nos représentations et de nos sensations*"²⁴⁶ présentant "*une triple forme, visuelle, tactile et motrice ... ni homogène ni isotrope [dont] on ne peut même pas dire qu'il ait trois dimensions*"²⁴⁷. L'espace moteur, défini comme l'ensemble des configurations possibles de sensations musculaires, aurait autant de dimensions qu'il y a de muscles. "*Il nous est aussi impossible de nous représenter les corps dans l'espace géométrique, qu'il est impossible à un peintre de peindre, sur un tableau plan, des objets avec leur trois dimensions*"²⁴⁸. Le nombre de dimensions de l'espace représentatif n'est pas connu mais il excède très certainement les trois dimensions de l'espace géométrique. "*L'espace représentatif n'est qu'une image de l'espace géométrique, image déformée par une sorte de perspective, et nous ne pouvons nous représenter les objets qu'en les pliant aux lois de cette perspective*"²⁴⁹. Quant à l'origine de l'idée d'espace géométrique, Henri Poincaré ne la trouvait pas dans la sensibilité mais dans cette idéalisation des opérations sensibles qu'est la notion de groupe de transformations. Pour lui, "*aucune de nos sensations, isolée, n'aurait pu nous conduire à l'idée de l'espace, nous y sommes amenés seulement en étudiant les lois suivant lesquelles ces sensations se succèdent*"²⁵⁰. Avec la découverte de la possibilité de géométries autres que la géométrie euclidienne, nous sommes amenés à considérer l'espace non plus comme une intuition, immédiate et singulière, mais plutôt comme un concept. Le philosophe-mathématicien Igor Ly nous explique en effet que "*la considération de notions géométriques n'appelle pas des constructions dans l'intuition pure ... dès lors que l'on considère que la pensée mathématique ... consiste en l'application d'une capacité de conception spécifique ... à des actes donnés dans l'intuition sensible*", cette capacité étant cette puissance de l'esprit à pouvoir répéter indéfiniment une même

²⁴⁴ Mach E. (1914) *The analysis of sensations, and the relation of the physical to the psychical*. Chicago: Open Court, page 182.

²⁴⁵ Poincaré H. (1921) *Des fondements de la géométrie*. Paris: Chiron page 11.

²⁴⁶ Poincaré H (1902) *La science et l'hypothèse*. Paris: Editions Champs Flammarion page 78.

²⁴⁷ *Ibid.*, page 81.

²⁴⁸ *Ibid.*, page 82.

²⁴⁹ *Ibid.*

²⁵⁰ *Ibid.*, page 83.

opération²⁵¹. Hermann von Helmholtz établissait lui aussi un lien entre l'espace géométrique et l'expérience des propriétés physiques du mouvement : "*les axiomes géométriques n'ont en aucun cas trait aux seuls rapports de l'espace ; ils ont également trait au comportement mécanique de nos corps solides à mesure de leur déplacement*"²⁵², sans faire appel cependant à cette notion de groupe de transformations. Nous allons maintenant étudier plus amplement ces thèses helmholtzienne et poincaréenne.

1.3.8.1. Les thèses de Hermann von Helmholtz

Physiologiste puis physicien, Hermann von Helmholtz (1821-1894) a développé une thèse réaliste de l'espace physique et une thèse constructiviste de l'intuition spatiale. Pour lui, la notion d'un espace homogène, infini et isotrope prendrait son origine dans la liberté de se mouvoir et de répéter indéfiniment cette liberté. Ce principe de libre mobilité fut exposé dans un texte consacré à l'origine des axiomes géométriques²⁵³. Toutes les démonstrations de la géométrie euclidienne reposent sur l'établissement d'une congruence entre les figures, et donc sur la possibilité de procéder à leur superposition sans que ni leur forme ni leur dimension ne soient changées. Or il explique que cette "*hypothèse d'une libre et universelle mobilité des figures indéformables*"²⁵⁴ repose sur un point plus fondamental encore, à savoir la rigidité des figures et des instruments de mesure. "*Toutes les mesures d'espace et plus généralement toutes les estimations engageant la possibilité d'appliquer les concepts de grandeurs à l'espace supposent comme leur préalable que l'on puisse déplacer les figures spatiales sans pour autant modifier leur grandeur ou leur forme*"²⁵⁵. Cette rigidité garantit en effet une permanence de leur forme et de leur dimension, une régularité qui permet de procéder à des superpositions et d'établir des congruences entre les différentes mesures que nous pourrions en faire quand ils sont déplacés. Le monde physique est en effet caractérisé par le fait qu'il permet une mobilité de certains objets sans qu'ils ne soient modifiés : une

²⁵¹ Ly I. (2005) L'espace est-il un concept? Mesure et géométrie dans l'œuvre philosophique de Poincaré.

²⁵² Helmholtz H. von (1870) Sur l'origine et la signification des axiomes géométriques. In : "*Les fondements de la géométrie*", traduction de D. Mascré, Reims: Editions de l'infini, 2008, page 145.

²⁵³ *Ibid.*

²⁵⁴ *Ibid.* page 116.

²⁵⁵ *Ibid.* page 144.

brique de forme parallélépipède ne se transforme pas en cône quand elle est soumise à un déplacement d'un lieu à un autre. Un drapeau en revanche est un objet non rigide; il change de forme quand il est mis en mouvement.

1.3.8.1.1. La thèse physique de l'espace

Cette conception basée sur la rigidité contraste avec le contenu des sensations que nous procurent les objets. Comme le rappelait Ernst Mach²⁵⁶, les objets ne bougent pas dans le monde sans être soumis à des déformations visuelles telles que l'expansion, quand ils se rapprochent de nous, ou la contraction, quand ils s'éloignent. En fait, Hermann von Helmholtz expose ici une thèse réaliste de l'espace où la structure interne de l'individu, qu'il s'agisse de son intuition, de son intelligence ou de sa constitution cérébrale, n'importe peu dans la détermination de la géométrie qu'il emploierait. La géométrie serait en fait déterminée par le monde dans lequel vit l'individu et par les mouvements qu'il est autorisé à y faire. *"Selon le type d'espace dans lequel on habite, on est nécessairement conduit à édifier des systèmes d'axiomes différents et ce, sans que pour autant les êtres habitant ces espaces aient nécessairement des structures [cérébrales]... et des capacités mentales différentes des nôtres"*²⁵⁷. Par une série d'expériences de pensée, il nous invite à imaginer des êtres doués de raison vivant et se déplaçant à la surface d'une sphère. De tels êtres bidimensionnels seraient incapables de se représenter quelle figure spatiale serait engendrée par le mouvement d'une surface hors de leur espace à deux dimensions de la même manière que nous sommes incapables de nous représenter visuellement le mouvement d'un cube en dehors de notre espace à trois dimensions. *"Lorsqu'on ... ne dispose d'aucune impression sensible permettant de se faire une idée d'un ... processus jamais observé, alors il est clair qu'une telle "représentation" est impossible au même titre qu'il est impossible à un aveugle de naissance de se "représenter" les couleurs et ce, quand bien même on serait en mesure de lui en donner une description conceptuelle"*²⁵⁸. En revanche, ces êtres n'auraient pas de mal à imaginer qu'un point en mouvement décrit un segment, qu'un segment en mouvement décrit une

²⁵⁶ Mach E. (1901) On physiological, as distinguished from geometrical, space. *The Monist* 11: 321-338.

²⁵⁷ *Ibid.* page 120. Nous avons remplacé le mot "cortical" par "cérébral" car il est possible que les raisonnements géométriques ne se résument pas à des activités qui se cantonnent aux territoires corticaux mais se propagent pas à d'autres étages cérébraux

²⁵⁸ *Ibid.* page 118.

surface. Ils pourraient découvrir que les prolongements d'un segment ne disparaissent pas à l'infini mais qu'ils finissent par se rejoindre. En se déplaçant suffisamment longtemps le long de l'un de ces prolongements, ils constateraient en effet qu'ils finissent toujours par revenir à la situation de départ, un cas inenvisageable sur le plan euclidien. Les êtres de ce monde pourraient aussi découvrir qu'à partir de n'importe quel point sur cette surface, quel que soit le chemin emprunté, il existe un deuxième point vers lequel ils passeraient inévitablement, le point diamétralement opposé. Ces deux découvertes les amèneraient à conclure qu'entre ces deux points, il passe une infinité de lignes; une conclusion qui contredit un des postulats de la géométrie euclidienne. En résumé, les êtres qui vivent à la surface de ce monde seraient conduits à développer une géométrie différente de la géométrie euclidienne.

Helmholtz poursuit sa démonstration en proposant d'imaginer des êtres qui vivraient à la surface d'un corps qui cette fois ne serait plus sphérique mais ovoïde. Ces êtres s'apercevront alors que la somme des angles d'un triangle diffère selon l'endroit où elle est mesurée: "*sur une telle surface, il est impossible ne serait-ce que de déplacer d'un lieu à un autre une forme aussi simple que celle du triangle sans que cette forme ne subisse une modification*"²⁵⁹. Or une propriété géométrique suppose la possibilité de déplacer librement une figure quelconque sans que la mesure de sa longueur ou de ses angles ne change. Si ce n'était pas le cas, les mesures ne seraient valides que pour une zone étroite et il faudrait connaître les variations de courbure de la surface au départ de chaque situation. Une géométrie n'est donc possible que si la courbure mesurée présente la même valeur, idéalement en tout point de la surface, ou tout au moins sur celle où la précision des mesures est requise. Hermann von Helmholtz prend soin de rendre hommage au mathématicien Carl F. Gauss d'avoir découvert qu'"*une propriété géométrique est une propriété propre à cette surface lorsqu'il est possible de déplacer librement les figures inscrites dans cette surface sans modifier les longueurs et les angles de ces figures mesurés le long de cette surface*"²⁶⁰. Cette propriété propre aux surfaces est la courbure. Sa mesure ne change pas tant que la surface n'est soumise à aucune dilatation ou torsion. Ainsi, la géométrie du plan est la même que celle du cylindre ou du cône car il est possible d'appliquer et de faire glisser une feuille de papier quadrillé sur le cylindre ou le cône sans que les mesures de longueur faites entre différents

²⁵⁹ *Ibid.*, page 121.

²⁶⁰ *Ibid.*, page 121.

points ne soient altérées par les glissements du quadrillage. En revanche, la géométrie du plan ne convient pas pour mesurer les distances entre des points situés à la surface ou à l'intérieur d'une sphère (dont la courbure est constante et positive) ou d'une pseudo-sphère (courbure constante négative). Des erreurs de mesure apparaissent dont l'ampleur augmente avec la distance par rapport au point d'ancrage du quadrillage avant de procéder à l'opération de mesure. *"De là, nous voyons que dans la géométrie à deux dimensions, l'hypothèse selon laquelle toute figure peut être, sans modification aucune de ses dimensions dans la surface, déplacée selon toutes les directions, caractérise en réalité trois types de surface qui sont respectivement le plan, la sphère et la pseudo-sphère"*²⁶¹. La géométrie euclidienne n'est donc qu'un cas particulier parmi les trois géométries possibles applicables aux surfaces présentant une courbure constante. Les axiomes sont déterminants : celui *"selon lequel entre deux points quelconques il n'existe jamais qu'un plus court chemin distingue le plan et la pseudo-sphère de la sphère tandis que l'axiome des parallèles distingue le plan de la pseudo-sphère"*²⁶². En géométrie euclidienne, la somme des angles du triangle formé par trois points est égale à l'angle plat (180 degrés) tandis qu'elle est inférieure à 180 degrés en géométrie hyperbolique (géométrie à courbure négative) et supérieure à 180 degrés en géométrie sphérique (géométrie à courbure positive).

Quelques années plus tard, le mathématicien David Hilbert (1862-1943) montrera que les propositions de l'une de ces géométries, bien qu'elles découlent de différents ensembles d'axiomes et qu'elles mènent vers des théorèmes différents, peuvent être traduites non seulement dans une autre mais surtout, dans l'analyse mathématique, et donc dans le domaine des nombres réels. L'existence de dictionnaires permettant de traduire une proposition formulée selon différents formats mathématiques suggère l'existence de quelque chose qui siège en amont de sa formulation. De la même manière que différentes formulations exprimées dans des langues différentes peuvent signaler le vol groupé d'oiseaux migrateurs dans le ciel, il y a bien quelque chose de réel au-delà des géométries. Cette découverte implique aussi que l'analyse et les différentes géométries *"partagent le même destin"* dans le

²⁶¹ *Ibid.*, page 125-126.

²⁶² *Ibid.*, page 125.

sens où *“toute contradiction qui apparaît dans un système entraîne infailliblement une contradiction de même type dans l’autre système”*²⁶³.

La possibilité de se mouvoir librement sans subir de déformation est une condition nécessaire à la constitution d’un espace géométrique. Hermann von Helmholtz explique que *“l’espace ... ne correspond en aucune façon au concept en général d’une variété à trois dimensions ... [;] il renferme encore des déterminations particulières qui sont conditionnées par la mobilité libre des corps solides dont la forme demeure invariante selon tous les lieux et selon toutes les directions possibles”*²⁶⁴. Cette limitation de l’espace géométrique à l’ensemble des déplacements des corps solides est restrictive car elle implique qu’une géométrie ne soit pas possible si la forme change en fonction de la vitesse de déplacement, comme on peut fréquemment l’observer chez certains animaux. Pour prendre un exemple, une hirondelle en vol n’a rien de comparable à la courbe parabolique d’une brique lancée en l’air. Les capacités de certains animaux à explorer librement leur environnement avec des auto-ajustements morphologiques, mettent en jeu des complexes d’impressions internes dont nous avons du mal à imaginer non seulement le nombre de dimensions dans le fonctionnement cérébral, mais aussi quelle géométrie pourrait en être abstraite. Selon Helmholtz, cette difficulté que nous avons trouverait son origine dans notre constitution corporelle. Il explique en effet que *“lorsque nous voulons nous transporter par l’imagination au-delà de l’espace à trois dimensions, nous nous apercevons que nous sommes conditionnés par la constitution de nos organes et dépendants des informations expérimentales que ceux-ci nous livrent, informations qui ne sont adaptés qu’à l’espace dans lequel nous vivons”*²⁶⁵. Pourtant, il est possible que la difficulté ne se trouve que dans l’imagination et qu’elle ne soit pas insurmontable si nous nous dotons d’instruments adaptés à nos capacités sensorimotrices. Les difficultés de l’imagination résident dans les “instruments” cognitifs que nous mettons en œuvre. Grâce à Joseph-Louis Lagrange et le développement de la géométrie analytique, les relations spatiales vont par exemple pouvoir être ramenées à des mesures, c’est-à-dire des grandeurs numériques (longueur, angle, surface, volume) et les problèmes de géométrie qui dépassent nos capacités

²⁶³ Cassirer E. (1995) *Le problème de la connaissance dans la philosophie et la science des temps modernes*. volume 4 De la mort de Hegel aux temps présents. Les éditions du Cerf, Paris, page 37.

²⁶⁴ *Ibid.*, page 131.

²⁶⁵ *Ibid.*, page 126.

de représentation vont pouvoir être résolus par des méthodes de calcul. En pratique, une correspondance est en effet établie entre d'un côté, les zones du monde qui sont mesurées, et de l'autre, les grandeurs numériques correspondant à leurs coordonnées dans un référentiel préalablement défini. Les démonstrations géométriques peuvent ainsi être ramenées à des séries de calculs numériques. A des rapports de distance et de situation entre différentes zones du monde correspondent des rapports de coordonnées numériques. Comme l'explique Ernst Mach, "*l'emploi des coordonnées cartésiennes affranchit la géométrie de certaines influences physiologiques ; pourtant nous distinguons encore des coordonnées positives ou négatives, suivant qu'elles sont comptées vers la droite ou vers la gauche, vers le haut ou vers le bas. C'est commode et intuitif, mais ce n'est pas nécessaire. L'usage d'un quatrième plan de coordonnées, ou la détermination d'un point par ses distances à quatre autres points, non situés dans un même plan, nous dispense de recourir à des considérations physiologiques en géométrie*"²⁶⁶. Toutes ces remarques démontrent le caractère simpliste de l'idée selon laquelle des opérations géométriques se cacheraient derrière les processus neurophysiologiques mis en œuvre pendant le déplacement d'un corps.

1.3.8.1.2. La thèse physiologique de l'intuition spatiale

En géométrie analytique, l'emplacement des objets, leurs dimensions deviennent des ensembles de mesures de distance par rapport à un point de contact, une référence. Hermann von Helmholtz va faire un rapprochement entre, d'une part, les mesures faites par le géomètre, et d'autre part, ce qui dans notre esprit ou dans l'activité cérébrale, est engendré lorsque nous mettons en mouvement les segments mobiles mais rigides de notre corps. En effet, "*lorsque nous effectuons une mesure, nous ne faisons en réalité que prolonger par des moyens plus sophistiqués et à l'aide d'instruments plus fiables ... ce que nous faisons normalement par l'observation en nous servant de nos yeux, de notre sens du toucher, ou de nos mesures d'arpentage. Dans ces derniers cas, c'est notre corps avec ses organes qui constitue l'instrument de mesure au moyen duquel nous explorons l'espace ... Ce sont nos mains, nos jambes ou notre œil alternativement braqué dans les différentes directions qui deviennent ainsi ce théodolite au moyen duquel nous mesurons les arcs de longueur ou les angles des surfaces qui se présentent dans notre champ de vision*"²⁶⁷. Sur la base de cette

²⁶⁶ Mach E. (1919) *La connaissance et l'erreur*. Paris : Flammarion, page 339.

²⁶⁷ Helmholtz H. von (1870) *Op. cit.* page 137.

comparaison, il est légitime de nous demander si les animaux, par leurs propres mouvements, font de la géométrie, et donc, si à quelque activité dans le fonctionnement cérébral peut correspondre quelque chose de quantitatif. Une grande majorité des animaux sont capables en effet, d'un seul mouvement, d'orienter très rapidement leur regard vers l'endroit où se produit quelque chose. Lorsque son transport commence vers un objet pour le saisir, la main présente une ouverture ajustée à la taille de celui-ci²⁶⁸. Les animaux se montrent aussi capables de retrouver des lieux situés parfois à des distances considérables de l'endroit où ils se trouvent. Toutes ces habiletés spatiales mettent-elles en œuvre une seule ou plusieurs opérations implicites de mesure? Si les globes oculaires, l'index de la main, les quatre pattes ou les deux jambes peuvent être assimilés à des instruments de mesure en vertu de leur rigidité et de la possibilité de leur attribuer un ensemble de valeurs numériques, nous verrons dans un prochain chapitre que les activités qui se propagent entre la rétine et les muscles, ne sont quant à elles, ni rigides ni spatio-temporellement ponctuelles. Dans ces conditions, l'établissement d'une correspondance entre les notions et les mesures physiques et les mesures électrophysiologiques est un problème loin d'être trivial.

Cette remarque est l'occasion de se poser la question de savoir si une structure géométrique interne guide l'organisme animal pendant qu'il produit des mouvements et de tenter de définir ce qu'elle est, c'est-à-dire de savoir s'il s'agit de ce bloc monolithique que certains ont appelé "espace", et si c'est le cas, d'en rechercher les principes ou les axiomes. Le développement du corps avec l'âge, les récupérations fonctionnelles observées à la suite de certains micro-accidents vasculaires cérébraux et l'apprentissage de mouvements réalisés dans des milieux diversifiés, assistés d'interfaces mécaniques, parfois propulsives, sont l'occasion de d'impressions sensorielles et de commandes motrices absolument nouvelles, étrangères à toute expérience préalable, ontogénétique et phylogénétique. Ensemble, ces facteurs intrinsèques et extrinsèques mettent à l'épreuve une structure permanente interne. Hermann von Helmholtz faisait appel à une certaine invariance des sensations. Il explique en effet que "*nous changeons volontairement et à notre gré une partie des conditions sous lesquelles [un] objet est perçu. Nous savons que les modifications que subit alors la manière dont les objets se présentent à nous, n'ont pas d'autre cause que les mouvements que nous*

²⁶⁸ Jeannerod M. (1997) *The cognitive neuroscience of action*. Oxford: Blackwell.

avons exécutés. Nous obtenons ainsi une série de notions du même objet pour lesquelles nous nous assurons, avec une certitude expérimentale, qu'elles ne sont que des notions différentes d'un même objet invariable, qui est leur cause commune"²⁶⁹. Transposée dans les flux d'activité cérébrale, cette invariance pourrait résulter du fait que nos mouvements conduisent à faire converger les sensations vers un même ensemble, vers un même bassin, comme c'est le cas dans la fovéation ou dans la saisie manuelle. Les mouvements permettent de confirmer la présence des objets qui sont en dehors de nous mais surtout ceux avec lesquels nous établissons volontairement des contacts. Un petit mouvement suffit pour rétablir les impressions sensorielles évanouies résultant de la présence d'un objet, comme celui des orteils de nos pieds qui nous rappelle le port de chaussures. "*Dans ces expérimentations sur les objets, on voit qu'une partie des modifications de nos sensations dépend de notre propre volonté, et qu'une autre partie, c'est-à-dire tout ce qui dépend de la structure de l'objet que nous avons devant nous, s'impose à nous avec une nécessité que nous ne pouvons pas modifier à notre gré ... C'est ainsi que nous arrivons à reconnaître à nos sensations une cause indépendante de notre volonté et de notre imagination, et par conséquent, extérieure*"²⁷⁰. Pour Helmholtz, "*les mouvements des yeux permettent ... d'apprendre quelle est la disposition des points du champ de la vision, c'est-à-dire d'apprendre quels sont les signes locaux des sensations qui répondent aux points immédiatement voisins. La loi spéciale des mouvements oculaires détermine ensuite quelles sont les étendues du champ visuel dont il est possible ou non de comparer exactement les grandeurs. On peut comparer exactement celles dont les images peuvent être amenées sur les mêmes points ou lignes de la rétine par de simples mouvements de l'œil*"²⁷¹. L'intuition de l'espace serait alors construite par apprentissage. Nous passerions du domaine des sensations à l'intuition du monde "extérieur" grâce à l'exercice répété, à la mémoire mais aussi au principe de causalité. "*Nous avons besoin [de ce dernier] pour parvenir à savoir qu'il y a des objets autour de nous dans l'espace, objets entre lesquels un rapport de cause à effet peut exister*"²⁷². Helmholtz considère le principe de causalité comme une loi a priori de notre pensée, préalable à toute expérience. L'intuition de l'espace,

²⁶⁹ Helmholtz H. von (1865) *Optique physiologique*. Tome 3. Traduction française par E. Javal & N. Th. Klein. Paris: Masson, page 590.

²⁷⁰ *Ibid.*

²⁷¹ Helmholtz H. von (1865) *Op. cit.*, page 1004.

²⁷² Helmholtz H. von (1855) Sur le voir humain. *Philosophia Scientiae* 14: 13-35.

en revanche, n'est ni innée ni donnée a priori; elle est apprise et construite par les mouvements d'orientation de nos yeux. Comparant l'automatisme des mouvements oculaires aux automatismes du jongleur, il explique que "*l'exercice répété et l'éducation de nos organes sensoriels*"²⁷³ permet de rendre compte de la sûreté et de la précision de nos gestes et que c'est une inférence inconsciente. "*Les activités psychiques qui nous amènent à conclure qu'un objet déterminé, de structure déterminée, se trouve en un endroit déterminé qui est en dehors de nous, ne sont pas, en général, des actes conscients mais des actes inconscients. Dans leurs résultats, ils sont analogues à des conclusions, puisque l'effet que nous observons sur nos sens nous amène à nous représenter une cause de cet effet; mais en réalité nous ne pouvons percevoir directement que les excitations nerveuses, c'est-à-dire les effets et jamais les objets extérieurs.*"²⁷⁴

L'appréciation de la position des objets relèverait de l'activité cérébrale qui est mise en œuvre à l'occasion des mouvements volontaires. "*La position que présentent les objets, par rapport à notre corps, est appréciée à l'aide du sentiment d'innervation des nerfs oculaires, mais elle est contrôlée à chaque instant d'après le résultat, c'est-à-dire d'après le déplacement que les innervations impriment aux images*"²⁷⁵. Au-delà du fait que les mouvements s'accompagnent de changements dans nos relations avec les objets, les impulsions mises en œuvre pendant l'exécution des mouvements volontaires seraient à la base de toute perception relative aux objets dans l'espace : "*l'impulsion au mouvement que nous donnons à travers l'innervation de nos nerfs moteurs est quelque chose d'immédiatement perceptible... Maintenant, lorsque nous donnons des impulsions de ce genre –tourner le regard, bouger les mains, aller et venir-, nous découvrons que les sensations appartenant à certains "cercles de qualités" (notamment celles relatives aux objets spatiaux) peuvent de cette manière être modifiées. D'autres états psychiques dont nous sommes conscients : souvenirs, intentions, souhaits, humeurs, ne peuvent absolument pas l'être ... Si nous voulons appeler spatiale la relation que nous modifions de façon immédiate par les impulsions de notre volonté..., alors les perceptions d'activités psychiques n'entrent absolument pas dans une relation de ce*

²⁷³ *Ibid.*

²⁷⁴ Helmholtz H. von (1821-1894). *Optique physiologique*, Tome 3: Masson, page 564.

²⁷⁵ Helmholtz H. von (1865) *Ibid.*, page 1005.

genre"²⁷⁶. C'est avec cette explication que Helmholtz rejoint la position de Kant en déclarant l'espace, une forme subjective, nécessaire et *a priori* de l'intuition externe : "*De ce point de vue, l'espace apparaîtrait ... comme la forme nécessaire de l'intuition externe, précisément parce que nous comprenons comme monde extérieur ce que nous percevons comme déterminé spatialement, ... une forme donnée de l'intuition, fournie avant toute expérience, dans la mesure où sa perception serait liée à la possibilité d'impulsions motrices volontaires, dont la capacité mentale et physique doit nous être donnée par notre organisation avant que nous puissions avoir l'intuition spatiale*"²⁷⁷. Pour un observateur situé dans un environnement d'objets au repos, "*les sensations restent inchangées aussi longtemps qu'il ne donne pas d'impulsion motrice. S'il donne une semblable impulsion (par exemple s'il bouge les yeux ou ses mains, s'il avance), alors les sensations changent; et si ensuite, par relâchement ou par l'impulsion contraire adéquate, il revient à son état antérieur, alors toutes ses sensations redeviennent celles du début*"²⁷⁸. Des travaux réalisés chez le singe par le neurophysiologiste David Sparks montreront que cette invariance nécessite la présence des objets. Quand on considère par exemple la précision avec laquelle les saccades oculaires indiquent leur emplacement, on trouve qu'elle dépend considérablement de leur présence. Lorsqu'elle est produite dans le futur très proche, la saccade est précise. Elle confirme la présence de l'objet et son emplacement par un ensemble de sensations qui est toujours le même, celles qui caractérisent la fovéation. La mensuration spatiale faite par les saccades est pour ainsi dire fiable. Mais lorsque la saccade est produite après un délai, même relativement court, la mensuration oculaire n'est plus fiable du tout²⁷⁹. Les sensations visuelles ne peuvent plus confirmer la présence de l'objet puisqu'il a disparu mais les sensations motrices sont variables. Autrement dit, tout se passe comme si l'invariance de l'espace visuel nécessitait la présence des objets.

²⁷⁶ Helmholtz H. von (1878, 2003) Les faits dans la perception. *Philosophia Scientiae* 7: 49-78, page 57-58.

²⁷⁷ *Ibid.*, page 58.

²⁷⁸ *Ibid.*, page 59.

²⁷⁹ White J.M., Sparks D.L. & Stanford T.R. (1994). Saccades to remembered target locations: an analysis of systematic and variable errors. *Vision Research* 34: 79-92; Barton E.J. & Sparks D.L. (2001) Saccades to remembered targets exhibit enhanced orbital position effects in monkeys. *Vision Research* 41: 2393-2406.

1.3.8.2. La thèse conventionnaliste de Henri Poincaré

Dans la préface de l'édition anglaise de son ouvrage intitulé "*La science et l'hypothèse*", Henri Poincaré (1854-1912) déclarait "*Space is only a word that we have believed to be a thing*"²⁸⁰. A côté de cette conception nominaliste, il imaginait cependant un espace représentatif et une géométrie primitive et grossière de laquelle la "*géométrie des géomètres*" serait née, "*fécondée par la faculté de construire des concepts mathématiques, tels que celui de groupe*", raffinée ensuite par notre recherche "*parmi les concepts purs [de] celui qui s'adaptait le mieux à cet espace grossier*"²⁸¹. Cette géométrie primitive consiste selon lui en une sorte de "*tableau de distribution*", hérité de l'évolution mais tout de même plastique, où les associations se font entre les signaux du monde physique détectés par nos sens et les mouvements de réaction. La motricité volontaire joue un rôle permissif dans la constitution de cet espace grossier et le développement d'une géométrie instinctive. Le mouvement est pour lui l'occasion de distinguer les impressions sensorielles causées par les déplacements et celles correspondant aux changements d'états. Les sensations peuvent en effet être soumises à deux types de changement, les changements internes accompagnés de sensations musculaires et les changements externes qui n'en sont pas accompagnés. Les déplacements correspondent aux changements externes qu'un mouvement volontaire peut corriger pour rétablir les sensations d'origine²⁸². Comme nous l'avons vu chez Ernst Mach et Hermann von Helmholtz, Henri Poincaré défendait l'idée qu' "*un être qui ne pourrait pas se mouvoir serait incapable de faire cette distinction [et] ... par conséquent, ne pourrait jamais créer la géométrie*". La raison qu'il invoque est tout à fait originale: "*la géométrie ne serait pas née si nous n'avions pas été amenés à répartir en deux classes les changements que peuvent subir nos impressions*"²⁸³. Le rôle de la motricité résiderait dans le fait que certains changements externes peuvent être corrigés, compensés par des changements internes voulus, qu'une action puisse ramener les impressions à leur état d'origine. Les changements externes qui peuvent être compensés acquièrent selon Poincaré un statut différent des autres: ce sont des

²⁸⁰ Poincaré H. (1913) *The foundations of science: Science and hypothesis, the value of science, science and method*. New York: The Science Press, cité par DJ Stump (2015) *Conceptual changes and the philosophy of science. Alternative interpretations of the a priori*. London : Routledge.

²⁸¹ Poincaré H. (1906). La relativité de l'espace. *L'année psychologique* 13: 1-17.

²⁸² Poincaré H. (1921) *Op. cit.*, pages 12-14.

²⁸³ *Ibid.*, page 14.

déplacements. Les autres sont qualifiés de changements d'état. Des changements externes sont rassemblés dans la même classe de déplacement quand c'est le même changement interne qui les corrige. Même s'ils n'ont rien en commun, ils sont rassemblés parce qu'ils provoquent les mêmes sensations, motrices ou musculaires. De même, des changements internes différents qui permettent de corriger le même changement externe représentent aussi le même déplacement. A partir de cette classification, Poincaré nous fait remarquer que l'ensemble des déplacements forme ce que les mathématiciens appellent un groupe et que c'est en vertu de cette structure que l'espace acquiert la propriété d'être homogène, isotrope et illimité: *"si un déplacement D me transporte d'un point à un autre ou change mon orientation, je dois être, après ce déplacement D, encore capable des mêmes mouvements qu'avant le déplacement D, et ces mouvements doivent avoir conservé leurs propriétés fondamentales qui m'ont permis de les classer parmi les déplacements. S'il n'en était pas ainsi, le déplacement D suivi d'un autre déplacement ne serait pas équivalent à un troisième déplacement ; en d'autres termes les déplacements ne formeraient pas un groupe. Ainsi, le nouveau point auquel j'ai été transporté joue le même rôle que celui auquel j'étais initialement ; ma nouvelle orientation joue aussi le même rôle que l'ancienne ; l'espace est homogène et isotrope. Etant homogène il sera illimité; car une catégorie qui est limitée ne saurait être homogène puisque ses frontières ne pourraient pas jouer le même rôle que son centre"*²⁸⁴.

Comme Emmanuel Kant, Henri Poincaré défend que les idées géométriques pré-existent en nous, que *"la géométrie n'est pas une science expérimentale; l'expérience n'est pour nous que l'occasion de réfléchir sur les idées géométriques qui pré-existent en nous. Mais cette occasion est nécessaire"*. Aussi se démarque-t-il du philosophe de Königsberg quand il ajoute que *"l'espace n'est pas une forme de notre sensibilité; c'est un instrument qui nous sert, non à nous représenter, mais à raisonner sur les choses. Ce que nous appelons la géométrie n'est pas autre chose que l'étude des propriétés formelles d'un certain groupe continu; si bien que nous pouvons dire que l'espace est un groupe"*²⁸⁵. La notion de groupe est une structure mathématique qui définit un ensemble d'opérations tel que la combinaison de deux opérations appartient elle-aussi au groupe, qu'une opération inverse existe pour chaque opération permettant d'annuler cette dernière et qu'une opération neutre existe dont la

²⁸⁴ *Ibid.*, page 21.

²⁸⁵ Poincaré H. (2002) *L'opportunisme scientifique*. Basel : Birkhäuser, pages 30-31.

combinaison avec une autre opération est équivalente à cette dernière toute seule. Le groupe est une structure qui rend possible la géométrie, euclidienne ou non-euclidienne, mais aussi l'arithmétique. Pour Henri Poincaré, *"la notion de groupe continu existe dans notre esprit antérieurement à toute expérience"*²⁸⁶. Ainsi contrairement à ce que défendait Hermann von Helmholtz, la géométrie euclidienne ne correspondrait pas à une nécessité relevant de la structure propre au monde. Elle consiste en un ensemble de transformations dont l'utilisation s'est imposée à notre esprit, non pas en raison d'une imprégnation dans notre esprit d'une éventuelle structure intrinsèque au monde, mais simplement parce qu'elle est devenue une habitude de pensée. *"Transporté dans un autre monde, nous pourrions sans doute avoir une géométrie différente, non parce que notre géométrie aurait cessé d'être vraie, mais parce qu'elle serait devenue moins commode qu'une autre"*²⁸⁷. Autrement dit, d'autres mondes peuvent nous conduire à employer une géométrie qui ne soit pas euclidienne. Mais ce n'est pas nécessaire. Cette conception contraste avec la suggestion du physiologiste John O'Keefe, lauréat en 2014 du prix Nobel de médecine, pour qui *"la tri-dimensionnalité et la métrique euclidienne de l'espace neural sont dues aux bases du système plutôt qu'à n'importe quel aspect de l'environnement"*²⁸⁸. Or, il est non seulement peu probable mais il n'y a non plus aucune nécessité à ce que les dimensions du supposé "espace neural" soient limitées à trois comme l'expliquait Henri Poincaré, ni orthogonales les unes aux autres, comme le font remarquer aussi Andras Pellionisz et Rodolfo Llinas²⁸⁹.

Comme chez Helmholtz, le rôle de la motricité dans la constitution de la notion d'espace se met en place dans la mesure où les mouvements dirigés vers un but sont des occasions d'effectuer des opérations de mesure. *"Quant à la notion d'espace, elle ne peut faire partie intégrante d'aucune de nos sensations prises isolément. C'est seulement quand nous observons l'ordre dans lequel ces sensations se succèdent que cette notion peut prendre naissance"*²⁹⁰. Des êtres éprouvant ces sensations dans un ordre différent créeraient une géométrie différente. *"Notre intuition de l'espace ... se réduit à une association constante entre certaines sensations et certains mouvements. C'est dire que les membres avec lesquels*

²⁸⁶ *Ibid.*, page 63.

²⁸⁷ *Ibid.*

²⁸⁸ O'Keefe J. (1993) *Op. cit.* page 44.

²⁸⁹ Pellionisz A. & Llinas R. (1982) *Op. cit.*

²⁹⁰ Poincaré H. (1913) *Dernières pensées*, Paris : Flammarion, page 39.

nous faisons ces mouvements jouent aussi pour ainsi dire le rôle d'instruments de mesure"²⁹¹. Mais contrairement à Helmholtz et aussi à Kant, Henri Poincaré défend donc une conception selon laquelle que "*les axiomes géométriques ne sont ni des jugements synthétiques a priori ni des faits expérimentaux*". Ni notre esprit ni l'expérience ne nous imposent la géométrie euclidienne: "*nous choisissons cette géométrie-ci plutôt que celle-là, non parce qu'elle est plus vraie, mais parce qu'elle est plus commode*"²⁹². Les expériences sur les corps solides seraient l'occasion conduisant à choisir le groupe euclidien parmi tous les groupes de transformations possibles, parce qu'il est le plus simple. "*Traduit dans le langage analytique, ... [simple] veut dire qu'il y a moins de termes dans les équations*"²⁹³. Dit plus simplement encore, "*ce sont des conventions; notre choix, parmi toutes les conventions possibles, est guidé par des faits expérimentaux ; mais il reste libre et n'est limité que par la nécessité d'éviter toute contradiction ... En d'autres termes, les axiomes de la géométrie ne sont que des définitions déguisées*"²⁹⁴.

Alors que Kant déclarait qu'on pouvait concevoir un espace dans lequel on ne trouve aucun objet, Henri Poincaré affirme qu'il est "*impossible de se représenter l'espace vide; tous nos efforts pour imaginer un espace pur, d'où seraient exclues les images changeantes des objets matériels, ne peuvent aboutir qu'à une représentation où les surfaces fortement colorées, par exemple, sont remplacées par des lignes à faible coloration et l'on ne pourrait aller jusqu'au bout dans cette voie, sans que tout s'évanouisse et aboutisse au néant*"²⁹⁵. On retrouve ici sous une autre forme, la thèse spencérienne de la nécessité d'une notion (l'espace vide) en raison de l'inconcevabilité de sa négation. En fait, la philosophe Emilie du Châtelet (1706-1749) nous permet de comprendre que cette nécessité ne concerne pas l'espace mais les objets. Un peu comme Rudolf Lotze qui, deux siècles plus tard, déclarera que nous n'avons pas l'intuition vide de l'espace²⁹⁶, et donc s'opposera à ce que défendait Emmanuel Kant et ses successeurs, Emilie du Châtelet nous explique en effet que "*il n'y a d'Espace qu'en tant*

²⁹¹ *Ibid.*

²⁹² *Ibid.*

²⁹³ *Ibid.*, page 64

²⁹⁴ Poincaré H., La science et l'hypothèse, *Ibid.*, page 42.

²⁹⁵ Poincaré H., Science et méthode, In : *La science selon Henri Poincaré*, collection Idem, Paris: Dunod, 2013, page 385.

²⁹⁶ Voir la note 164. Lotze H. (1877) Sur la formation de la notion d'espace. Revue philosophique de la France et de l'Étranger 4: 345-368, page 365

qu'il y a des choses réelles et coexistantes; et sans ces choses, il n'y aurait point d'Espace: cependant, l'Espace n'est pas les choses mêmes, c'est un Etre qu'on en a formé par abstraction, qui ne subsiste point hors des Choses"²⁹⁷. De même, Henri Poincaré écrira dans la préface de l'édition anglaise (1913) de *La science et l'hypothèse* que "*l'espace n'est qu'un mot que nous avons cru être une chose*"²⁹⁸.

Le mathématicien-philosophe pousse ses réflexions épistémologiques sur ces cadres que nous imposons au monde, ces "*instruments que les mathématiques mettent entre les mains du chercheur*"²⁹⁹ pour interroger la nature. Car s'ils ne sont pas constitutifs de la nature mais qu'ils sont "*l'œuvre de la libre activité de notre esprit*"³⁰⁰, nous pouvons effectivement risquer de tout fausser. Certes ces décrets ne sont pas posés arbitrairement, ils sont guidés par l'expérience, soumis à des soucis de simplicité et d'efficacité. "*Sans doute la raison a ses préférences, mais ces préférences n'ont pas ce caractère impératif. Elle a ses préférences pour le plus simple, parce que toutes choses égales d'ailleurs, le plus simple est le plus commode*"³⁰¹. La multiplicité des instruments qui peuvent être employés pour résoudre un problème pose la question d'une catégorie d'ordre supérieur qui les rassemble tous et les rend valide. La simplicité d'un instrument peut cependant résulter de sa familiarité, des habitudes que nous avons acquises à le manier. Elle peut résulter aussi de leur accessibilité, de la manière avec laquelle ils viennent compléter nos capacités sensorimotrices. Quant à son efficacité, elle est étroitement dépendante de notre capacité à comprendre la nature du problème et à l'exploiter de manière féconde.

²⁹⁷ Du Châtelet E (1742) *Institutions de Physique*, Paris : Prault, Page 107.

²⁹⁸ Poincaré H. (1913) *The foundations of science: Science and hypothesis, the value of science, science and method*. New York: The Science Press, cité par DJ Stump (2015) *Conceptual changes and the philosophy of science. Alternative interpretations of the a priori*. London : Routledge.

²⁹⁹ Poincaré H., *La science et l'hypothèse*, *Ibid.*, page 5.

³⁰⁰ Poincaré H. , *La science et l'hypothèse*, *Ibid.*, page 4.

³⁰¹ Poincaré (1921) *Des fondements de la géométrie*, Paris: Chiron, page 64

2. LE CERVEAU ET LES MÉTHODES POUR ÉTUDIER SON FONCTIONNEMENT

“Les objets mathématiques s’identifient à des états physiques de notre cerveau de telle sorte qu’on devrait en principe pouvoir les observer de manière extérieure grâce à des méthodes d’imagerie médicale”³⁰²

“Le concept de groupe ne se limite ni au cercle des mathématiques ni à celui de la géométrie; ni au domaine du nombre ni à celui de la quantité. Par ce concept, nous nous élevons au-dessus de toute considération d’éléments déterminés de la pensée mathématique pour accéder à une théorie des opérations... Nous sommes entièrement dans le champ des pures mathématiques intellectuelles”.³⁰³

Le système nerveux est un ensemble multicellulaire d’une très grande complexité, situé à l’interface d’une multitude de cellules diversement sensibles à différentes catégories de stimulations (mécaniques, chimiques et photoniques) et d’un ensemble de fibres musculaires dont la contraction peut entraîner le mouvement de différentes parties du corps. Cet organe nous dote de la capacité de non seulement réagir aux sollicitations de notre environnement extracorporel et corporel, d’en garder une mémoire (on parle de trace mnésique) et d’agir même en l’absence de sollicitations externes. Toute altération de son fonctionnement entraîne un handicap dont la nature et la sévérité dépendent souvent de sa localisation dans le cerveau. Par exemple, un accident vasculaire localisé au niveau d’une région particulière du cortex cérébral retire à la personne la possibilité de parler ou de communiquer tandis qu’une lésion située ailleurs conduit la personne à considérer une de ses propres mains comme ne lui appartenant pas. Une autre lésion plus postérieure retire au patient la capacité de témoigner de la présence d’un objet visuel sans néanmoins lui ôter totalement la capacité de l’attraper. Un autre accident vasculaire plus profond, au niveau du bulbe rachidien, provoque des altérations visuelles telles, que la perception visuelle du monde se retrouve basculée d’un angle de 90 degrés ou inversée, le haut étant perçu en bas et

³⁰² Changeux J.-P. & Connes A. (1989) *Op. cit.* page 30.

³⁰³ Cassirer E. (1995) *Le problème de la connaissance dans la philosophie et la science des temps modernes. volume 4 De la mort de Hegel aux temps présents.* Paris: Les éditions du Cerf, page 58.

inversement. Certains de ces patients rapportent percevoir le personnel soignant se diriger vers eux en marchant sur le mur ou alors accrochées au plafond. Les études cliniques menées auprès des patients cérébro-lésés rapportent ainsi une multitude d'observations précieuses qui nous montrent à quel point le monde que nous percevons et dans lequel nous agissons peut se retrouver chamboulé dès lors que l'organe cérébral ne fonctionne plus normalement. En contraste avec le caractère apparemment monolithique de notre conscience, la diversité des symptômes neurologiques est à l'image de la complexité et de la diversité des territoires et des réseaux qui constituent notre cerveau.

2.1. L'approche anatomique

Parallèlement aux études neurologiques et neuropsychologiques menées chez le patient cérébro-lésé, une communauté de chercheurs s'attèle à étudier chez diverses espèces animales, vertébrées mais aussi invertébrées, ce qu'est le système nerveux et à comprendre comment il fonctionne. Les neuro-anatomistes étudient sa structure matérielle et font apparaître une organisation réticulaire pareille à celle d'une sorte d'atlas routier tridimensionnel où une catégorie de cellules appelées neurones sont regroupées, comme des maisons, soit au sein d'amas plus ou moins compacts appelés noyaux, soit le long de couches plus ou moins étendues (comme les cortex cérébral ou cérébelleux). Chacun de ces neurones présente la caractéristique d'avoir des prolongements dont l'un, appelé axone, s'étire en direction d'autres cellules situées à proximité, dans d'autres noyaux ou sur d'autres couches, à une distance parfois de plusieurs dizaines de centimètres, comme par exemple les cellules dites corticospinales dont l'activité permet d'amener l'index contre le pouce de la main et ainsi, de faire une sorte de pince qui nous permette de cueillir une framboise sans l'écraser par exemple. L'extrémité arborescente du prolongement axonal de chaque neurone se ramifie en petits renflements (appelés boutons) qui viennent contacter soit plusieurs autres cellules nerveuses au niveau de zones appelées synapses, soit une ou plusieurs fibres musculaires. Comme dans un atlas routier, plusieurs chemins mènent d'un groupe cellulaire à l'autre. Certains chemins empruntent des trajets directs mettant en jeu un nombre plus ou moins grand de voies (comme dans les autoroutes); elles sont aussi plus rapides. D'autres chemins sont indirects et complètent les précédents en transitant par d'autres noyaux ou d'autres ensembles cellulaires. Le système nerveux consiste en un empilement d'une multitude de

réseaux plus ou moins dépendants les uns des autres, à l'image de tous ces réseaux qui composent une cité, avec ses réseaux filaires électriques et téléphoniques, ses réseaux d'approvisionnement en eau et en gaz, ses multiples réseaux de transport automobile, cycliste, piétonnier, publics ou privés. Dans une cité, les réseaux remplissent différentes fonctions. Dans le cerveau, les chercheurs sont enclins à penser qu'il en est de même mais leur caractérisation est loin d'être aisée car les études électrophysiologiques et lésionnelles révèlent plutôt une plurifonctionnalité.

2.2. L'approche électrophysiologique

D'autres chercheurs étudient les propriétés électrochimiques des cellules nerveuses et découvrent un moment tout à fait singulier dont la durée est extrêmement brève (de l'ordre d'une milliseconde) et au cours duquel un changement se produit dans les échanges ioniques entre les compartiments situés de part et d'autre de la membrane cellulaire. Les concentrations chimiques et l'ionisation différentes des atomes entre l'extérieur et l'intérieur de la cellule créent des gradients chimiques et électriques. Une différence de potentiel électrique crée alors une migration des atomes et un flux de courant dont on peut enregistrer la trace avec une micro-électrode. Le signal électrique enregistré est appelé potentiel d'action. Celui-ci est rarement observé isolément. Quand la pointe d'une micro-électrode est acheminée à proximité d'un neurone qui innerve par exemple les fibres constitutives d'un muscle extraoculaire, on découvre que cette cellule émet régulièrement et continuellement des potentiels d'action alors que l'œil ne bouge pas. En fait, cette activité spontanée entretient le tonus du muscle innervé par l'axone de la cellule enregistrée. Une augmentation du taux d'émission de potentiels d'action par un ensemble de cellules provoque la contraction des fibres musculaires, laquelle entraîne un raccourcissement du muscle, changeant par conséquent l'orientation de l'œil. La direction du mouvement oculaire est définie par l'endroit où se trouvent les attaches tendineuses du muscle sur le globe oculaire. Réciproquement, une réduction de la cadence des potentiels d'action va relâcher les fibres musculaires et entraîner un allongement du muscle. L'orientation de l'œil va alors changer dans la direction diamétralement opposée à condition que la contraction des autres muscles ne change pas. Le maintien du tonus des autres muscles extra-oculaires est en effet important car s'il change, la direction du mouvement ne sera pas la même. L'activité spontanée n'est pas limitée à

l'innervation des muscles extra-oculaires. Elle caractérise aussi cette innervation des muscles qui soutiennent la posture de notre corps, comme ces muscles du cou et de la nuque qui nous permettent de tenir la tête droite et de ne pas tomber comme cela peut nous arriver dans le train par exemple, au moment de l'assoupissement. L'activité spontanée n'est pas non plus limitée à l'innervation musculaire. On l'observe aussi au niveau des cellules réceptrices des stimulations sensorielles, comme dans les noyaux vestibulaires par exemple, ou au niveau des cellules situées plus centralement dans le cerveau. Entre les sollicitations sensorielles et la motricité se trouve un réseau massif de neurones spontanément actifs, même lorsque rien ne se passe du point de vue d'un observateur extérieur. Les cellules et les connexions qui véhiculent les activités spontanées sont tellement nombreuses et diversifiées qu'elles empêchent toute similitude inter-individuelle.

Tous les neurones ne sont pas spontanément actifs. Certains neurones sont silencieux jusqu'au moment où leur activité bascule dans un mode où les potentiels d'action sont émis en paquet ou en rafale de courte durée. Dans ce cas, les potentiels d'action se suivent les uns derrière les autres selon une séquence qui, selon certains chercheurs, contiendrait un message codé qu'il faut déchiffrer comme une séquence de bits d'information. Un message est supposé transmis entre le neurone enregistré et les neurones qu'il innerve. Nous expliquerons plus loin pourquoi cette idée que les séquences de potentiels d'actions véhiculent un message humainement compréhensible est une mauvaise idée, d'autant plus fallacieuse qu'elle concerne les neurones centraux, c'est-à-dire les neurones situés loin des cellules sensorielles et motrices. Cette idée résulte de l'assimilation du neurone à un émetteur d'impulsions comme le furent les télégraphes. Car le potentiel d'action n'est pas un phénomène qui reste local. La dépolarisation de la membrane cellulaire se propage le long de l'axone jusqu'aux terminaisons synaptiques. Lorsqu'elle parvient au niveau de ces extrémités, une ou plusieurs molécules (appelées neurotransmetteurs) sont libérées dans l'espace extracellulaire lesquelles vont, selon leur nature, exercer sur le neurone post-synaptique une influence qui sera soit excitatrice soit inhibitrice.

2.3. L'étude des corrélations inter-échelles

Au niveau microscopique, nous avons donc des variations de courant produites par les échanges ioniques entre les compartiments intérieur et extérieur des cellules nerveuses,

variations causées par la libération, par les neurones présynaptiques, d'une quantité accrue de neurotransmetteurs spécifiques et par leur fixation sur la membrane post-synaptique. Au niveau macroscopique en revanche, c'est-à-dire au niveau comportemental, nous sommes en présence de phénomènes qui non seulement sont d'une autre nature, mais surtout font intervenir un autre discours, mobilisent un vocabulaire qui nous est plus familier. Quand une étoile filante traverse le ciel, un mouvement rapide des yeux est produit en direction de la zone qu'elle a traversé. Alors qu'il correspond à des flux d'activité intracérébrale, nous disons de ce phénomène qu'il se produit dans un monde que nous qualifions d'extérieur. Les sciences physiques nous enseignent en plus que ce milieu "extérieur" est soumis à des lois. Ses contraintes sont radicalement différentes de celles du milieu de fonctionnement intracérébral. Les mouvements d'un segment corporel, voire du corps tout entier vers un objet situé dans le monde physique mobilisent un nombre considérable de neurones dont l'enchaînement des activités va déterminer ces synergies pluri-musculaires responsables respectivement de l'orientation des yeux et de la tête, du déplacement du corps, du transport de la main et de l'écartement des doigts. A l'occasion par exemple d'une simple saccade oculaire produite vers un objet lumineux, les neurones mobilisés sont distribués dans l'ensemble du cerveau, comme enchaînés dans de multiples canaux parallèles, intercalés entre d'un côté les cellules photoréceptrices de la rétine et de l'autre côté les fibres contractiles des muscles extraoculaires. Au niveau des muscles dits agonistes, les fibres musculaires vont se contracter et se raccourcir pendant que, dans le même temps, au niveau des muscles dits antagonistes, les fibres vont se relâcher et s'allonger. Mais, comme nous l'avons annoncé plus haut, le mouvement ne se réduit pas à cette conjonction de changements d'activité des muscles agonistes et antagonistes. Tous les autres muscles posturaux participent aussi à la production du mouvement même si aucun changement n'est mesuré dans leur tonus. Ces muscles sont permissifs. Pour bien comprendre leur rôle important, il suffit de se rappeler qu'il est impossible de regarder le chemin devant soi si la tête est inclinée vers le sol. De même, toutes les activités neuronales ne conduisent pas à des changements musculaires qui soient mesurables. Les neurones sont tellement nombreux, leur connectivité tellement foisonnante qu'il y a des activités qui peuvent ne trouver aucune sortie motrice ou humorale. Il est possible que certaines d'entre elles correspondent à cette masse diffuse qui précède la pensée, avant que le moyen soit trouvé de mobiliser les réseaux qui

conduisent au soupir, au cri, à la parole, à l'écriture ou à toutes ces autres formes d'expression dont les êtres humains sont capables.

La grande majorité des chercheurs électrophysiologistes sont concentrés dans l'étude des corrélations entre les séquences de potentiels d'action émis par un neurone et le déroulement temporel de certaines stimulations sensorielles (olfactive, gustative, visuelle, auditive, cutanée, proprioceptive ou vestibulaire) ou le mouvement de certaines parties du corps (comme la paupière, le globe oculaire, la tête, la main ou le doigt). Ainsi, il fut trouvé que l'émission de potentiels d'action augmente avec la valeur de certains paramètres cinématiques comme l'amplitude ou la vitesse du mouvement du segment corporel. Par exemple, au niveau du tronc cérébral, on trouve, regroupés dans un noyau, des neurones qui émettent des potentiels d'action dont la fréquence augmente avec la vitesse de rotation du globe oculaire. Il en résulte une relation entre le nombre de potentiels d'action et l'amplitude de la saccade. Tant que les cellules émettent des potentiels d'action, elles continuent d'exciter les neurones qui innervent les fibres musculaires, lesquelles continuent de se contracter. Certains chercheurs ont alors conclu que l'activité de ces cellules "codait" la vitesse de la saccade. Si on avait enregistré la tension musculaire, on aurait pu tout aussi bien dire que c'est la force de contraction qui est codée. Dans le premier cas, l'activité des neurones est mise en relation avec un paramètre cinématique, dans le second cas, avec une notion de la dynamique. Ces deux types de mesure ne montrent pas des déroulements temporels identiques. Par exemple, lors des saccades horizontales, la durée de l'intervalle pendant lequel la force musculaire augmente est en moyenne soixante pour cent plus courte que la durée du changement total d'orientation des yeux. Une décroissance de force se produit bien avant que le changement d'orientation de l'œil ne se termine³⁰⁴. Le délai entre la fin de la contraction et la fin de la saccade est aussi d'autant plus long que l'amplitude de la saccade est grande. Il en résulte que la corrélation entre la séquence de potentiels d'action et le paramètre physique ne sera pas la même selon que l'on mesure le changement d'orientation des yeux ou la force mise en œuvre pour contracter les fibres musculaires ultimement sollicitées par le neurone enregistré. Des travaux chez le chat rapportent d'ailleurs que la corrélation est plus forte entre l'émission

³⁰⁴ Lennerstrand G, Tian S, Zhao TX (1993) Force development and velocity of human saccadic eye movements. I: Abduction and adduction. *Clinical Vision Sciences* 8: 295–305.

des potentiels des cellules motrices et les variations de force³⁰⁵. Une remarque s'impose cependant. Si nous n'étions pas dotés d'un système visuel aussi développé et que notre connaissance du monde reposait essentiellement sur l'audition, peut-être aurions-nous développé une technologie permettant de quantifier le bruissement des changements de conformation des molécules d'actine et de myosine. Le phénomène mesuré ressemblerait alors à un son dont l'intensité ou la tonalité pourrait aussi être mis en relation avec l'émission des potentiels d'action. Il n'est pas exclu que la corrélation soit plus forte encore dans ce cas. Autrement dit, les conclusions que l'on tire des résultats des observations demeurent relatives au choix du paramètre quantifié et aux possibilités techniques qui lui sont associées.

2.4 Découverte de corrélations entre des paramètres spatiaux

Dans une région située quelques dizaines de millimètres plus haut, en amont des noyaux oculomoteurs, on découvre chez le chat comme chez le singe, des neurones qui émettent une rafale de potentiels d'action à chaque fois qu'une saccade est produite avec une amplitude et une direction relativement délimitées³⁰⁶. Nous sommes ici dans les couches profondes du colliculus supérieur. L'activité de ses neurones est supposée transmettre un message d'erreur signalant le déplacement désiré du regard, une sorte de vecteur indiquant la direction et l'amplitude du mouvement oculaire qu'il conviendrait de faire pour que l'image de la cible apparue dans le champ visuel périphérique se retrouve dans le champ visuel central. Les expériences de microstimulation électrique ont largement contribué à la formulation de cette hypothèse. En effet, si au lieu d'enregistrer, on excite artificiellement un petit nombre de ces cellules, en appliquant localement une microstimulation électrique, alors le singe (ou le chat) va dans les vingt millisecondes qui suivent, déplacer son regard vers la région du champ visuel à laquelle les cellules sont sensibles. La mesure des orientations

³⁰⁵ de Carrizosa M.A.D.L., Morado-Díaz C.J., Miller J.M., Rosa R. & Pastor A.M. (2011). Dual encoding of muscle tension and eye position by abducens motoneurons. *Journal of Neuroscience* 31: 2271-2279.

³⁰⁶ Schiller P.H. & Koerner F. (1971) Discharge characteristics of single units in superior colliculus of the alert rhesus monkey. *Journal of Neurophysiology* 34: 920-936; Wurtz R.H. & Goldberg M.E. (1972) Activity of superior colliculus in behaving monkey. III. Cells discharging before eye movements. *Journal of Neurophysiology* 35: 575-586. Sparks D.L., Holland R. & Guthrie B.L. (1976) Size and distribution of movement fields in the monkey superior colliculus. *Brain research* 113: 21-34.

horizontale (selon la direction allant de gauche à droite) et verticale (selon la direction allant du bas vers le haut) du regard fournit un vecteur dont les deux coordonnées dépendent du site qui vient d'être stimulé³⁰⁷. La stimulation d'un site voisin engendrera un mouvement plus petit si le site est plus en avant, plus ample si le site est plus postérieur. A mesure que la stimulation est appliquée au niveau de sites situés de plus en plus proches du plan sagittal du cerveau, la saccade présente une déflexion plus grande vers le haut. En revanche, si la stimulation est appliquée plus latéralement, la déflexion vers le bas augmente. Les mouvements sont dirigés vers la gauche si la stimulation est appliquée dans le colliculus droit, vers la droite si elle est appliquée dans le colliculus gauche. Ainsi, les mouvements évoqués par la microstimulation sont comme des vecteurs topographiquement organisés au niveau des couches intermédiaires et profondes du colliculus supérieur. Le neurophysiologiste David Sparks a introduit la notion de carte motrice³⁰⁸. La direction et l'amplitude des saccades évoquées restent les mêmes pour un site tant que la microstimulation est appliquée alors que le regard n'est pas en mouvement ou ne l'était pas préalablement. La saccade artificiellement produite correspond à celle qui aurait provoqué la décharge la plus élevée si, au lieu de stimuler, on avait enregistré les neurones situés à proximité de la pointe de la microélectrode. De nombreux chercheurs se sont lancés dans l'étude des mécanismes susceptibles d'expliquer comment le *lieu* où se manifeste un changement d'activité sur la couche colliculaire est transformé en une *durée* d'activation motrice. Désigné par le terme de *transformation spatio-temporelle*, ce problème est un des problèmes les plus fondamentaux de la neurophysiologie des transformations visuomotrices.

Une sensibilité de l'activité des neurones à un paramètre de type spatial a aussi été trouvée chez les rongeurs, dans une structure appelée hippocampe. On y trouve des cellules dont l'émission de potentiels d'action est très basse mais augmente dès lors que l'animal traverse une zone relativement délimitée de l'enclos dans lequel il se déplace. Ces cellules dites de lieu "coderaient" selon certains auteurs la position de l'individu dans l'enclos. A la différence du colliculus supérieur, les taux d'émission de potentiels d'action sont très bas et il

³⁰⁷ Schiller P.H. & Stryker M. (1972) Single-unit recording and stimulation in superior colliculus of the alert rhesus monkey. *Journal of Neurophysiology* 35: 915-924.

³⁰⁸ Sparks D.L. & Nelson I.S. (1987) Sensory and motor maps in the mammalian superior colliculus. *Trends in Neurosciences* 10: 312-317; Sparks D.L. (1988) Neural cartography: sensory and motor maps in the superior colliculus. *Brain, behavior and evolution* 31: 49-56.

ne semble pas y avoir de topologie, ou alors elle n'a pas encore été découverte. Deux cellules voisines n'émettent pas des potentiels d'action lorsque l'animal traverse des lieux voisins de l'enclos. Cette sensibilité à un endroit particulier de l'enclos disparaît lorsqu'un objet nouveau y est ajouté. Pour d'autres cellules dites de "bordure", le taux d'émission de potentiels d'action augmente quand le rongeur s'approche d'un bord de l'enclos.

Dans ces études électrophysiologiques, l'enregistrement de l'activité des cellules est donc combiné à l'enregistrement des mouvements d'un segment corporel (comme l'œil) ou du corps dans son intégralité. Spontanément, l'expérimentateur met en correspondance les catégories conceptuelles dont il dispose pour structurer ses observations et son discours sur l'interprétation de l'intensité de l'activité de la cellule enregistrée avec la scène qu'il étudie, c'est-à-dire le champ parcouru visuellement chez le singe ou l'enclos dans lequel se déplace le rongeur. Quand le phénomène se passe de part et d'autre de son champ visuel, alors la droite correspond à l'ensemble des situations où le muscle droit externe de son œil droit et le muscle droit interne de son œil gauche sont tous les deux contractés tandis que les muscles droit interne de son œil droit et droit externe de son œil gauche sont relâchés. Le proche et le lointain correspondent respectivement aux plus faibles et aux plus fortes contractions musculaires, mais aussi à leur innervation, c'est-à-dire aux commandes toniques qui les entretiennent. La direction, cardinale ou oblique, est définie par le rapport des intensités avec lesquelles les muscles responsables des mouvements horizontaux et verticaux sont activés. Ce cadrage topologique des sensations visuelles par notre motricité oculaire est applicable au singe puisqu'il est doté d'un système moteur extraoculaire quasiment identique au nôtre³⁰⁹. Autrement dit, ce qui est à gauche, à droite, en haut ou en bas pour l'observateur humain l'est aussi pour le singe. A partir de ce point de séparation qu'est la direction du regard, l'éloignement d'une cible visuelle et l'ampleur des saccades vont selon les auteurs, être

³⁰⁹ Cette correspondance n'est pas applicable à la topologie des observations faites au niveau des cellules de lieu de l'hippocampe des rongeurs. Entre l'activité cellulaire et notre interprétation s'intercale tout l'arsenal conceptuel et visuomoteur avec lequel nous percevons l'enclos de l'animal. C'est peut-être parce qu'il manque d'autres dimensions que la topologie des cellules dites de lieu n'a pas encore été trouvée. Tous les chercheurs ne partagent d'ailleurs pas cette interprétation "spatiale" de l'activité des cellules hippocampiques. H. Eichenbaum parle de cellules "temps".

exprimées en coordonnées cartésiennes³¹⁰ ou polaires³¹¹. Au niveau des cellules qui innervent les neurones moteurs responsables des contractions musculaires, un système quasi-cartésien est préféré en raison de l'existence d'un système contrôlant spécifiquement les mouvements dits horizontaux des yeux et de la tête³¹². En revanche, pour les cellules situées en amont, leur connectivité est tellement diffuse³¹³ que le choix n'est plus justifié; il devient simplement conventionnel³¹⁴. Une mise en correspondance est ainsi faite entre d'un côté le système visuomoteur et conceptuel de l'observateur humain et de l'autre les stimulations visuelles soumises au singe et ses réponses. Elle est beaucoup plus compliquée à établir dans les travaux chez le rongeur puisqu'on ne mesure pas l'orientation de leurs yeux. Autrement dit, vis-à-vis de l'enclos dans lequel le rongeur se déplace, l'observateur humain a un accès visuel surplombant un ensemble d'emplacements dont rien ne garantit qu'il soit imaginé par le rongeur.

Une seconde mise en correspondance est ensuite étudiée entre des phénomènes qui se produisent à des échelles différentes, entre les niveaux microscopique et macroscopique, entre les mouvements ioniques qui traversent la membrane des cellules mobilisées et par exemple, la rotation des yeux. Cette mise en relation est loin d'être triviale. Nous la faisons parce que c'est ce que nos instruments et nos concepts nous permettent de faire pour

³¹⁰ Nichols M.J. & Sparks D.L. (1995) Nonstationary properties of the saccadic system: new constraints on models of saccadic control. *Journal of Neurophysiology* 73: 431-435. Nichols M.J. & Sparks D.L. (1996) Independent feedback control of horizontal and vertical amplitude during oblique saccades evoked by electrical stimulation of the superior colliculus. *Journal of Neurophysiology* 76: 4080-4093.

³¹¹ Kustov A.A. & Robinson D.L. (1995) Modified saccades evoked by stimulation of the macaque superior colliculus account for properties of the resettable integrator. *Journal of Neurophysiology* 73: 1724-1728.

³¹² Sparks D.L., Barton E.J., Gandhi N.J. & Nelson J. (2002) Studies of the role of the paramedian pontine reticular formation in the control of head restrained and head unrestrained gaze shifts. *Annals of the New York Academy of Sciences* 956: 85-98.

³¹³ Grantyn A., Brandi A.M., Dubayle D., Graf W., Ugolini G., Hadjidimitrakis K. & Moschovakis A. (2002) Density gradients of trans-synaptically labeled collicular neurons after injections of rabies virus in the lateral rectus muscle of the rhesus monkey. *Journal of Comparative Neurology* 451: 346-361.

³¹⁴ Masino T. (1992) Brainstem control of orienting movements: intrinsic coordinate systems and underlying circuitry. *Brain, Behavior and Evolution* 40: 98-111. van Opstal A.J., Hepp K., Hess B.J., Straumann D. & Henn V. (1991). Two-rather than three-dimensional representation of saccades in monkey superior colliculus. *Science* 252: 1313-1315.

l'instant, à défaut de pouvoir combler ce vaste fossé qui se trouve entre ces deux niveaux et qui nous empêche de visualiser les flux d'activité qui se propagent et se dissipent au travers des multiples réseaux du cerveau. Dans le prochain chapitre, nous verrons que de nombreux postulats sont posés alors qu'ils sont loin d'être évidents, quand ils ne sont pas discutables. Toutes ces remarques montrent à quel point nos concepts spatiaux déterminent les observations et les mesures faites par les neurophysiologistes, même ceux qui sont les plus simples et qui nous semblent les plus évidents, comme les concepts spatiaux. Notre remarque est à mettre en relation avec celle de Jakob von Uexküll pour qui les relations qu'un animal entretient avec les objets de son milieu ne se déroulent pas nécessairement dans le même espace et dans le même temps que les relations qu'entretiennent les observateurs humains, et notamment les expérimentateurs scientifiques. Il faut en effet garder à l'esprit que cette *"croyance en l'existence d'un monde unique dans lequel sont imbriqués tous les êtres vivants"* est potentiellement trompeuse et que d'elle découle *"la conviction générale et durable qu'il doit n'y avoir qu'un seul espace et un seul temps pour tous les êtres vivants"*³¹⁵.

Les relations entre l'activité des neurones et les manifestations comportementales peuvent être causales et réciproques. Avec la technique de microstimulation électrique, nous avons vu qu'une modification artificielle, très locale et très brève, de l'activité de certaines régions du cerveau comme le colliculus supérieur profond ont des répercussions comportementales, plus globales et plus longues. De même, des lésions ou des dysfonctionnements entraînent des désordres neurologiques. Les potentiels d'action que l'on enregistre ne sont pas des épiphénomènes. Leur transmission jusqu'aux cellules motrices qui innervent les fibres musculaires est la cause de leur contraction. Inversement, l'apprentissage et l'exercice d'un geste ou d'une séquence motrice s'accompagnent de modifications dans la transmission et la propagation des activités neuronales, modifications qui peuvent être plus ou moins durables. Les êtres humains sont capables de mobiliser leurs quatre membres pour piloter un véhicule automobile avec des automatismes tels qu'ils leur permettent de réagir rapidement à des situations imprévues et d'éviter que cette carapace artificielle ne heurte un obstacle. Ce type de performance repose sur des couplages musculaires qui mobilisent plusieurs segments corporels, à savoir les yeux, la tête, les mains, les avant-bras, les pieds et les jambes, des couplages qui ne sont bien évidemment pas présents chez le jeune nourrisson

³¹⁵ von Uexküll J. (1956/2010) Milieu animal et milieu humain, Rivages, page 49

voire chez le singe, à moins de les soumettre à un entraînement intensif. De même, nous mémorisons que neuf fois neuf font quatre-vingt-un ou que seize plus seize font trente-deux sans utiliser ni les doigts ni un crayon. Un autre type d'apprentissage, l'acculturation, nous conduit à faire des choses que nous n'étions pas capables de faire avant de les apprendre, des signes gestuels ou des actes phonatoires soutenant une communication dont le sens peut échapper à d'autres individus ou aux animaux. Nous pouvons passer un temps considérable à apprendre à un singe ou à un réseau de neurones artificiels à résoudre un problème géométrique pour ensuite rechercher les processus qui lui ont permis d'y parvenir. Mais rien ne nous autorise à penser que leur découverte soit susceptible d'améliorer les méthodes pédagogiques d'enseignement car le singe ou le réseau peuvent y parvenir par apprentissage associatif, au terme d'un nombre considérable d'essais et d'erreurs et en mettant en jeu des réseaux neuronaux distincts. Or chez l'humain, grâce au langage, la référence symbolique et la métaphore, l'apprentissage peut se faire plus rapidement.

Pour des raisons à la fois éthiques et liées à leur risque lésionnel, les études chez l'homme ne peuvent pas enregistrer l'activité des neurones aussi facilement que chez l'animal. Elles ont recours à l'imagerie cérébrale. Par cette méthodologie, Stanislas Dehaene et ses collaborateurs trouvent au niveau des lobes pariétaux bilatéraux une plus grande activation dans une tâche de calcul approximatif que dans une tâche de calcul exact³¹⁶. Quelques années plus tard, il propose une explication à cette implication spécifique en assimilant le calcul mental à un mouvement imaginaire, le long d'une ligne mentale numérique. Quand une personne occidentale calcule le résultat de l'addition $18 + 5$, l'activation se déplacerait vers la droite, de 18 à 23. Ce déplacement impliquerait les lobes pariétaux bilatéraux, dont les cellules seraient mobilisées pendant les mouvements oculaires. Il déclare en effet que *“le modèle d'activation dans le cortex pariétal pendant l'addition ressemblerait au motif d'activation associé à un mouvement oculaire vers la droite, alors que la soustraction ressemblerait à un mouvement des yeux vers la gauche”*³¹⁷. Le problème qu'il nous semble cependant important de mentionner ici est que l'imagerie fonctionnelle par résonance magnétique ne mesure pas du tout les potentiels d'action que les neurones

³¹⁶ Dehaene S., Spelke E., Pinel P., Stanescu R. & Tsivkin S. (1999) Sources of mathematical thinking: Behavioral and brain-imaging evidence. *Science* 284: 970-974.

³¹⁷ Knops A., Thirion B., Hubbard E.M., Michel V. & Dehaene S. (2009). Recruitment of an area involved in eye movements during mental arithmetic. *Science* 324: 1583-1585.

émettent mais l'activité présynaptique, excitatrice et inhibitrice. Ils mesurent la consommation d'oxygène. Or cette consommation n'est pas augmentée uniquement quand les neurones émettent des potentiels d'action. Le contraire a même été démontré. Une augmentation du signal peut être détectée alors que les neurones n'émettent plus aucun potentiel d'action parce que leur activité est soumise à une inhibition présynaptique³¹⁸. Autrement dit, il n'est pas du tout certain que l'activation détectée dans les lobes pariétaux par résonance magnétique témoigne de l'émission de potentiels d'action par les neurones de ces régions, laquelle provoquerait ensuite celle d'autres territoires neuronaux et contribuerait ultimement à la tâche dans laquelle les sujets humains sont engagés. Les auteurs de cette étude admettent que *“comme toute les études IRMf, leur étude reste corrélative et ne permet pas d'établir que l'activation pariétale bilatérale joue un rôle causal dans le calcul”*³¹⁹. Par conséquent, la promesse de Jean-Pierre Changeux que nous pourrons un jour, grâce aux méthodes d'imagerie, observer ces états physiques de notre cerveau qui correspondent aux objets mathématiques³²⁰ est très loin encore d'être honorée. Il est même possible que ces études d'imagerie ne nous apprennent rien de plus sur le plan cognitif que ce que les études cliniques nous ont déjà enseignées, si ce n'est de confirmer l'origine cérébrale de certains symptômes neurologiques. La probabilité est élevée de rencontrer des escargots après la pluie mais le climat n'est pas dicté par le comportement de ces fragiles gastéropodes. Seules les études de perturbation ou les études cliniques peuvent véritablement mettre à l'épreuve la relation de causalité entre le changement d'activité au niveau d'une région cérébrale et une performance comportementale. Il faut cependant interpréter les désordres avec prudence et ne pas conclure hâtivement que telle région joue un rôle important dans la production de cette réponse. Nous avons par exemple montré au niveau du système oculomoteur qu'un

³¹⁸ Lippert M.T., Steudel T., Ohl F., Logothetis N.K. & Kayser C. (2010) Coupling of neural activity and fMRI-BOLD in the motion area MT. *Magnetic resonance imaging* 28: 1087-1094.

³¹⁹ Knops A., Thirion B., Hubbard E.M., Michel V. & Dehaene S. (2009) *Op. cit.*

³²⁰ *“Les objets mathématiques s'identifient à des états physiques de notre cerveau de telle sorte qu'on devrait en principe pouvoir les observer de manière extérieure grâce à des méthodes d'imagerie médicale”* dans : Changeux J.-P. & Connes A. (1989) *Matière à pensée*. Paris: Odile Jacob, page 48.

symptôme ne résulte pas seulement de la lésion d'un territoire nerveux mais aussi de la façon dont le reste du cerveau y réagissait³²¹.

L'approche neurophysiologique ne consiste pas à remplacer ces cascades d'activation neuronale intercalées entre un ensemble de stimulations et un ensemble de contractions musculaires par des boîtes diversement étiquetées par exemple de "modèles internes" de la dynamique ou de la cinématique des mouvements du regard, de la main ou des membres inférieurs. Le cerveau n'est pas pareil à cet ensemble de rouages mécaniques pareils à ceux utilisés en automatique robotique. Les activations neuronales ne se propagent pas comme dans ces chaînes de dominos où une pièce bascule qu'à partir du moment où le basculement d'une pièce voisine la précède. Parce qu'elles évoquent dans leur esprit une multitude de "tout se passe comme si", certains auteurs plongent dans le fonctionnement cérébral des notions qui relèvent de l'ingénierie robotique. Or ces notions ont une signification qui dépend d'une multitude d'autres notions dont l'échafaudage est accroché à une réalité logico-électronique spécifique, différente de la complexité neurophysiologique et neurochimique. La pluridisciplinarité favorise les raccourcis sémantiques ou métaphoriques au détriment de la caractérisation exacte des faits, risquant alors de provoquer plus de confusion que de clarté. La polysémie et les raccourcis langagiers engendrent des égarements sémantiques. Sans aucune mesure ni calcul compliqué, la girouette indique l'origine du vent par l'équilibre des forces que les mouvements de l'air engendrent sur sa structure. La girouette ne fait aucun calcul et il est bien possible qu'un processus similaire soit mis en jeu pour déterminer la direction du regard ou l'orientation de la tête³²², tout en prenant soin de ne pas assimiler les processus visuo-moteurs sous-jacents à une tige en acier.

³²¹ Goffart L., Chen L.L. & Sparks D.L. (2004) Deficits in saccades and fixation during muscimol inactivation of the caudal fastigial nucleus in the rhesus monkey. *Journal of Neurophysiology* 92: 3351–3367 ; Bourrelly C., Quinet J. & Goffart L. (2021) Bilateral control of interceptive saccades: evidence from the ipsipulsion of vertical saccades after caudal fastigial inactivation. *Journal of Neurophysiology* 125 : 2068-2083.

³²² Goffart L. (2019) Kinematics and the neurophysiological study of visually-guided eye movements. *Progress in Brain Research* 249: 375-384.

3. CRITIQUE DE LA CÉRÉBRALISATION DE NOTIONS PHYSICO-MATHÉMATIQUES

“La compréhension de la fonction cérébrale est souvent limitée par l'acceptation tacite de concepts connus pour être fondamentalement inappropriés. Un exemple est le principe selon lequel le cerveau, dans son fonctionnement interne, utilise des cadres de référence espace-temps similaires à ceux utilisés en mécanique classique”³²³

Pour des raisons liées à l'histoire des sciences, à la complexité de leur sujet et peut-être aussi à la structure de notre entendement, le monde de la matière inerte est beaucoup mieux connu que le monde du vivant, lequel est pourtant considéré comme composé d'éléments eux aussi matériels, moléculaires et atomiques. Pour étudier le mouvement d'un corps, la mécanique classique postule l'existence de deux cadres fondamentaux : l'espace et le temps.

3.1. L'espace et le temps, domaines de mesure

L'espace est le domaine dans lequel les distances parcourues par un corps sont mesurées tandis que le temps est le domaine des mesures de durée. Cette séparation des domaines et leur indépendance ne résulte que de ces deux instruments rigides et indépendants l'un de l'autre que nous utilisons pour faire nos mesures: le chronomètre et la règle graduée. La mesure d'un mouvement consiste à mettre en relation les nombres fournis par chacun de ces deux instruments. Le déplacement est défini comme le changement de position intervenu entre deux instants successifs. En dirigeant le regard vers les endroits où le mouvement a démarré et où il s'est terminé, l'observateur désigne deux points singuliers. Ceux-ci peuvent être reliés l'un à l'autre par une multitude de lignes dont la courbure est plus ou moins variable. Si le mouvement se produit sur une surface plane, la ligne est rectiligne et ne présente aucune courbure; la géométrie euclidienne sera la plus commode à utiliser. Une corde qui aura été préalablement marquée de graduations équidistantes avec l'aide d'un compas pourra être tendue entre les points de départ et de fin du mouvement. La distance

³²³ Pellionisz A. & Llinas R. (1982) Space-time representation in the brain. The cerebellum as a predictive space-time metric tensor. *Neuroscience* 7: 2949-2970.

parcourue est le nombre de segments intercalés entre ces deux points. S'ils sont situés sur une surface ovoïde, concave ou convexe, la ligne qui définit la trajectoire du mouvement aura une courbure variable, le nombre de segments intercalés continuera d'indiquer la distance parcourue mais il sera plus grand que dans le cas d'une surface plane. Quant à la durée, elle est le nombre de périodes, elles aussi régulières, fournies par un oscillateur et intercalées entre le début et la fin du mouvement. La distance parcourue (ΔP) et la durée (ΔT) étant des nombres, leur rapport $\Delta P/\Delta T$ peut être calculé. Ce rapport entre la distance et la durée est nommé vitesse. Au départ et à la fin du mouvement, la vitesse est nulle. Le démarrage du mouvement est caractérisé par une croissance de la vitesse et la fin du mouvement par sa décroissance jusqu'à la valeur nulle. Quand la vitesse est constante, le mouvement ne paraîtra uniforme au regard de l'observateur que si le mobile se meut le long de la droite rectiligne. S'il se déplace le long d'une ligne située sur une surface ovoïde dont l'observateur n'a pas connaissance, alors la vitesse instantanée du mobile paraîtra varier différemment selon la courbure du trajet par rapport à l'observateur. La vitesse mesurée dépend donc de la courbure de la surface sur laquelle le mobile se déplace. Elle dépend aussi de la viscosité du milieu car les mobiles ne sont pas réductibles à des points se déplaçant sur une ligne. Si nous faisons ces remarques triviales en apparence, c'est parce que dès lors nous nous interrogeons sur l'activité cérébrale correspondant au mobile, alors nous sommes confrontés au problème que rien ne nous permet de déterminer a priori la courbure, la viscosité et la permanence du milieu neuronal que cette activité traverse. De même, nous ne savons rien de la forme de la correspondance cérébrale de l'objet en mouvement; nous verrons bientôt qu'elle n'est ni rigide ni localement compacte.

A partir des nombres fournis par nos instruments de mesure, le rapport inverse $\Delta T/\Delta P$ aurait pu être calculé. Il est probable qu'il n'ait pas été utilisé pour éviter cet écueil d'attribuer des valeurs infinies aux cas où les distances parcourues sont quasiment nulles. La division par des valeurs proches de zéro donne en effet de très grandes valeurs. Il est plus commode de considérer un changement transitoire de position comme une fonction dont la valeur initiale démarre de zéro et se termine par la valeur nulle. Si la stationnarité avait été associée à une valeur infinie, il aurait été compliqué de comprendre comment deux valeurs très grandes mais différentes (mille versus un milliard) pouvaient être associées à deux déplacements d'amplitude proche et indiscernable (1 millimètre versus 1 nanomètre) en l'intervalle d'une seconde.

Le calcul différentiel a permis d'affiner l'analyse mathématique du mouvement physique en ajoutant ces deux concepts supplémentaires que sont la vitesse instantanée et l'accélération. Avec ces notions, le mouvement est défini comme un changement de position selon des variations définies par un profil de vitesse qui peut se révéler monophasique ou multiphasique. Les périodes pendant lesquelles la vitesse croît sont qualifiées d'accélération tandis que la décélération qualifie celles pendant laquelle la vitesse décroît. Il convient cependant ici de prendre conscience de l'importance de la régularité des intervalles de temps. La vitesse du mouvement d'un objet présente un décours temporel dont la forme est la conséquence de la périodicité de l'instrument de mesure des durées; les intervalles de temps utilisés pour calculer les variations de vitesse sont de durée constante. Or le rapport $\Delta P/\Delta T$ aurait pu être constant si la période était variable. Nous avons coutume de mesurer les variations de position d'un objet mobile dans le monde physique avec un métronome dont la cadence est constante, mais rien ne nous interdit de le faire avec un métronome dont la cadence augmenterait de manière uniforme jusqu'à mi-chemin avant de décroître. Si nous ne le faisons pas, c'est parce que c'est plus simple et plus commode.

3.2. Le principe d'inertie

Un autre point fondamental qui caractérise l'étude physique des mouvements est le principe d'inertie. Sa première formulation correcte est due à Pierre Gassendi: "*le mouvement horizontal, de quelque cause qu'il provienne, est de par sa nature, perpétuel, à moins qu'une cause n'intervienne qui détourne le mobile et trouble le mouvement*"³²⁴. Ce principe constitue un des trois axiomes de la mécanique classique. Il stipule que tout corps persévère dans son état de repos ou de mouvement rectiligne et uniforme, à moins que quelque force n'agisse sur lui, et ne le contraigne à changer d'état. Le rapport entre le nombre des intervalles de déplacement et le nombre des intervalles de durée est constant et tout écart par rapport à cette valeur d'état est causé par quelque chose, une force, dont il faudra rechercher l'origine et la nature. Si l'écoulement du temps se fait toujours de manière uniforme, les intervalles de temps demeurent constants et tout changement de trajectoire aura donc une cause qui sera d'origine exclusivement spatiale, comme une collision (déviation) ou la traversée d'une zone dont la viscosité est différente. Le principe d'inertie suppose un univers illimité car autrement

³²⁴ Koyré A (1980) Etudes galiléennes. Paris: Hermann page 309

il faudrait supposer que les corps en mouvement puissent heurter une paroi telle qu'elle n'absorbe rien des chocs. Contrairement à Descartes, pour qui la conservation du mouvement résulte de l'action continue de Dieu, Isaac Newton attribuait au corps une force intrinsèque qu'il appelait *vis inertiae*³²⁵. Bien qu'il soit qualifié aussi de loi, il n'est pas nécessaire de considérer le principe d'inertie comme une loi de la nature, comme une contrainte s'imposant au mouvement des corps dans le monde "extérieur". Ce principe caractérise simplement le mouvement qui n'est soumis à aucune force externe, une sorte de référence pareille à la valeur zéro. L'historienne des sciences Maria de Paz nous rappelle que ce serait Carl Jacobi qui le premier aurait envisagé la possibilité que le principe d'inertie soit une convention³²⁶. Cinq décennies avant Henri Poincaré, ce mathématicien déclarait que les premiers principes de la mécanique ne sont ni empiriques ni des principes synthétiques a priori imposés par la raison; ce sont des conventions³²⁷. En résumé, les paramètres cinématiques du mouvement d'un corps rigide dans le monde physique sont calculés selon des conventions où des valeurs instantanées (de position ou de vitesse) sont attribuées avec une règle graduée et une cadence d'horloge. Ces valeurs peuvent être comparées entre elles en tenant compte du nombre d'intervalles de temps écoulés entre deux instants. Ainsi il devient possible de dire qu'un mouvement est deux fois plus grand, deux fois plus rapide ou deux fois plus long qu'un autre mouvement. La question cruciale qui se pose alors est de savoir dans quelle mesure ces rapports numériques sont applicables aux processus cérébraux, et plus précisément ceux qui sont responsables des mouvements corporels. La durée du processus cérébral est-elle deux fois plus longue quand le mouvement est deux fois plus long? Un mouvement plus ample ou plus rapide mobilise-t-il une masse neuronale plus importante, plus active ou les deux? Des translations, des homothéties et des rotations peuvent être opérées pour quantifier le mouvement d'un segment corporel. Rien de cela n'est possible dans le fonctionnement cérébral car les propagations d'activité cérébrale ne sont pas des objets rigides et compacts.

³²⁵ Contrairement à la définition de Kepler, *vis inertiae* ne dénote pas, selon Newton, la force par laquelle un corps a tendance à se reposer, mais la force qui le maintient dans le même état, au repos ou en mouvement.

³²⁶ De Paz M. (2018) From jurisprudence to mechanics: Jacobi, Reech, and Poincaré on convention. *Science in context* 31: 223–250.

³²⁷ Pulte H. (2000) Beyond the edge of certainty: Reflections on the rise of physical conventionalism. *Philosophia Scientiae* 4: 47-68.

En raison de la divergence de la connectivité afférente qui achemine les activités au sortir de chaque nerf sensoriel, ce sont comme des explosions suivies de quelque chose comme des contractions ou des resserrements, conséquences de la convergence des activités au niveau de chaque nerf moteur. Cette séquence d'explosions et de contractions multiples n'est pas quelque chose qui soit divisible comme l'espace physique parcouru. Henri Bergson disait qu'"on peut bien diviser une chose, mais non pas un acte"³²⁸. Il en est de même pour les activités neuronales qui réalisent un mouvement.

3.3. Critique de la modularité cérébrale

L'organisation diffuse et dynamique du fonctionnement cérébral est incompatible avec la conception modulaire qui est entretenue par les études d'imagerie cérébrale. La modularité ne se trouve que dans les catégories utilisées par certains chercheurs en psychologie cognitive; elle n'est pas dans le cerveau. Comme le résume très bien David A. Robinson, un des fondateurs de la neurophysiologie moderne des mouvements oculaires, "*la convergence et la divergence suffisent à détruire tout espoir de systèmes modulaires ou de tracer une frontière autour d'un système qui dénote une isolation fonctionnelle*"³²⁹. L'organisation modulaire est concevable aux niveaux sensoriels et moteurs dans la mesure où les différents nerfs sensitifs engendrent les différentes modalités sensorielles, de même que les différents nerfs moteurs sont responsables de la contraction de groupes musculaires spécifiques. En revanche, tout se complique au fur et à mesure que nous nous éloignons de ces interfaces périphériques et que nous étudions les régions plus centrales du cerveau. La divergence des connexions anatomiques entre les premiers relais centraux que sont le thalamus et la colliculus supérieur et le cortex cérébral ainsi que le caractère diffus de la connectivité cortico-corticale compliquent considérablement cette organisation modulaire du cortex cérébral que les études d'imagerie cérébrale nous proposent et qui nous rappelle les thèses phrénologiques. De plus, quand on sait que nos rapports aux objets du monde "extérieur" reposent sur l'activation d'une multitude de réseaux sensorimoteurs dont la connectivité est consolidée lorsque l'exercice est répété, on se demande pourquoi toutes ces

³²⁸ Bergson H. (1997) Essai sur les données immédiates de la conscience. Paris : Quadrige PUF page 83.

³²⁹ Robinson D.A. (1997) How far into brain function can neural networks take us? *Behavioral and Brain Sciences* 15: 823-828, page 828.

études d'imagerie chez l'homme mettent en avant une zone cérébrale plutôt que tout un réseau. Des similitudes peuvent être constatées dans la structure des multiples territoires neuronaux mobilisés chez deux individus distincts d'une même espèce et, parfois chez deux individus d'espèces animales différentes. Enfin les travaux de rééducation fonctionnelle nous montrent que le cerveau n'est pas un substrat stable et rigide, que sa connectivité distribuée et redondante rend son fonctionnement versatile et plastique. Cette plasticité et cette redondance remettent en question elles aussi la spécialisation fonctionnelle de certains territoires centraux.

3.4. Les notions physiques sont-elles applicables au fonctionnement cérébral ?

En 1982, Andras Pellionisz et Rodolfo Llinas nous avertissaient que *"la compréhension de la fonction cérébrale est souvent limitée par l'acceptation tacite de concepts connus pour être fondamentalement inappropriés. Un exemple est le principe selon lequel le cerveau, dans son fonctionnement interne, utilise des cadres de référence espace-temps similaires à ceux utilisés en mécanique classique."* Ils explicitaient leur réserve en s'appuyant sur cette capacité dont sont dotés de nombreux animaux de localiser et d'intercepter un objet en mouvement. *"Alors que les fonctions sensorielles et motrices sont liées à des événements se déroulant dans l'espace-temps externe, une description concise de la manière dont les informations spatiales et temporelles sont interdépendantes dans le SNC n'a pas été clairement formulée. L'une des raisons de cette carence semble être l'utilisation de cadres de référence séparés pour "l'espace" et le "temps"... Or, l'utilisation de systèmes de coordonnées séparés pour l'espace et le temps repose sur le concept de simultanéité. Puisqu'à l'intérieur du cerveau il n'y a pas d'agent de simultanéité instantanée comparable à la lumière, l'utilisation classique de coordonnées spatiales et temporelles séparées est inapplicable dans le cas de la description du fonctionnement interne du SNC"*³³⁰. Pour des raisons incompréhensibles, cette remarque fondamentale ne fut pas suffisamment relayée pour empêcher la multiplication d'études

³³⁰ Pellionisz A. & Llinas R. (1982) Space-time representation in the brain. The cerebellum as a predictive space-time metric tensor. *Neuroscience* 7: 2949-2970.

d'enregistrement cellulaire recherchant un "codage" neuronal de l'espace ou des paramètres cinématiques ou dynamiques du mouvement.

Dans le domaine de la neurophysiologie des mouvements oculaires visuellement guidés, des théoriciens ont en effet proposé que le mouvement d'orientation du regard vers une cible visuelle serait piloté par une commande intracérébrale codant l'erreur de position, c'est-à-dire la différence entre la direction de la cible et celle du regard, lesquelles seraient exprimées dans un référentiel égocentré (par rapport au tronc) ou oculocentré. Lorsque l'objet est en mouvement, cette erreur de position serait complétée d'une erreur de vitesse, c'est-à-dire d'une estimation de la différence entre la vitesse du mouvement de l'œil et celle de la cible, ainsi que d'une erreur d'accélération (différence entre les accélérations estimées des mouvements de la cible et du regard)³³¹. Ainsi, lors de la capture et de la poursuite d'une cible visuelle en mouvement, des processus seraient mis en branle dans le cerveau dont la fonction serait de réduire ces erreurs. Cette conception impose d'imaginer que le fonctionnement cérébral mette en place des référentiels construits à partir de ces notions mathématiquement discrètes que sont la direction de l'axe du corps (dans le cas du référentiel égocentré) ou la direction du regard (dans le cas du référentiel oculocentré). De façon tout à fait prévisible, certains chercheurs partis à la recherche du substrat neurophysiologique de ces référentiels ont découvert que l'activité des neurones ne pouvait être pas intégralement décrite dans l'un ou l'autre de ces systèmes de coordonnées. Des analyses statistiques conduisirent certains à proposer une multitude de référentiels "hybrides"³³² intercalés entre ces deux idéalités mathématiques que sont les systèmes de coordonnées. Pourtant, sur la base d'une étude de modélisation avec un réseau de neurones artificiels, David A. Robinson était arrivé à la conclusion que cela n'avait pas de sens de rechercher les divers systèmes de coordonnées dans lesquels l'activité des neurones serait "codée". Il rappelle que ceux-ci sont *"des choses que nous utilisons pour faire des descriptions quantitatives. L'hypothèse selon*

³³¹ Lisberger S.G., Morris E.J. & Tychsen L. (1987) Visual motion processing and sensory-motor integration for smooth pursuit eye movements. *Annual Review of Neuroscience* 10: 97-129; Krauzlis R.J. & Lisberger S.G. (1994) A model of visually-guided smooth pursuit eye movements based on behavioral observations. *Journal of Computational Neuroscience* 1: 265-283.

³³² Mullette-Gillman O.D.A., Cohen Y.E. & Groh J.M. (2009). Motor-related signals in the intraparietal cortex encode locations in a hybrid, rather than eye-centered reference frame. *Cerebral Cortex* 19: 1761-1775.

laquelle le système nerveux central est obligé de les reconnaître également n'est pas étayée"³³³. L'éminent neurophysiologiste nous expliquait aussi que "le réseau [de neurones artificiels] fait le travail, et pour lui, les systèmes de coordonnées ne sont pas pertinents; ils sont un problème de notre propre fabrication. Évidemment, les périphéries sensorielle et motrice ont leurs propres géométries, que nous appelons souvent, à tort, des systèmes de coordonnées. (Les systèmes de coordonnées sont des inventions humaines utilisées pour mesurer les relations spatiales). Cependant, nous ne nous sommes pas préoccupés par ces géométries autant que par la question de savoir s'il est même utile de se demander dans quel système de coordonnées un neurone central fonctionne."³³⁴.

3.5. La notion de population de neurones

Le même constat peut être établi pour celles et ceux qui sont partis à la recherche de la façon dont sont représentés dans le fonctionnement cérébral, la direction du mouvement d'un objet, l'endroit où se trouve une cible même ponctuelle dans le champ visuel ou encore le vecteur qui caractérise l'amplitude et la direction d'une saccade qui permettrait de la capturer du regard. Dans chacun de ces cas, les électrophysiologistes ont découvert que l'émission des potentiels d'action par les neurones enregistrés est maximale pour une direction préférée de mouvement, pour un lieu ou un vecteur préféré. Mais des potentiels d'action sont aussi émis pour des valeurs voisines du paramètre préféré. Le champ de réponse de chaque neurone se manifeste pour un éventail plus ou moins large de valeurs; il est étendu. Certains chercheurs ont interprété cette extension comme une incertitude intrinsèque dans le "codage" neuronal du paramètre étudié alors que d'autres chercheurs y voyaient simplement l'indication qu'un stimulus donné ne recrute pas un seul neurone mais une multitude de neurones³³⁵. Pour le premier groupe de chercheurs, une incertitude intrinsèque

³³³ Robinson D.A. (1992) How far into brain function can neural networks take us? *Behavioral and Brain Sciences* 15: 823-828, page 824.

³³⁴ Robinson D.A. (1992) Implications of neural networks for how we think about brain function. *Behavioral and Brain Sciences* 15: 42-63, page 51.

³³⁵ McIlwain J.T. (1976) Large receptive fields and spatial transformations in the visual system. *International Review of Physiology* 10: 223-248; Sparks D.L., Holland R. & Guthrie B.L. (1976) Size and distribution of movement fields in the monkey superior colliculus. *Brain Research* 113: 21-34.

expliquerait la variabilité des réponses à un stimulus tandis que pour le second groupe, cette variabilité contribuerait au contraire à rendre les mouvements plus précis en raison d'un processus situé en aval qui ferait une sorte de moyenne pondérée de l'ensemble des activités³³⁶. Les champs de réponse des neurones se recouvrent, d'autant plus que les cellules sont situées à proximité les unes des autres. Ce recouvrement témoigne aussi du fait qu'à chaque paramètre du monde externe correspond un continuum d'activation neuronale. Celui-ci diffère du continuum mathématique dans la mesure où ses éléments ne se distinguent pas les uns des autres comme les points ou les nombres; ils se chevauchent. Le continuum mathématique est différent dans la mesure où il est dense: entre deux valeurs, on peut toujours en intercaler une autre. Entre une barre inclinée de 45 degrés et une barre inclinée de 46 degrés, on peut insérer une infinité de barres dont l'inclinaison diffère de quelques décimales. De même, une infinité de nombres réels peut être insérée entre deux nombres réels et une multitude de points peuvent être ajoutés entre deux points. La correspondance que l'opération de mesure établit entre d'un côté l'activité neuronale et de l'autre côté la quantification n'est pas une relation bijective. Elle est surjective dans la mesure où une même valeur numérique peut être associée à des activations neuronales distinctes en étendue ou en intensité.

La modélisation mathématique a eu pour conséquence d'apporter un éclairage particulier sur la façon d'étudier le fonctionnement du cerveau à l'occasion des mouvements produits par un organisme animal. Elles ont suscité des expérimentations qui ont permis de faire des observations nouvelles qui pour certaines étaient tout à fait spectaculaires³³⁷. Aussi la question se pose-t-elle de savoir si cette efficacité résulte du confinement du champ des observations à l'intérieur d'un bassin sémantique soumis à des contraintes qui ne permettent pas d'appréhender autre chose que ce que son vocabulaire désigne. Il se peut que, de cette sorte, la théorie mette, pour ainsi dire, des œillères dans l'esprit des expérimentalistes tout

³³⁶ Robinson D.A. (1972) Eye movements evoked by collicular stimulation in the alert monkey. *Vision Research* 12: 1795-1808; Sparks D.L., Holland R. & Guthrie B.L. (1976) *Op. cit.*

³³⁷ Nichols M.J. & Sparks D.L. (1995) Nonstationary properties of the saccadic system: new constraints on models of saccadic control. *Journal of Neurophysiology* 73: 431-435 ; Nichols M.J. & Sparks D.L. (1996) Component stretching during oblique stimulation-evoked saccades: the role of the superior colliculus. *Journal of neurophysiology* 76 : 582-600 ; Nichols M.J. & Sparks D.L. (1996) Independent feedback control of horizontal and vertical amplitude during oblique saccades evoked by electrical stimulation of the superior colliculus. *Journal of Neurophysiology* 76 : 4080-4093.

en les guidant dans des directions qui les conduisent à faire des observations qui ne peuvent pas être interprétées autrement que selon l'éclairage qu'elle apporte.

L'étude des mouvements des objets dans le monde "extérieur" a permis d'écrire des lois dans un langage dont l'exactitude a facilité la construction de machines capables de regarder les objets du monde physique, de se déplacer vers eux et de les atteindre. L'espèce humaine a pu créer des robots capables de se mouvoir dans le même environnement que le sien, mais aussi dans des environnements radicalement différents, voire même hostiles à la vie humaine (comme la Lune ou la planète Mars). Ces machines ne relèvent pas du monde animal; les "exemples" les plus aptes n'ont pas été sélectionnés de la même manière. Leurs histoires et les contraintes environnementales qu'ils ont surmontées ne sont pas du tout comparables. Pourtant la similitude de performance et leur adaptation quasiment instantanée à leur environnement a conduit certains ingénieurs à imaginer que les machines qu'ils construisaient puissent être dotées de processus comparables à ceux des animaux vivants, et réciproquement que les animaux vivants puissent répondre aux mêmes impératifs, aux mêmes contraintes que leurs machines. Si les animaux vivants se montrent capables de capturer un objet à l'endroit où il se trouve et au moment où il y passe, ce serait selon eux parce que les lois physiques du mouvement seraient internalisées, "en-corporées" dans leur physiologie comme elles le sont dans le plan d'élaboration qui a guidé la construction des machines. Cette en-corporation ne se limite pas à aux lois physiques du mouvement. Nous avons vu dans le chapitre introductif certains auteurs proposer qu'elle concerne même les mathématiques et les statistiques.

C'est une opinion largement répandue et devenue triviale que la survie repose sur l'adaptation du comportement aux contraintes changeantes du milieu. L'adaptation implique la possibilité de corriger les mouvements lorsqu'ils sont imprécis. La congruence spatio-temporelle témoignée par la précision des mouvements quand ils sont dirigés vers une cible mobile a possiblement amené des chercheurs à imaginer une similitude entre les principes supposés régir le comportement et les contraintes de l'environnement. Certains ont même assimilé ces principes aux lois qui sont proposées régir le monde physique. De cette concordance issue de l'adaptation a sans doute pu naître la croyance chez une multitude de chercheurs en psychologie cognitive qu'"une perception précise du temps et de l'espace est essentielle pour le comportement humain", et que "comme le temps et l'espace sont

*inextricablement liés dans le monde physique, ils sont aussi liés dans le cerveau humain*³³⁸. Malheureusement, de telles déclarations confondent le fonctionnement cérébral, soumis à des contraintes prioritairement intrinsèques, comme sa connectivité et sa physiologie, avec l'ensemble des notions que les sciences physico-mathématiques utilisent pour mesurer le résultat d'une action dans le monde "extérieur". Or, si comme le rappelle le philosophe Ferdinand Gonseth, *"le temps, aussi bien que les coordonnées spatiales qui figurent dans les formules de [la théorie] de la relativité sont des fictions ... il en est de même pour le temps et l'espace de la mécanique et de la physique classiques"*³³⁹, ou si comme le disait aussi le mathématicien Jean-Marie Souriau, *"les mots temps, espace ... n'ont pas de contenu physique direct"*, s'ils ne sont que *"les signes formels de théories physiques révisables, et maintenant périmées"*³⁴⁰, alors nous devons nous interroger sur le sens qu'il y aurait à rechercher leur correspondance dans le fonctionnement cérébral. Ces fictions et ces conventions ont indubitablement été utiles car *"si ce n'est pas elles que nous pouvons véritablement mesurer lorsque nous interrogeons le monde, c'est grâce à elles que nos mesures peuvent s'ordonner et prendre un sens"*³⁴¹. Enfin, il ne faut pas, pour construire une science, confondre la mesure et l'objet sur lequel elle porte. Plusieurs siècles auparavant, Isaac Newton nous avertissait déjà que *"le temps et le lieu en eux-mêmes ne tombent pas sous les sens, mais sont mesurés au moyen de choses sensibles, telles que la grandeur des corps, leurs positions, mouvements locaux, et tout changement uniformément réalisé"* pour conclure que *"le vulgaire prend ces mesures pour être les choses mesurées"*³⁴². De même Henri Poincaré s'interrogeait-il aussi sur ces *"instruments que les mathématiques mettent entre les mains du chercheur"*³⁴³ pour investiguer la nature.

Ces remarques sont importantes car les procédures mises en œuvre au cours des dernières décennies pour mesurer le mouvement d'un membre comme le globe oculaire ou celui d'un objet matériel dans le monde "extérieur" ont largement influencé l'étude

³³⁸ Magnani B., Mangano G.R., Frassinetti F. & Oliveri M. (2013) The role of posterior parietal cortices on prismatic adaptation effects on the representation of time intervals. *Neuropsychologia* 51:2825-2832.

³³⁹ Gonseth F. (1926, 1974) *Les fondements des mathématiques*. Blanchard : Paris, page 123.

³⁴⁰ Souriau J.-M. (1970) *Structure des systèmes dynamiques*. Dunod, Paris, page xiii.

³⁴¹ Gonseth F. (1926, 1974) *Op. cit.*

³⁴² Newton I. (1692) Tempus et locus. In : J.E. McGuire (1978) Newton on Place, Time and God : an unpublished source. *The British Journal for the History of Science* 11: 114-129.

³⁴³ Poincaré H. La science et l'hypothèse, *Op. cit.*, page 5.

neurophysiologique de la transformation qui se produit dans le cerveau, entre les signaux visuels déclenchés par un objet et les commandes musculaires qui vont permettre de le capturer. Des notions ont été introduites dans les sciences du cerveau et ont guidé la recherche des processus neuronaux sous-jacents. Elles l'ont égarée parce que nous allons le voir, elles ne se sont pas souciées de vérifier si les notions mathématiques qu'elles mettaient dans les mains des neurophysiologistes étaient compatibles avec les principes fondamentaux de leur domaine.

3.6. Une refondation à partir de la notion d'équilibre

Il est fréquent de lire que la direction du regard (ou la ligne de mire) est déplacée d'un point à un autre. L'attribution de valeurs numériques (coordonnées) au regard et à la cible entraîne inévitablement des différences, d'autant plus aisément que les mesures sont faites avec une résolution élevée. Or une différence numérique n'implique pas nécessairement une différence équivalente dans l'activité cérébrale. Les objets du monde physique ne sont pas des points mathématiques et la fixation visuelle ne repose pas sur une fovéa composée d'un seul photorécepteur vers lequel convergent tous les faisceaux lumineux. Nous avons vu que le caractère divergent des projections anatomiques, d'abord des cellules ganglionnaires de la rétine vers les neurones des premiers noyaux de relais dans le cerveau, puis de ces neurones aux cellules suivantes situées dans de multiples aires du cortex cérébral, et ainsi de suite, produit une arborescence dynamique pareille à une explosion qui n'a rien de comparable à un point, une ligne ou une figure géométrique. L'apparition d'une petite cible dans le champ visuel conduit à l'excitation d'un grand nombre de neurones distribués dans le cerveau. Nous avons utilisé la notion d'explosion pour caractériser le recrutement imposé par la connectivité divergente des neurones: le potentiel d'un neurone est transmis à une multitude d'autres neurones situés dans plusieurs territoires différents. Nous avons expliqué aussi que lorsque nous enregistrons leur émission de potentiels d'action, les cellules neuronales, visuelles, visuomotrices ou motrices³⁴⁴, ont un champ de réponse étendu. Cette extension indique

³⁴⁴ Le test de saccade retardée permet de distinguer l'activité (appelée réponse visuelle) suscitée par l'apparition de la cible visuelle de celle (dite motrice) qui conduit à la production d'une saccade vers la cible. Pour le singe testé, sa tâche consiste à attendre que la cible qu'il regarde s'éteigne pour aller regarder la cible périphérique qui est apparue peu de temps

qu'un objet dans le champ visuel, qu'une saccade mobilisent l'activité d'un ensemble de plusieurs cellules³⁴⁵. Dans de nombreuses régions visuelles et visuomotrices du cortex cérébral, comme dans le colliculus supérieur, les neurones sont disposés dans des couches de telle sorte que des cellules voisines sont sensibles à la stimulation de régions voisines dans le champ visuel, ou alors elles émettent une rafale de potentiels d'action lors de saccades dirigées vers des emplacements voisins dans le monde physique. Malgré la connectivité divergente mentionnée plus haut, la topologie rétinienne est donc préservée. La conséquence de l'extension des champs de réponse est que des objets voisins, ou des saccades du regard vers les emplacements où ils se trouvent chacun, excitent des populations de neurones qui se chevauchent. Ce chevauchement d'activité est largement négligé quand l'accent est mis sur les différences numériques mesurées entre la direction du regard et celles de chaque cible. A notre connaissance, la majorité des modèles considèrent cette erreur motrice comme la commande qui détermine le but à atteindre et qui guide le mouvement d'orientation du regard. Or, ce recouvrement pourrait jouer un rôle plus fondamental qu'on ne le croit. Il pourrait notamment participer au déclenchement du mouvement dans la mesure où le regard ne pourrait pas être réorienté ailleurs que l'endroit actuellement inspecté tant que le réseau de canaux visuo-moteurs mobilisés reste dans un mode où le recouvrement est bilatéral dans le cerveau et que les commandes qu'il engendre sont mutuellement antagonistes, se contrebalancent les unes les autres. Dans certains troubles pathologiques induits

auparavant. Les cellules visuomotrices sont caractérisées par un accroissement de leur émission de potentiels d'action peu de temps après l'apparition de la cible et aussi peu de temps avant le début de la saccade. Entre ces deux phases, la cellule peut devenir "silencieuse" (n'émettre aucun potentiel d'action) soit maintenir une activité soutenue mais de moindre ampleur que les réponses visuelles et motrices. Les cellules dites visuelles ne manifestent qu'un accroissement d'activité peu de temps après l'apparition de la cible, l'activité des cellules dites motrices n'augmente que peu de temps avant la saccade.

³⁴⁵ McIlwain J.T. (1976) Large receptive fields and spatial transformations in the visual system. *International Review of Physiology* 10: 223-248. Sparks D.L., Holland R. & Guthrie B.L. (1976) Size and distribution of movement fields in the monkey superior colliculus. *Brain Research* 113: 21-34.

expérimentalement³⁴⁶ et même dans des cas normaux³⁴⁷, on peut constater qu'une fixation est engagée et qu'elle est relativement stable alors que le regard n'est pas du tout dirigé vers le centre de la cible comme on le constate habituellement. Le regard est dirigé vers un endroit décalé. Aucun mouvement oculaire n'est déclenché en dépit d'un écart, d'une différence entre les valeurs numériques de direction du regard et de la cible. De même, un équilibre modifié entre des commandes mutuellement antagonistes peut expliquer le décalage de l'orientation de la tête vers une cible lorsqu'une lésion affecte certaines régions du colliculus supérieur ou des noyaux profonds du cervelet médian³⁴⁸. Les processus neuronaux qui déterminent l'endroit vers lequel diriger le regard ou diriger la tête peuvent donc ne pas reposer sur un codage intracérébral d'attributs spatiaux tels que la direction de la cible, celle du regard ou de la tête, et leur écart mais plutôt sur un équilibre entre les activités véhiculées au sein de canaux mobilisant des ensemble de neurones dont les activités exercent des tendances motrices directionnelles qui, mutuellement, s'opposent.

Cette nouvelle idée conduit à envisager autrement la nature des changements d'orientation du regard et de la tête, tels qu'on les observe pendant les saccades ou les mouvements lents de poursuite. Intrinsèquement, ils ne résultent pas de la réduction d'une différence, d'un écart entre des signaux codant des paramètres physiques tels que la direction, la vitesse de la cible ou du regard. Chacun des changements serait simplement la manifestation, mesurable au niveau de l'orientation du globe oculaire, voire même de la tête,

³⁴⁶ Dias E.C. & Segraves M.A. (1999) Muscimol-induced inactivation of monkey frontal eye field: effects on visually and memory-guided saccades. *Journal of Neurophysiology* 81: 2191–2214; Goffart L., Hafed Z.M. & Krauzlis R.J. (2012) Visual fixation as equilibrium: evidence from superior colliculus inactivation. *Journal of Neuroscience* 32: 10627–10636; Guerrasio L., Quinet J., Büttner U. & Goffart L. (2010) The fastigial oculomotor region and the control of foveation during fixation. *Journal of Neurophysiology* 103: 1988–2001; Sato H. & Noda H. (1992) Saccadic dysmetria induced by transient functional decortication of the cerebellar vermis. *Experimental Brain Research* 88: 455–458.

³⁴⁷ Goffart L., Quinet J. *et al.* (2006) Influence of background illumination on fixation and visually guided saccades in the rhesus monkey. *Vision Research* 46: 149–162.

³⁴⁸ Goffart L. & Pélisson D. (1998) Orienting gaze shifts during muscimol inactivation of caudal fastigial nucleus in the cat. I. Gaze dysmetria. *Journal of Neurophysiology* 79: 1942–1958; Isa T., Itouji T. & Sasaki S. (1992) Control of head movements in the cat: two separate pathways from the superior colliculus to neck motoneurons and their roles in orienting movements. In: *Vestibular and Brain Stem Control of Eye, Head and Body Movements*. H. Shimazu & Y. Shinoda (Eds.), Japan Scientific Societies Press, Tokyo, pp. 275–284.

d'une transition entre un état déséquilibré, une répartition asymétrique des activités et un état d'équilibre entre des tendances mutuellement antagonistes réparties dans plusieurs régions du cerveau. Dans le détail de ses composantes, cet équilibre n'est pas nécessairement strictement symétrique, de la même manière que le vecteur $(-10;0)$ peut être compensé par la combinaison des deux vecteurs obliques $(10;10\sqrt{2})$ et $(10;-10\sqrt{2})$ ³⁴⁹. Selon cette hypothèse alternative, le décours temporel d'une saccade, sa vitesse est l'expression des flux d'activité qui se propagent de la rétine jusqu'aux cellules motrices qui commandent la contraction des fibres musculaires. Ainsi, nous pouvons désormais comprendre pourquoi la perturbation d'une région corticale qui classiquement fut considérée comme impliquée dans la spécification de l'endroit vers lequel il faut diriger le regard³⁵⁰, et donc située en amont des assemblées de neurones prémoteurs, entraîne elle-aussi, non seulement un décalage de fixation, mais aussi un ralentissement des saccades.

3.7. A propos du codage neuronal de la vitesse des saccades

Au cours des dernières décennies, les développements techniques ont apporté la possibilité de mesurer les mouvements oculaires avec une résolution temporelle tellement élevée que la vitesse instantanée et ses variations ont pu être calculées avec une approximation très élevée. Elles ont donné à voir la vitesse des saccades avec un décours temporel en forme de cloche avec une croissance jusqu'à une certaine valeur maximale au-delà de laquelle la vitesse déclinait. Alors qu'ils reposent sur la mobilisation de groupes musculaires et de réseaux neuronaux largement distincts, les mouvements de la tête et même ceux du doigt transporté pour toucher une zone délimitée d'une table montrent eux aussi un profil de vitesse en forme de cloche. De nombreux électrophysiologistes ont étudié si le taux de décharge instantané des neurones pouvait "coder" ou rendre compte de la vitesse ou

³⁴⁹ Goffart L. (2020) Itinéraire pour une contribution de la Neurophysiologie de l'orientation du regard à la recherche des conditions de possibilité de l'intuition spatiale. Aix-Marseille Université (AMU). tel-02968991v2 : voir la figure 39

³⁵⁰ Dias E.C. & Segraves M.A. (1999) Muscimol-induced inactivation of monkey frontal eye field: effects on visually and memory-guided saccades. *Journal of Neurophysiology* 81: 2191–2214; Sparks D.L., Lee C. & Rohrer W.C. (1990) Population coding of the direction, amplitude and velocity of saccadic eye movements by neurons in the superior colliculus. *Cold Spring Harbor Symposium on Quantitative Biology* 55: 805-811.

l'accélération des mouvements oculaires. Des corrélations ont été trouvées par exemple par Alain Berthoz et ses collaborateurs au niveau de certains neurones colliculaires. Ces auteurs rapportent une ressemblance entre la fréquence instantanée des potentiels d'action émis par sept neurones et la vitesse instantanée d'une saccade oculaire produite par un chat³⁵¹. Pour étayer leur argument, ils nous montrent trois exemples illustrant cette ressemblance. Malheureusement, rien n'est dit du nombre de fois où elle a été testée ni de la proportion que ces neurones représentent par rapport à l'ensemble des neurones enregistrés. Cette critique n'est pas anodine car cela n'a pas la même signification de dire qu'un neurone émet une rafale de potentiels d'action dont le dérouls temporel ressemble grossièrement au profil de vitesse des saccades une fois sur dix que de dire que cette ressemblance apparaît systématiquement dans l'activité du neurone. De même que cela n'a pas la même signification de dire que sept neurones sur dix émettent une rafale de potentiels d'action dont le dérouls temporel ressemble au profil de vitesse des saccades que de dire que ces neurones représentent un pour cent de l'ensemble des neurones colliculaires. La suggestion d'un codage de la vitesse instantanée par la fréquence de décharge instantanée des neurones colliculaires demeurera une observation anecdotique jusqu'à ce que le neurophysiologiste Neeraj Gandhi et ses collègues réexaminent cette relation sur la base de multiples enregistrements réalisés chez le singe³⁵². Malheureusement, cette étude élabore une démonstration dans laquelle chaque potentiel d'action est remplacé par une courbe gaussienne, transformant du coup la séquence de potentiels d'action en un phénomène continu. Procédant ainsi, les auteurs sont en mesure de pouvoir tester la corrélation statistique entre deux fonctions continues, à savoir le dérouls temporel de la vitesse et le dérouls temporel de l'activité neuronale mathématiquement remaniée. Nous n'allons pas faire la critique détaillée de la manière compliquée avec laquelle ils vont essayer de soutenir leur hypothèse car il suffit simplement de signaler que l'activité des neurones colliculaires est sensible au niveau de vigilance et de motivation et qu'une baisse de vigilance ou de motivation atténuée à la fois la vitesse des saccades et la décharge des neurones colliculaires et de leurs cibles post-synaptiques. Autrement dit, la relation décrite

³⁵¹ Berthoz A., Grantyn A. & Droulez J. (1986) Some collicular efferent neurons code saccadic eye velocity. *Neuroscience Letters* 72: 289-294.

³⁵² Smalianchuk I., Jagadisan U.K. & Gandhi N.J. (2018) Instantaneous midbrain control of saccade velocity. *Journal of Neuroscience* 38: 10156-10167.

par l'équipe de Neeraj Gandhi peut être une illustration de cette causalité tierce. Une remarque de même ordre vaut pour les conclusions que Reza Shadmehr, un des leaders contemporains des neurosciences computationnelles, tirent avec ses collègues de leur analyse de l'activité des cellules de Purkinje dans le vermis oculomoteur enregistrées chez le singe³⁵³. Selon ces auteurs, la fréquence instantanée "prédit" la vitesse instantanée de la saccade. Malheureusement, plusieurs anomalies dans les illustrations fournies conduisent à suspecter que leur conclusion résulte d'une hétérogénéité des données vraisemblablement causée par le regroupement d'enregistrements réalisés chez des singes ne se comportant pas de la même manière. La corrélation entre activité neuronale et la vitesse des saccades ne serait donc pas causée par la vitesse des saccades, mais par une idiosyncrasie liée à un singe se comportant différemment des autres³⁵⁴. Il est en effet connu que différents singes exhibent une relation différente entre l'amplitude et la vitesse maximale de leurs saccades. Lorsque nous examinons par exemple une étude de Yohiko Kojima et de ses collaborateurs³⁵⁵ dans laquelle les singes ont possiblement été utilisés pour les enregistrements décrits par l'étude de Reza Shadmehr, alors nous voyons qu'aucune saccade d'amplitude de 10 degrés n'a de vitesse maximale supérieure à 500 degrés par seconde chez le singe B (leur figure 3A) alors que chez le singe W, quelques-unes ont une vitesse supérieure à 500 degrés par seconde (leur figure 3D).

³⁵³ Herzfeld D.J., Kojima Y., Soetedjo R. & Shadmehr R. (2015). Encoding of action by the Purkinje cells of the cerebellum. *Nature* 526 : 439-442.

³⁵⁴ Le bas de la figure 3b (toutes les saccades) montre un changement moyen de la réponse de la population culminant à 950 potentiels d'action par seconde pour des saccades de 10 degrés (courbe rouge) tandis que la figure 3f montre des valeurs maximales de 750, 1550 et 2450 potentiels d'action par seconde pour des saccades dont la vitesse maximale est respectivement de 400 (rouge), 525 (vert) et 650 (bleu) degrés par seconde. Un changement de la moyenne générale de 950 potentiels d'action par seconde peut être obtenu avec ces 3 ensembles de données si, par exemple, les saccades avec une vitesse de pointe de 400, 525 et 650 deg/s correspondent à 80 %, 15 % et 5 % de toutes les saccades de 10 degrés. Autrement dit, nous sommes amenés à nous demander si les différentes réponses de la population (traces rouges, vertes et bleues) montrées dans la figure 3f de Herzfeld et al. (2015) résultent du fait que différents singes ont été testés, que les saccades plus rapides ont été enregistrées chez un et un seul singe. Si tel est le cas, alors la corrélation entre la vitesse de saccade et le changement de réponse de la population serait due à un biais idiosyncratique provoqué par les mesures effectuées chez ce singe.

³⁵⁵ Kojima Y., Soetedjo R. & Fuchs A.F. (2010) Effects of GABA agonist and antagonist injections into the oculomotor vermis on horizontal saccades. *Brain Research* 1366 : 93-100.

De manière plus critique encore, ces deux études sont difficilement compatibles avec les observations faites par David Sparks et ses collaborateurs au niveau de l'activité des neurones prémoteurs vers lesquels les neurones colliculaires projettent. Ceux-ci ont en effet une activité dont le décours temporel n'est pas du tout corrélé avec la vitesse instantanée des saccades puisque la fréquence instantanée de leur émission des potentiels d'action est quasiment constante, pareille à la cadence d'une horloge³⁵⁶. Plus problématique encore est cette découverte mentionnée plus haut qu'un modèle prenant en compte la tension musculaire et sa dérivée première décrit le taux de décharge des motoneurons mieux qu'un modèle tenant compte de la position des yeux et de ses dérivées première (vitesse) et seconde (accélération)³⁵⁷. Par conséquent, si l'activité des neurones colliculaires code la vitesse instantanée de la saccade oculaire, alors, en aval, cette commande cinématique doit être transformée en commande dynamique. Neeraj Gandhi n'explique pas comment. Il ne prend pas non plus en compte ni les résultats de David Sparks ni ceux d'Angel Pastor. De toute manière, toute tentative d'explication risque d'être vaine car le profil de vitesse d'une saccade et le développement de la force ne se superposent pas. Une décroissance de la force se produit avant que le changement d'orientation de l'œil ne cesse. De plus, le délai entre le début de la décroissance et la fin de la saccade est d'autant plus long que l'amplitude est grande³⁵⁸. On découvre ici qu'un même phénomène se manifeste de deux manières différentes selon que l'on mesure l'orientation de l'œil ou la force de contraction musculaire.

Au-delà de ces remarques qui peuvent paraître spécialisées, une remarque beaucoup plus fondamentale s'impose. Il faut garder à l'esprit les trois différences suivantes. Premièrement, alors que la saccade est l'expression comportementale (mesurable) de flux d'activité qui se déploient et de dissipent dans le cerveau, des nerfs optiques jusqu'aux nerfs moteurs extraoculaires, entre l'instant où la cible excite un groupe de cellules rétinienne et l'instant où la saccade se termine, dirigeant le regard plus ou moins loin de l'endroit où la cible

³⁵⁶ Hu X., Jiang H., Gu C., Li C. & Sparks D.L. (2007) Reliability of oculomotor command signals carried by individual neurons. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 104: 8137-8142.

³⁵⁷ Davis-López de Carrizosa M.A., Morado-Díaz C.J., Miller J.M., de la Cruz R.R. & Pastor A.M. (2011) Dual encoding of muscle tension and eye position by abducens motoneurons. *Journal of Neuroscience* 31: 2271-2279.

³⁵⁸ Lennerstrand G., Tian S. & Zhao T.X. (1993) Force development and velocity of human saccadic eye movements. I: Abduction and adduction. *Clinical Vision Sciences* 8: 295-305.

se trouve au même instant, le mouvement mesuré et son profil de vitesse sont chacun le résultat d'opérations mathématiques effectuées sur un intervalle de temps beaucoup plus court, un segment numérique plus resserré. Car, et c'est là le deuxième point également important dont il faut prendre conscience, le calcul de la vitesse instantanée repose sur des mesures consécutives d'orientation des yeux, chacune étiquetée d'un instant qui lui est propre. De dire qu'un événement se produit à l'instant t ne signifie pas la même chose que de dire qu'il se produit à l'instant $t+\delta$. Le temps physique est une procédure de mesure qui est utilisée pour distinguer différents instants tout en les liant les uns aux autres. La liaison entre les valeurs mesurées à des instants consécutifs est caractérisée par une certaine "rigidité": la valeur calculée de vitesse instantanée dépend des valeurs mesurées à proximité temporelle (peu de temps avant et après). Or, cette dépendance du paramètre mesuré à un instant donné vis-à-vis de l'avant et de l'après ne s'applique pas complètement à l'activité des neurones. Chacun des potentiels d'action émis par un neurone dépend des potentiels d'action émis ailleurs, par les neurones pré-synaptiques en l'occurrence, lesquels ne sont pas toujours émis en même temps. Les potentiels d'action présynaptiques qui contribuent à l'émission d'un potentiel d'action par le neurone post-synaptique ne sont pas contenus dans une même "nappe", dans une même "tranche" temporelle. Par conséquent, le calcul de la vitesse instantanée crée une continuité entre les valeurs numériques qui n'a aucune équivalence au niveau de la séquence des potentiels d'action émis par les neurones présynaptiques. Troisièmement, à un niveau plus macroscopique, entre d'un côté l'activité cérébrale et les mesures comportementales de l'autre, une sorte de projection géométrique est réalisée entre un objet multidimensionnel, à savoir l'activité spatio-temporellement distribuée dans le cerveau³⁵⁹ et ce petit segment unidimensionnel qu'est la mesure. Si l'échantillonnage de l'enregistrement de l'orientation des yeux ne se faisait pas avec le même seuil ou la même période d'une mesure à la suivante, des saccades d'amplitude identique présenteraient des profils de vitesse différents. Incidemment, lorsque le décours temporel, la cadence de décharge des neurones varie d'une saccade à l'autre et diffère du profil de vitesse des saccades, toutes précisément mesurées, certains neurophysiologistes ne soupçonnent pas une irrégularité dans l'"échantillonnage" cérébral. Ils avancent la notion de "bruit" et

³⁵⁹ Goffart L. (2018). De la représentation cérébrale spatio-temporellement distribuée à la capture ici et maintenant d'un objet visuel en mouvement. In: *L'avenir de la complexité et du désordre* (Eds. J-C. S. Lévy & S. Ofman) Editions matériologiques, pp 267-294.

l'introduisent dans le fonctionnement cérébral. Le bruit est donc considéré comme un phénomène biologique. Cette manière de procéder est problématique car elle postule que la cadence d'émission des potentiels d'action doit correspondre à la dimensionnalité et à la cadence régulière de l'opération de mesure. Les activités variables peuvent résulter simplement du fait que les mouvements oculaires ne sont pas l'unique expression mesurable de l'activité des neurones enregistrés. Des potentiels d'action peuvent être émis dans le cadre de processus qui ne conduisent pas à un mouvement oculaire saccadique ou lent mais à autre chose comme la variation du diamètre de la pupille, de la courbure du cristallin, la contraction des muscles du cou, un ajustement postural etc. Les études neuroanatomiques et électrophysiologiques nous enseignent en effet que les neurones ne forment pas une population homogène. Ceux qui présentent des activités liées aux cibles ou aux mouvements oculaires sont divers et se projettent dans une multitude de régions du cerveau. Même si des lois thermodynamiques régissent les processus cellulaires et moléculaires³⁶⁰ et peuvent rendre compte de la variabilité des activités neuronales, la variabilité peut tout aussi bien être causée par la procédure de mesure elle-même, à savoir par la mise en correspondance entre d'un côté une simple séquence de valeurs numériques totalement ordonnées (les valeurs d'orientation des yeux classées en fonction de leur date) et de l'autre côté, un phénomène physiologique multidimensionnel, mettant en œuvre des processus qui se chevauchent dans le temps. L'isomorphisme entre l'évolution de l'activité neuronale et la vitesse du mouvement d'un corps rigide tel que le globe oculaire ou un objet matériellement compact, suppose une correspondance biunivoque entre d'un côté, une série temporelle de valeurs numériques, et de l'autre côté, l'évolution temporelle de flux multiples et parallèles d'activité dans les canaux visuomoteurs du cerveau. Supposer une telle correspondance est une réduction qui néglige le fait que l'activité cérébrale correspondant à toute situation (mesurée ici et maintenant) n'est pas réductible à un point de coordonnées (x,y,z,t). Distribuée spatialement et temporellement dans le cerveau³⁶¹, l'activité ne change pas comme les coordonnées mesurées d'un corps en

³⁶⁰ Choquet D. & Triller B. (2013) The dynamic synapse. *Neuron* 80: 691-703, 2013

³⁶¹ Nowak L. & Bullier J. (1997) The timing of information transfer in the visual system. In: *Cerebral Cortex. Extrastriate Cortex in Primates*, edited by Rockland KS, Kaas J.H. & Peters A. New York: Plenum, 1997, vol. 12, p. 205–241; Schmolesky M.T., Wang T., Hanes D.P, Thompson K.G., Leutgeb S., Schall J.D. & Leventhal A.G. (1998) Signal timing across the macaque visual system. *Journal of Neurophysiology* 79: 3272–3278, 1998.

mouvement. Pour preuve, lorsque nous étudions les potentiels d'action que les neurones du colliculus supérieur émettent lors des saccades vers une cible en mouvement, nous découvrons que la population de neurones actifs ne change pas aussi vite que l'emplacement de la cible, qu'une activité résiduelle liée aux lieux récemment parcourus persiste³⁶². De même au niveau comportemental, lorsque nous examinons les saccades vers une cible en mouvement transitoire, ou même les mouvements oculaires poursuivant une cible qui soudainement disparaît, nous rencontrons de nombreux cas où le regard est dirigé vers des endroits où la cible n'est jamais allée³⁶³. Ces résultats montrent que la masse d'activité neuronale persiste au-delà du moment où se termine l'événement physique qui l'a provoquée. Hermann von Helmholtz déclarait que la comparaison entre une idée et un objet qu'elle représente n'avait pas de sens car ils sont "*deux choses qui appartiennent ... à deux mondes tout à fait différents et qui sont aussi peu susceptibles de comparaison que les couleurs et les sons, ou que les caractères d'un livre et le son du mot qu'ils représentent*"³⁶⁴. Comme lui, nous soutenons qu'il en est de même pour la comparaison entre l'activité d'un neurone et le profil de vitesse d'un mouvement. Tous deux relèvent de mondes fondamentalement et structurellement différents, le monde hyper-complexe du cerveau anatomo-physiologique et le continuum mathématique.

3.8. Le cerveau fait-il des calculs cinématiques quand un mouvement est produit?

Divers paramètres cinématiques (erreurs de direction, de vitesse et d'accélération) ont donc été considérés comme des signaux "codés" dans la cadence d'émission des potentiels d'action des neurones. Certains auteurs sont même allés jusqu'à tester statistiquement la relation entre leur combinaison linéaire et l'activité neuronale avec des délais tels que les

³⁶² Keller E.L., Gandhi N.J. & Weir P.T. (1996) Discharge of superior collicular neurons during saccades made to moving targets. *Journal of Neurophysiology* 76: 3573–3577; Goffart L., Cecala A.L. & Gandhi N.J. (2017) The superior colliculus and the steering of saccades toward a moving visual target. *Journal of Neurophysiology* 118: 2890-2901.

³⁶³ Quinet J. & Goffart L. (2015) Does the brain extrapolate the position of a transient moving target? *Journal of Neuroscience* 35: 11780–11790; Mitrani L. & Dimitrov G. (1978) Pursuit eye movements of a disappearing moving target. *Vision Research* 18: 537–539.

³⁶⁴ Helmholtz H. von (1821-1894). *Optique physiologique*, Paris: Masson, page 580 (444) .

potentiels d'action ne précèdent pas les instants du mouvement mais les suivent. Quand ils prétendent que les neurones enregistrés contrôlent le mouvement, on ne peut être qu'étonné et dubitatif sur la possibilité que des potentiels d'action émis après le mouvement puissent influencer son exécution³⁶⁵. L'activité de neurones dans diverses régions du cerveau est ensuite proposée assurer des fonctions cinématiques. Selon l'emplacement des neurones enregistrés, de telles procédures statistiques deviennent discutables car elles supposent que les signaux (potentiels d'action) sont transmis à travers un "support" identique au milieu des phénomènes physiques (continu, homogène et avec des attributs spatiaux et temporels orthogonaux). Nous avons vu que des techniques ont été développées pour transformer la cadence des potentiels d'action en une fonction continue et étudier des corrélations linéaires. Or, l'établissement de cette continuité serait trompeur si le paramètre critique dans la transmission neuronale n'était pas le décours temporel des potentiels d'action mais le potentiel membranaire post-synaptique et la synchronisation des potentiels d'action présynaptiques qui "bombardent" le neurone enregistré. Nous insistons encore une fois: ces potentiels d'action sont émis par des neurones répartis dans plusieurs régions cérébrales à des moments qui ne sont pas nécessairement synchrones. Comme nous l'avons expliqué plus haut, la continuité temporelle qui fait que la valeur de vitesse à un instant donné dépende de celle calculée à des instants précédents n'existe pas dans l'émission des potentiels d'action. Le potentiel d'action émis à un instant donné ne dépend pas des potentiels d'action précédents mais de ceux émis par les neurones présynaptiques, lesquels peuvent être situés dans différentes régions plus ou moins distantes.

Considérons par exemple la décharge des motoneurones qui innervent les fibres des muscles extraoculaires, l'interprétation de la corrélation entre la cinématique des saccades et la séquence des potentiels d'action peut être satisfaisante car ces derniers provoquent la contraction des fibres musculaires extraoculaires qui, à leur tour, exercent le couple responsable de la rotation du globe oculaire. Si nous étudions les neurones prémoteurs qui innervent les motoneurones, l'interprétation est compliquée par le fait que plusieurs afférences convergent sur ces derniers. Les motoneurones reçoivent en effet des signaux en provenance de neurones excitateurs situés dans la formation réticulaire paramédiane

³⁶⁵ Sun Z., Smilgin A., Junker M., Dicke P.W. & Thier P. (2017) The same oculomotor vermal Purkinje cells encode the different kinematics of saccades and of smooth pursuit eye movements. *Science Reports* 7: 40613.

ipsilatérale, de neurones inhibiteurs dans la formation réticulaire médullaire controlatérale et de neurones localisés bilatéralement dans les noyaux prépositus hypoglossi et vestibulaires médians gauche et droit. Ces différents groupes de neurones ne manifestent pas des activités dont l'évolution temporelle est identique. Les signaux afférents aux motoneurones provenant de neurones répartis dans différentes régions et émis à différents instants, la corrélation entre le taux de décharge et la cinématique de la saccade se retrouve inévitablement affaiblie. On comprend alors que cette corrélation devient de plus en plus faible et trompeuse lorsqu'on étudie le taux de décharge des neurones situés plus centralement, en amont de ceux qui innervent ces neurones prémoteurs.

Une manière possible de rendre utiles l'étude des corrélations entre la fréquence d'émission des potentiels d'action et la cinématique serait de prendre en compte l'origine des potentiels d'action qui convergent de manière plus ou moins synchrone sur les neurones enregistrés. Malheureusement, cette analyse est compliquée par le fait que les signaux afférents sont transmis avec des vitesses de conduction inconnues et potentiellement diverses à travers des axones de longueurs également diverses. En d'autres termes, l'activité d'un neurone prémoteur peut être déclenchée par des potentiels d'action émis à différents moments par des neurones présynaptiques situés dans différentes régions. Ainsi, l'intervalle de temps pendant lequel une variation de l'activité des motoneurones se répercute directement sur la vitesse instantanée d'un mouvement oculaire est le résultat d'une activité produite pendant un intervalle de temps dont la durée est plus longue. Le problème est compliqué davantage par le fait que la transmission neuronale dépend aussi de l'emplacement des contacts synaptiques sur la cellule (à proximité du soma et/ou sur les dendrites) dont les propriétés intrinsèques influencent également l'évolution dans le temps et la cadence d'émission des potentiels d'action³⁶⁶. Un point de vue plus macroscopique révèle que, même dans le cas où la scène visuelle est totalement statique, l'activité ne reste pas stationnaire ; elle se propage vers les cellules voisines comme cela a été montré dans le colliculus

³⁶⁶ Bras H., Gogan P. & Tyc-Dumont S. (1987) The dendrites of single brain-stem motoneurons intracellularly labelled with horseradish peroxidase in the cat. Morphological and electrical differences. *Neuroscience* 22: 947–970. Durand J. (1989) Electrophysiological and morphological properties of rat abducens motoneurons. *Experimental Brain Research* 76: 141–152.

supérieur³⁶⁷. En résumé, l'interprétation de la corrélation entre la cadence de décharge des neurones centraux et la cinématique du mouvement oculaire doit être faite en rappelant tous ces écueils pour éviter que les lecteurs ne croient trop hâtivement que les notions de la mécanique classique puissent être aussi aisément appliquées à la description du fonctionnement interne du cerveau.

Pour évaluer les changements qui se produisent dans l'activité cérébrale pendant qu'une cible se déplace dans le champ visuel ou pendant que le regard la capture et la poursuit, rien n'oblige à mettre en correspondance l'activité des neurones avec des notions cinématiques. C'est la simplicité et la commodité qui ont conduit certains chercheurs à procéder ainsi. Comme Andras Pellionisz et Rodolfo Llinás, nous pensons que l'utilisation de coordonnées spatiales et temporelles séparées n'est pas applicable à la description du fonctionnement interne du SNC³⁶⁸. Quand on dit que la vitesse d'une cible est le stimulus qui guide les mouvements oculaires de poursuite, cette relation doit être restreinte aux ensembles de valeurs numériques qui appartiennent au même milieu, à savoir le monde physique, et pour lequel la cinématique a prouvé son efficacité dans l'analyse des mouvements des corps rigides. Ce milieu est soumis à des contraintes qui sont différentes de celles qui régissent le fonctionnement interne du cerveau. Du nerf optique aux nerfs oculomoteurs, l'activité neuronale ne traverse pas un milieu neutre, homogène, isotrope et continu. Imaginer qu'une différenciation mathématique ait été effectuée est discutable car les activités neuronales ne sont pas réductibles à une infinitude de points qui se suivent les uns derrière les autres. La série temporelle de mesures est un continuum mathématique qui n'est pas homéomorphe à l'aspect fondamentalement parallèle et distribué des processus neurophysiologiques, tant au niveau cellulaire qu'au niveau des réseaux. Très tôt dans sa carrière, le neurophysiologiste David Robinson nous avertissait pourtant déjà que *“les schémas fonctionnels de l'organisation oculomotrice servent de description compacte du comportement du système mais ont rarement une incidence sur la manière dont le système*

³⁶⁷ Anderson R.W., Keller E.L., Gandhi N.J. & Das S. (1998) Two-dimensional saccade related population activity in superior colliculus in monkey. *Journal of Neurophysiology* 80: 798–817; Sparks D.L., Holland R. & Guthrie B.L. Size and distribution of movement fields in the monkey superior colliculus. *Brain Research* 113: 21–34, 1976.

³⁶⁸ Pellionisz A. & Llinás R. (1982) Space-time representation in the brain. The cerebellum as a predictive space-time metric tensor. *Neuroscience* 7: 2949–2970.

*réel, composé de nerfs et de muscles, fonctionne réellement. Les modèles ne contribuent donc pas beaucoup à la neurophysiologie (ou neurologie) des mouvements oculaires et ils font courir le danger de suggérer qu'il existe en fait des parties séparées du système nerveux qui effectuent la différenciation, l'intégration et d'autres opérations indiquées dans les cases des diagrammes*³⁶⁹

3.9. La thèse des rétrocontrôles négatifs dans le cerveau

La solution la plus simple qui fut proposée pour modéliser l'exécution des saccades est un processus qui réduit, par le jeu d'une rétroaction négative, la différence entre d'une part une direction souhaitée du regard, laquelle correspondrait donc à une estimation de l'emplacement de la cible sélectionnée, et d'autre part, une estimation de la direction actuelle du regard. Si nous supposons un codage neuronal de ces attributs spatiaux, les signaux correspondants doivent être exprimés dans le même référentiel, par exemple par rapport au tronc comme l'avait proposé David Robinson³⁷⁰. Dans ce cadre théorique, l'erreur motrice qui résulte de leur comparaison active les neurones prémoteurs qui à leur tour émettent des potentiels d'action selon une cadence proportionnelle à la taille de l'erreur. A mesure que le regard se rapproche de la cible, l'erreur motrice diminue, réduisant de fait l'excitation des neurones prémoteurs jusqu'à ce qu'ils cessent d'émettre des potentiels d'action et donc d'exciter les motoneurones. Ce point de vue fut affiné quelques années plus tard en remplaçant le codage des directions du regard et de la cible par un codage du changement de leur direction ou de leur déplacement requis³⁷¹. Cette modification fut proposée comme une alternative possible car les électrophysiologistes ne parvenaient pas à trouver dans le cerveau des cellules dont l'activité signalerait la direction d'une cible par rapport au tronc³⁷². La grande majorité des neurones (visuels ou visuomoteurs) présentent en effet un champ de réponse

³⁶⁹ Robinson D.A. (1971) Models of oculomotor neural organization. In: *The control of eye movements*, P. Bach-Y-Rita, C. Collins & J. Hyde (Eds), Academic Press, pp 519-538.

³⁷⁰ Robinson D.A. (1975) Oculomotor control signals. In: *Basic mechanisms of ocular motility and their clinical implications*, Lennerstrand G & Bach-y-Rita P. (Editeurs) Oxford: Pergamon p. 337–374; Lauritis V.P. & Robinson D.A. (1986) The vestibulo-ocular reflex during human saccadic eye movements. *Journal of Physiology* 373: 209–233.

³⁷¹ Jürgens R., Becker W. & Kornhuber H.H. (1981) Natural and drug-induced variations of velocity and duration of human saccadic eye movements: evidence for a control of the neural pulse generator by local feedback. *Biological Cybernetics* 39: 87–96.

³⁷² *Ibid.*

qui se déplace avec les yeux. Les cellules émettent des potentiels d'action quand un stimulus apparaît dans une région délimitée du champ visuel, définie rétinotopiquement. Le signal de rétroaction responsable de la réduction de l'erreur motrice fut alors remplacé par un signal estimant le déplacement parcouru par le regard. Les saccades restèrent sous le contrôle d'une commande d'erreur motrice. La seule chose qui changea fut le signal à l'entrée de la boucle de rétroaction et les signaux corrigeant l'erreur motrice.

Pendant de nombreuses années, cette hypothèse d'un rétrocontrôle négatif fut bien accueillie par la communauté de neurophysiologistes car elle était une solution pratique et simple à cette question plus fondamentale de comprendre comment un lieu sur la rétine ou sur le colliculus supérieur est transformé en durée d'activité des motoneurones, la transformation spatio-temporelle que nous avons signalée plus haut³⁷³. La solution était simple car elle supprimait la nécessité de rechercher dans l'activité cérébrale un processus qui "coderait" la durée des saccades, comme le neurologue Hans Kornhuber l'avait initialement proposé avec son l'hypothèse chronométrique³⁷⁴. Avec le rétrocontrôle négatif, il n'y a pas besoin d'un chronomètre interne. La durée de la saccade dérive du processus qui réduit l'inadéquation entre deux grandeurs spatiales (position ou déplacement) supposées estimées par des processus neuronaux dédiés. La différence entre les deux principaux modèles proposés, "direction" versus "déplacement" est que les signaux de rétroaction doivent être "remis à zéro" à la fin de chaque saccade dans le modèle de déplacement. Car si ce n'était pas le cas, la combinaison des signaux résiduels produits par le mouvement oculaire qui vient tout juste de se terminer avec des signaux provoqués par l'apparition d'une nouvelle cible visuelle conduirait à des saccades imprécises. Une série d'expériences furent réalisées par Jamie Nichols et David Sparks afin de confronter ces deux hypothèses et finalement réfuter l'option

³⁷³ Moschovakis A.K., Scudder C.A. & Highstein S.M. (1996) The microscopic anatomy and physiology of the mammalian saccadic system. *Progress in Neurobiology* 50: 133-254; Moschovakis A.K., Kitama T., Dalezios Y., Petit J., Brandi A.M. & Grantyn AA (1998) An anatomical substrate for the spatiotemporal transformation. *Journal of Neuroscience* 18: 10219-10229; Scudder C.A., Kaneko C.S. & Fuchs A.F. (2002) The brainstem burst generator for saccadic eye movements: a modern synthesis. *Experimental Brain Research* 142: 439-462; Sparks D.L. (2002) The brainstem control of saccadic eye movements. *Nature Reviews Neuroscience* 3: 952-964.

³⁷⁴ Kornhuber H.H. (1971) Motor functions of cerebellum and basal ganglia: the cerebellocortical saccadic (ballistic) clock, the cerebellonuclear hold regulator, and the basal ganglia ramp (voluntary speed smooth movement) generator. *Kybernetik* 8: 157-162.

du codage directionnel³⁷⁵. Aussi le débat fut-il relancé peu de temps après, avec notamment les résultats d'expériences réalisées par le neurophysiologiste Edward Keller, un élève de David Robinson,³⁷⁶. Ces résultats conduisirent à modérer la généralisation des conclusions de David Sparks jusqu'à ce qu'un autre neurophysiologiste, John Schlag, propose avec son équipe, que les signaux de rétroaction informant de la direction du regard ne suivent pas la même évolution temporelle que son orientation physique³⁷⁷. Pour la première fois, un désaccord fut imaginé entre, d'une part, l'évolution temporelle de la représentation neuronale de l'orientation du regard et, d'autre part, l'évolution temporelle de son orientation physiquement mesurée. Selon John Schlag, les signaux neuronaux informant de l'orientation des yeux précéderaient, et donc anticiperaient, le début de la saccade, changeraient au fur et à mesure que les yeux se déplacent, mais pas aussi vite. Ils s'estomperaient bien après que la saccade ne soit terminée.

L'hypothèse du rétrocontrôle négatif est un cadre conceptuel, d'inspiration cybernétique. Il fut utile pour engendrer des questionnements et provoquer une multitude d'expérimentations, lesquelles ont permis de faire de nouvelles observations qu'il a fallu interpréter. Aussi cette hypothèse nous semble irréfutable car elle suppose des signaux et des processus dont il est impossible de réfuter l'existence s'ils ne sont que des fictions. Une autre difficulté est soulevée par l'interprétation de l'imprécision des saccades lors d'un dysfonctionnement cérébelleux. Selon l'hypothèse du rétrocontrôle négatif, cette dysmétrie résulte d'une mauvaise estimation interne de l'amplitude des mouvements oculaires³⁷⁸.

³⁷⁵ Nichols M.J. & Sparks D.L. (1995) Nonstationary properties of the saccadic system: new constraints on models of saccadic control. *Journal of Neurophysiology* 73: 431–435.

³⁷⁶ Keller E.L., Gandhi N.J. & Shieh J.M. (1996) Endpoint accuracy in saccades interrupted by stimulation in the omnipause region in monkey. *Visual Neuroscience* 13: 1059–1067.

³⁷⁷ Schlag J., Pouget A., Sadeghpour S. & Schlag-Rey M. (1998) Interactions between natural and electrically evoked saccades. III. Is the nonstationarity the result of an integrator not instantaneously reset? *Journal of Neurophysiology* 79: 903–910.

³⁷⁸ Keller E.L., Slakey D.P. & Crandall W.F. (1983) Microstimulation of the primate cerebellar vermis during saccadic eye movements. *Brain Research* 288: 131–143. Keller E.L. (1989) The cerebellum. *Reviews in Oculomotor Research* 3: 391–411; Goffart L., Guillaume A. & Pélisson D. (1998) Compensation for gaze perturbation during inactivation of the caudal fastigial nucleus in the head-unrestrained cat. *Journal of Neurophysiology* 80: 1552–1557; Goffart L., Chen L.L. & Sparks D.L. (2004) Deficits in saccades and fixation during muscimol inactivation of the caudal fastigial nucleus in the rhesus monkey. *Journal of Neurophysiology* 92: 3351–3367.

Malheureusement, l'origine des signaux de rétroaction informant des mouvements oculaires demeure inconnue. Les signaux proprioceptifs des muscles extraoculaires semblent pouvoir être exclus car la précision des saccades n'est pas altérée après leur déafférentation³⁷⁹. L'exclusion de la proprioception extraoculaire était également étayée par plusieurs autres observations³⁸⁰. La décharge corollaire (copie d'efférence) fut alors l'explication proposée. Celle-ci consiste en une copie des commandes adressées aux centres moteurs. Autrement dit, le système oculomoteur disposerait d'un système lui permettant d'estimer les déplacements oculaires sur la seule base des commandes motrices qui lui sont adressées. Or le problème est compliqué par le fait que même les signaux en provenance des neurones qui alimentent la tonicité de l'activité des motoneurones, et donc sont responsables de maintenir l'orientation des yeux, peuvent eux aussi être exclus puisque leur lésion n'altère pas la précision de la saccade³⁸¹. Si l'estimation de la direction du regard n'est fournie ni par des signaux proprioceptifs ni par les commandes toniques qui pilotent directement l'activité des motoneurones, la question de sa construction demeure irrésolue. Sur la base d'une modélisation dite neuromimétique, il fut alors suggéré que les signaux imaginés dans les modèles ne soient pas "codés" de manière explicite dans l'activité des neurones. Ils correspondraient à des activités distribuées au sein de populations de neurones massivement interconnectées et réparties sur plusieurs territoires³⁸². En d'autres termes, les signaux véhiculés dans la voie de rétroaction ne pourraient pas être enregistrés par les techniques

³⁷⁹ Guthrie B.L., Porter J.D. & Sparks D.L. (1983) Corollary discharge provides accurate eye position information to the oculomotor system. *Science* 221: 1193-1195; Lewis R.F., Zee D.S., Hayman M.R. & Tamargo R.J. (2001) Oculomotor function in the rhesus monkey after deafferentation of the extraocular muscles. *Experimental Brain Research* 141: 349-358.

³⁸⁰ Noda H., Murakami S. & Warabi T. (1991) Effects of fastigial stimulation upon visually-directed saccades in macaque monkeys. *Neuroscience Research* 10: 188-199; Sparks D.L., Mays L.E. & Porter J.D. (1987) Eye movements induced by pontine stimulation: interaction with visually triggered saccades. *Journal of Neurophysiology* 58: 300-318. Voir les explications dans Goffart L., Burreilly C. & Quinton J.C. (2018) Neurophysiology of visually guided eye movements: critical review and alternative viewpoint. *Journal of Neurophysiology* 120: 3234-3245.

³⁸¹ Cannon S.C. & Robinson D.A. (1987) Loss of the neural integrator of the oculomotor system from brain stem lesions in monkey. *Journal of Neurophysiology* 57: 1383-1409; Kaneko C.R. (1997) Eye movement deficits after ibotenic acid lesions of the nucleus prepositus hypoglossi in monkeys. I. Saccades and fixation. *Journal of Neurophysiology* 78: 1753-1768.

³⁸² Robinson D.A. (1992) Implications of neural networks for how we think about brain function. *Behavioral and Brain Sciences* 15: 644-655.

classiques d'enregistrement unitaire. Celles-ci ne seraient pas adaptées. Les techniques d'enregistrement pluri-cellulaires commencèrent à prospérer sans que leurs utilisateurs ne prennent conscience ni de leur impuissance à tenir compte du caractère à la fois spatialement et temporellement diffus des signaux cérébraux, ni de l'éventualité qu'aucun code ne se cache derrière l'émission des potentiels d'action. Certains théoriciens nous proposent de garder foi en leur façon de poser le problème et d'attendre le développement de techniques capables d'extraire un signal compréhensible du brouhaha cérébral. Excepté Andras Pellionisz, parti explorer d'autres domaines scientifiques, peut-être parce qu'il fut "excommunié" de la communauté des neurosciences de la motricité oculaire, personne n'avait osé remettre en question le paradigme cybernétique qui guidait les expérimentations neurophysiologiques menées chez le singe.

CONCLUSION

“On fouille dans le cerveau pour y trouver la « pensée », le « sentiment », la « volonté », comme si l’on voulait découvrir dans les muscles de la partie inférieure du bras d’un pianiste les dièses, les bémols, les allegro et les fortissimo, chacun dans une cachette particulière.”³⁸³

“Lorsque l’édifice de la science s’élève de plus en plus haut, son socle doit en même temps s’abaisser en profondeur si l’on veut qu’il puisse encore en supporter le poids.”³⁸⁴

Avec l’avènement des neurosciences cognitives, la théorie de la connaissance, le rôle que les mathématiques et le langage y jouent, ne sont plus des domaines d’étude réservés aux philosophes. Une caractéristique de l’approche neuroscientifique qui la différencie de l’approche philosophique est d’appuyer ses conclusions davantage sur des expérimentations dans lesquelles des notions sont quantifiées et leurs valeurs numériques comparées avec l’aide de tests statistiques. Contrairement aux travaux philosophiques, l’impératif d’une analyse conceptuelle rigoureuse et logique est moindre. Au cours des dernières années, l’essor des techniques d’enregistrement des mouvements oculaires s’est accompagné d’une augmentation spectaculaire des études ayant recours à cette méthodologie, au prétexte que celle-ci *“peut être utilisée comme un lien direct entre l’espace physique et l’espace conceptuel”³⁸⁵*. Selon Roger Johansson, Jana Holsanova & Kenneth Holmqvist, *“les mouvements oculaires reflètent dans une large mesure la spatialité lors des rapports verbaux des images et des descriptions de scènes parlées”³⁸⁶*. Publié dans un journal de biologie considéré prestigieux, un article titre aussi que la position de l’œil prédit quel nombre on a à l’esprit³⁸⁷. Comme cette chose appelée “attention”, l’esprit s’est vu attribuer un œil (le

³⁸³ Lange F.A. (1879) *Histoire du matérialisme et critique de son importance à notre époque. Tome second Histoire du matérialisme depuis Kant*. Reinwald et Cie, Paris, pages 391-392.

³⁸⁴ Heisenberg W (2010) *Le manuscrit de 1942*, Editions Allia, page 54.

³⁸⁵ Johansson R., Holsanova J. & Holmqvist K. (2013) Using eye movements and spoken discourse as windows to inner space. In: *The construal of spatial meaning: Windows into conceptual space* (pp. 9-28). Oxford University Press.

³⁸⁶ *Ibid.*

³⁸⁷ Loetscher T., Bockisch C.J., Nicholls M.E.R. & Brugger P. (2010) Eye position predicts what number you have in mind. *Current Biology* 20: R264-R265.

“mind’s eye” des anglophones) dont les mouvements seraient trahis par ceux des globes oculaires³⁸⁸. Or, quand on examine les résultats, il est impossible de savoir si l’observation est un artefact résultant de l’agrégation des sujets ni si elle concerne chacun des sujets. L’étude des mouvements oculaires aurait également apporté la démonstration que compter est un processus spatial³⁸⁹. L’orientation des yeux indiquerait un “*codage spatial des nombres*” chez le sujet en train de comparer des nombres-mots à un nombre-mot de référence³⁹⁰. Ailleurs, d’autres auteurs expliquent le parcours des mouvements oculaires dans une tâche d’exploration par un modèle de l’activité distribuée sur une structure spécifique du tronc cérébral³⁹¹, faisant fi des réseaux neuronaux situés en amont dans les régions visuelles du cortex cérébral, en aval et en parallèle de cette structure. Implicitement, toutes ces études suggèrent que la conjonction des études comportementales et les modélisations sur un ordinateur classique offrent la possibilité de se passer de la neuroanatomie et de la neurophysiologie pour comprendre comment le cerveau fonctionne et ce qui, dans ce fonctionnement, conduit à la contraction d’un ensemble spécifique de fibres musculaires et ainsi à diriger le regard là où quelque chose s’est produit.

Deux postulats caractérisent les études qui enregistrent les mouvements oculaires pour quantifier leurs observations. La direction du regard indiquerait l’objet de la pensée tandis que le temps passé à le regarder témoignerait de la durée de cette pensée³⁹². Ces deux postulats sont pourtant discutables. D’une part, les événements de notre vie quotidienne ainsi que plusieurs études montrent que la pensée et l’attention peuvent être spatialement dissociées l’une de l’autre: à moins de vouloir attirer son attention et démarrer la confrontation, on ne regarde pas trop longtemps la pupille des yeux d’une brute ou d’un prédateur. Pendant de nombreuses années, une multitude de chercheurs ont cru que

³⁸⁸ Loetscher T., Bockisch C.J. & Brugger P. (2008) Looking for the answer: The mind’s eye in number space. *Neuroscience* 151: 725-729.

³⁸⁹ Hartmann M., Mast F.W. & Fischer M.H. (2016) Counting is a spatial process: evidence from eye movements. *Psychological Research* 80: 399-409.

³⁹⁰ Salvaggio S., Masson N. & Andres M. (2018) Eye position reflects the spatial coding of numbers during magnitude comparison. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 45: 1910-1921.

³⁹¹ Adeli H., Vitu F. & Zelinsky G.J. (2017) A model of the superior colliculus predicts fixation locations during scene viewing and visual search. *Journal of Neuroscience* 37: 1453-1467.

³⁹² Hartmann M. & Fischer M.H. (2016) Exploring the numerical mind by eye-tracking: a special issue. *Psychological Research* 80: 325-333.

l'attention pouvait être assimilée à un corps doté d'une orientation et pouvant se déplacer d'un lieu à l'autre. D'autre part, la durée de fixation ne signifie pas nécessairement un accroissement des ressources dites "attentionnelles". Nous avons en effet récemment montré que le temps de réaction mis pour déplacer la direction du regard est d'autant plus long que la cible est proche. L'explication proposée repose sur le temps requis pour briser un équilibre mobilisant un nombre important d'éléments dont les actions respectives se contrebalancent les unes les autres³⁹³. Enfin, prétendre que des opérations arithmétiques se cachent derrière la durée de la fixation visuelle est une interprétation aussi hasardeuse que celle qui consiste à lire entre les lignes d'un texte. Mais l'enregistrement des mouvements oculaires n'est pas la seule méthode à laquelle les chercheurs en psychologie cognitive ont recours pour étudier la cognition numérique. Les mouvements de la main qui manipulent et font glisser une "souris" informatique permettraient de mesurer continûment la dynamique du traitement numérique³⁹⁴. Ainsi, nombreux sont celles et ceux qui croient que les séries temporelles de mesures témoignent du mouvement d'une entité dont les propriétés sont comparables à celles d'un corps rigide. Tout se complique alors quand il est déclaré que "*les mouvements oculaires lient l'espace et le temps*"³⁹⁵. Dans les tableaux de mesures, la colonne correspondant à la succession périodique des instants peut se trouver à côté de la colonne des valeurs numériques qui quantifient l'orientation des yeux. Nous avons vu et nous verrons encore à la fin de ce chapitre que l'imagination de certains chercheurs peut les conduire à considérer la succession périodique des instants comme relevant du fonctionnement intracérébral. Mais avant cela, nous allons exposer les arguments qui nous amènent à réfuter les thèses évolutionnistes de l'espace et des mathématiques pour ensuite nous attaquer à cette thèse qui identifie le fonctionnement cérébral à un programme informatique. Cette

³⁹³ Hafd Z.M. & Goffart L. (2020) Gaze direction as equilibrium: more evidence from spatial and temporal aspects of small-saccade triggering in the rhesus macaque monkey. *Journal of Neurophysiology* 123: 308-322.

³⁹⁴ Schneider E., Maruyama M., Dehaene S. & Sigman M. (2012) Eye gaze reveals a fast, parallel extraction of the syntax of arithmetic formulas. *Cognition* 125: 475-490. Faulkenberry T.J., Witte M. & Hartmann (2018) Tracking the continuous dynamics of numerical processing: A brief review and editorial. *Journal of Numerical Cognition* 4: 271-285. Strohmaier A.R., MacKay K.J., Obersteiner A. & Reiss K.M. (2020). Eye-tracking methodology in mathematics education research: A systematic literature review. *Educational Studies in Mathematics* 104: 147-200.

³⁹⁵ Rinaldi L., Brugger P., Bockisch C.J., Bertolini G. & Girelli L. (2015) Keeping an eye on serial order: Ocular movements bind space and time. *Cognition*, 142, 291-298.

critique de la thèse de Didier Dacunya-Castelle nous emmènera à nous poser cette question majeure de comprendre d'où provient l'efficacité des mathématiques. Avant d'ouvrir des perspectives sur la notion de temps, nous ferons plusieurs remarques au sujet de cette facette dissimulée de l'entreprise scientifique, à savoir le contexte social, économique et politique dans lequel les chercheurs poursuivent leur quête de vérités.

Réfutation des thèses évolutionnistes

En proposant que *“les mathématiques humaines [soient] construites sur la base de concepts fondamentaux (espace, temps et nombre) par co-optation progressive des aires corticales dont l'organisation préalable correspond au besoin culturel”*³⁹⁶, le neuropsychologue Stanislas Dehaene et ses collègues fournissent un substrat cérébral à ces deux intuitions sur la base desquelles, selon le philosophe Emmanuel Kant, *“la mathématique pure fonde toutes ses connaissances et tous ses jugements qui se présentent à la fois apodictiques et nécessaires”*³⁹⁷, à savoir l'espace et le temps. Ainsi, le caractère nécessaire de l'espace reposerait sur sa matérialisation dans le cerveau tandis que son innéité proviendrait de la formation, dès la naissance, de ses territoires dont les activités et la connectivité contribuent à nos habiletés spatiales. L'espace ainsi cérébralisé serait engendré à partir des territoires du cortex pariétal. Chez l'homme, la lésion de cette région provoque un syndrome de négligence spatiale, c'est-à-dire l'impossibilité de percevoir consciemment et correctement certaines sensations pourtant présentes. La procédure qu'emploie Stanislas Dehaene pour identifier fonctionnellement cette région est compatible avec le lien supposé entre l'ampleur de la négligence et les désordres oculomoteurs chez les patients souffrant de négligence. Le neurologue Hans-Otto Karnath a en effet montré que la rémission du syndrome de négligence spatiale s'accompagne d'une récupération des fonctions d'exploration saccadique du champ visuel³⁹⁸. La colocalisation, dans cette région pariétale, d'un signal capté par IRM fonctionnelle à la fois lors de la production de saccades oculaires et lors de calculs arithmétiques est également compatible avec la thèse de Hermann von Helmholtz selon laquelle l'intuition

³⁹⁶ Knops A., Thirion B., Hubbard E.M., Michel V. & Dehaene S. (2009). Recruitment of an area involved in eye movements during mental arithmetic. *Science* 324: 1583-1585.

³⁹⁷ Kant E. (1783/1967) *Op. cit.* pages 44-45.

³⁹⁸ Fruhmann Berger M., Johannsen L. & Karnath H.-O. (2008) Time course of eye and head deviation in spatial neglect. *Neuropsychology* 22: 697-702.

spatiale serait construite par les mouvements oculaires. Cependant, quand il déclare que “*les humains et de nombreuses autres espèces animales ont intériorisé [au cours de l’évolution] des codes de base et des opérations isomorphes aux lois physiques et arithmétiques qui régissent les interactions des objets dans le monde physique*”, Stanislas Dehaene défend la thèse de l’épistémologie évolutionniste initiée par Herbert Spencer et relayée par Konrad Lorenz. Outre les précautions que nous nous devons de prendre pour interpréter correctement ces signaux dont les études d’imagerie nous parlent, nous allons voir maintenant que l’idée d’une conservation fonctionnelle à travers les espèces animales d’un même phylum est en réalité contredite par les études menées chez le singe.

Tout d’abord, si nous supposons comme le propose Hermann von Helmholtz, que l’intuition spatiale est construite par les mouvements oculaires, alors cet “espace” est extrêmement fugace. Pour des conditions initiales identiques, différents lieux du monde “extérieur” se distinguent les uns des autres par des ensembles distincts de commandes musculaires et de sensations associées, comme celles engendrées par l’orientation du regard vers divers objets, accompagnées parfois d’un mouvement de pointage de l’index vers les endroits où ils se trouvent. A moins de disposer d’une mémoire remarquable, la localisation exacte ne saurait être limitée à la seule imagination de ces mouvements. Elle repose en fait sur un geste qui requiert souvent la présence d’un objet. La saccade oculaire qui dirige le regard vers le lieu où se trouve l’objet est le premier geste produit, sans doute aussi l’un des plus précis. Or, dans le chapitre consacré à la thèse helmholtzienne, nous avons rapporté des observations expérimentales cruciales faites chez le singe dans le laboratoire du neurophysiologiste David Sparks. La précision des saccades n’est préservée que lorsqu’elles sont produites tout de suite après l’apparition de l’objet ou en sa présence. Elle est considérablement dégradée lorsque les saccades sont produites après un délai de quelques secondes³⁹⁹. Autrement dit, si l’espace helmholtzien est cet ensemble d’activations neuronales qui se produisent entre le moment où un événement vient stimuler la rétine et le moment où le regard est dirigé vers son lieu d’occurrence, alors cet espace n’est pas du tout

³⁹⁹ White J.M., Sparks D.L. & Stanford T.R. (1994). Saccades to remembered target locations: an analysis of systematic and variable errors. *Vision research* 34: 79-92; Barton E.J. & Sparks D.L. (2001) Saccades to remembered targets exhibit enhanced orbital position effects in monkeys. *Vision research* 41: 2393-2406.

quelque chose de permanent. Il se dégrade dès lors que nos gestes sont retardés et guidés par la mémoire immédiate.

D'autres expériences, lésionnelles cette fois, ont été menées sur des singes macaques entraînés à réaliser des tâches soit d'orientation saccadique vers des cibles visuelles, soit de discrimination quantitative. Dans ces études, l'aire intrapariétale latérale a été inactivée de manière temporaire et réversible afin de vérifier si l'activité de ses neurones participe à l'orientation du regard et à la cognition numérique. Les résultats de ces études montrent que l'inactivation ne provoque aucun déficit⁴⁰⁰. Chez le singe, il n'existerait donc aucune relation causale, d'une part entre l'activité des neurones de cette région du cortex pariétal et l'orientation visuelle, ou d'autre part entre cette même activité et le dénombrement. Les études réalisées dans deux laboratoires différents, celui du neurophysiologiste Jean-René Duhamel⁴⁰¹ et celui d'un autre neurophysiologiste, Richard Andersen,⁴⁰² ne montrent en effet aucun changement dans la précision des saccades pendant l'inactivation pharmacologique. Richard Anderson et ses collaborateurs constatent une légère augmentation de latence des saccades que ne retrouve pas l'équipe française. Dans ces conditions, il est difficile de croire que cette région joue chez le macaque le même rôle oculomoteur que lui attribue l'équipe de Stanislas Dehaene chez l'homme. En ce qui concerne le support "spatial" supposé des fonctions arithmétiques, là aussi les observations chez le singe réfutent la thèse évolutionniste. L'équipe d'Elizabeth Brannon et de Michael Platt ne montre aucun problème de discrimination quantitative chez le singe dont l'aire intrapariétale latérale a été pareillement inactivée⁴⁰³. Cette absence de symptôme contredit l'affirmation selon laquelle "des dommages aux zones du cerveau hébergeant l'information numérique provoquent des déficits de comptage et de calcul"⁴⁰⁴. Outre la nécessité d'être très prudent quand des

⁴⁰⁰ DeWind N.K., Peng J., Luo A., Brannon E.M., Platt M.L. (2017). Pharmacological inactivation does not support a unique causal role for intraparietal sulcus in the discrimination of visual number. *PLOS one*, 12(12), e0188820.

⁴⁰¹ Wardak C., Olivier E. & Duhamel J.-R. (2002) Saccadic target selection deficits after lateral intraparietal area inactivation in monkeys. *Journal of Neuroscience* 22: 9877-9884.

⁴⁰² Li C.S.R., Mazzone P. & Andersen R.A. (1999) Effect of reversible inactivation of macaque lateral intraparietal area on visual and memory saccades. *Journal of Neurophysiology* 81: 1827-1838

⁴⁰³ DeWind N.K., Peng J., Luo A., Brannon E.M., Platt M.L. (2017) *Op. cit.*

⁴⁰⁴ Nieder A. (2017) Number faculty is rooted in our biological heritage. *Trends in cognitive sciences* 21: 403-404

extrapolations chez l'homme sont faites à partir d'observations faites chez le singe⁴⁰⁵, ces résultats négatifs posent plusieurs interrogations. Est-ce que l'absence de désordre résulte du fait que la tâche à laquelle les singes ont été soumis ne mobilise aucunement les réseaux de neurones supposés impliqués dans l'orientation ou le dénombrement? Est-ce qu'elle résulte du fait que les singes ne sont pas dotés de cognition numérique ou que les neurones de leur cortex pariétal ne font pas partie des réseaux impliqués dans ces deux types de tâches? Ou alors, plus fondamentalement, le problème résulte-t-il de cette volonté de localiser un module qui n'existe pas, à fixer spatialement quelque chose qui se déroule temporellement? Curieusement, les résultats négatifs de ces expériences cruciales ne sont pas relatés. L'existence d'une implication de cette région corticale dans la cognition numérique chez le singe continue d'être défendue. Pourtant, l'examen des activités des neurones concernés montrent une interprétation biaisée des mesures⁴⁰⁶. Lorsqu'on examine attentivement les enregistrements de l'activité des neurones situés dans cette région, on découvre en effet plusieurs problèmes majeurs⁴⁰⁷. Tout d'abord, on ne comprend pas comment les neurones post-synaptiques, c'est-à-dire ceux qui sont excités par les neurones enregistrés, parviennent à extraire un signal offrant la possibilité au singe de distinguer le nombre de stimuli présentés dans son champ visuel. On nous montre les activités moyennes de quatre neurones sélectionnés. L'un d'eux répond de manière indifférenciée à la présentation dans le champ visuel de 4, 8 ou 16 stimuli, dans deux groupes différents d'essais caractérisés chacun par une petite ou une grande récompense⁴⁰⁸. La même remarque peut être faite pour les réponses des trois autres neurones illustrés. Les auteurs de cette étude distinguent deux catégories de neurones: les neurones "accumulateurs" dont l'activité augmente avec le nombre de stimuli et les neurones "décumulateurs" dont l'activité diminue. Là encore un examen attentif de la figure décrivant l'activité d'ensemble des neurones nous enseigne que les neurones post-synaptiques ne peuvent extraire des signaux distincts selon le nombre de stimuli visuels que s'ils "comptent" exactement le nombre de potentiels d'action pendant un intervalle minimum de 400 millisecondes. Ce délai relativement long indique que cette distinction faite par les

⁴⁰⁵ Husain M. & Nachev P. (2007) Space and the parietal cortex. *Trends in cognitive sciences* 11: 30-36.

⁴⁰⁶ Roitman JD, Brannon E.M. & Platt ML (2007) Monotonic coding of numerosity in macaque lateral intraparietal area. *PLoS biology* 5: e208.

⁴⁰⁷ *Ibid.*

⁴⁰⁸ *Ibid.* voir la partie A de la figure 4.

neurones de l'aire latérale intrapariétale du cortex cérébral est le résultat d'une chaîne d'activation polysynaptique, c'est-à-dire qu'elle met en jeu de nombreux autres neurones, vraisemblablement aussi situés en dehors de cette région. Enfin, cette capacité des neurones post-synaptiques à distinguer différentes quantités n'est possible qu'à condition que les potentiels d'action émis par les autres neurones afférents ne brouillent pas l'"accumulation" ou la "déaccumulation" transmise par l'activité des neurones enregistrés. Quand on voit les faibles différences de réponse des neurones entre les différents nombres de stimuli visuels présentés, on se rend compte de l'in vraisemblance de l'explication proposée: une différence de 10 potentiels d'action par seconde correspond à moins de 4 potentiels d'action pendant 400 ms. Comment les neurones post-synaptiques, bombardés par un nombre considérable de potentiels d'action émis par une multitude de neurones afférents parviennent-ils à distinguer les 4 potentiels d'action émis par ces neurones "accumulateurs" ou "déaccumulateurs"? En résumé, les études chez le singe ne suffisent pas pour confirmer le support cortico-pariétal des capacités de dénombrement. La possibilité que cette thèse soit fautive ne semble pas imaginable pour cette communauté de chercheurs. Malheureusement, elle n'explique pas aux non-initiés pour quelles raisons aucune conclusion ne peut être tirée des résultats de ces expériences d'inactivation, pourquoi ils ne réfutent pas l'hypothèse d'une implication de cette région corticale dans la cognition numérique. A ce jour et à notre connaissance, une seule étude mentionne ces travaux⁴⁰⁹. Les auteurs prennent note du résultat négatif mais continuent tout de même de défendre une implication dans les tâches de manipulation et de représentation numérique.

Si les expériences lésionnelles menées chez le singe réfutent la thèse évolutionniste, alors ils infirment par conséquent la thèse nativiste. Ou alors cette dernière doit fournir une explication autre que la sélection naturelle pour rendre compte des prédispositions innées constatées chez certains individus, à apprendre plus facilement que d'autres, les langages mathématiques et à résoudre une multitude de problèmes abstraits. Chez d'autres individus, on trouve des facilités à manipuler divers instruments de musique, à parler plusieurs langues, à jongler avec un ballon ou à surfer sur la neige, là encore plus facilement, sans être contraint

⁴⁰⁹ Munoz F., Jensen G., Kennedy B.C., Alkan Y., Terrace H.S., & Ferrera V.P. (2020). Learned representation of implied serial order in posterior parietal cortex. *Scientific Reports*, 10(1), 1-14.

d’imaginer qu’elles puissent être innées⁴¹⁰. Quel que soit le cas étudié, les partisans de la thèse nativiste doivent mieux expliquer l’intérêt de cette thèse car entre les séquences codantes du génome et l’expression d’un talent socialement valorisé, une multitude de stades interviennent qui méritent d’être identifiés et caractérisés comme s’est efforcé de le faire le fondateur de la psychologie génétique, Jean Piaget.

Critique de la thèse de Didier Dacunha-Castelle

Comme Stanislas Dehaene, Didier Dacunha-Castelle défend une thèse évolutionniste mais il lui adjoint plusieurs autres thèses, elles-aussi contestables. Tout d’abord, en plus de considérer chaque espèce animale comme dotée d’une bibliothèque de programmes lui permettant de s’adapter à son environnement et de survivre, il propose qu’*“à côté des programmes du cerveau associés à l’adaptation à l’environnement physico-chimique, il existe d’autres programmes, issus aussi de l’évolution, concernant l’apprentissage et les domaines de la cognition et de l’action. Il s’agit de moyens pour s’adapter à un environnement aléatoire, marqué par la survenance plus ou moins rapide d’événements qui peuvent avoir des conséquences sur la vie de chaque animal, pris en particulier. La statistique est la traduction mathématique de ces programmes”*⁴¹¹. Cette conception évolutionniste de la statistique contraste avec la thèse selon laquelle la statistique est une arithmétique politique, inventée pour administrer les biens d’un état-nation⁴¹². Didier Dacunha-Castelle pense que les mathématiciens accèdent à de nouvelles vérités mathématiques grâce à une capacité innée à introspecter le fonctionnement de leur cerveau. On peut imaginer en effet que l’exercice répété conduise un comptable à faire usage de sa perspicacité pour trouver une meilleure méthode de recensement, ouvrant un chemin vers les statistiques⁴¹³. Mais s’agit-il ici de l’introspection d’une trace laissée par l’évolution ou plutôt une synthèse abstraite de la

⁴¹⁰ Núñez R. (2016) How much mathematics is “hardwired,” if any at all: Biological evolution, development, and the essential role of culture. In *Minnesota Symposia on Child Psychology: Culture and Developmental Systems*, Volume 38 (pp. 83-124). Hoboken USA: John Wiley & Sons, Inc.

⁴¹¹ Dacunha-Castelle D. (2020) *Op. cit.* page 245.

⁴¹² Supiot A. (2015) *La gouvernance par les nombres*. Fayard. Rey O (2016) *Quand le monde s’est fait nombre*. Stock.

⁴¹³ Cette éventualité est d’ailleurs proposée par Lockart (2014) *Measurement*. Harvard University Press. Voir aussi Dowek G. (2011) *Les métamorphoses du calcul*. Paris : Le Pommier.

pratique mathématique? De plus, l'applicabilité de cette thèse chez le singe est compromise. Les études comportementales que nous avons menées sur un nombre relativement important de singes macaques ne montrent dans leurs réponses oculaires aucune disposition à estimer la probabilité de survenue d'un simple événement visuel. Leurs mouvements oculaires ne montrent aucune différence entre d'une part, les enregistrements faits lors de sessions au cours desquelles une cible bouge toujours dans une et une seule direction, et d'autre part, les sessions d'enregistrement où la cible peut bouger dans quatre directions possibles⁴¹⁴.

Du monde "extérieur", Didier Dacunha-Castelle dit qu'il "*ne peut être perçu et compris qu'à partir des outils, en l'occurrence des programmes, apparus au cours de l'évolution ... Les lois de la physique s'expriment sous forme mathématique parce que ces programmes se traduisent en mathématiques, il n'y a pas de traduction "physique". C'est [même, selon l'auteur] une explication limpide de l'efficacité déraisonnable des mathématiques en physique. Il n'y a pas d'autre explication cohérente*"⁴¹⁵. Cette explication est peut-être cohérente mais elle est incomplète car elle cache le rôle crucial du langage et son caractère fondamentalement évolutif, avec la signification changeante des mots et la création aussi de nouveaux termes. Depuis des millénaires, le langage constitue pour l'esprit humain un outil formidable. Il guide sa progression dans la pénombre du monde qu'il explore avec autant de styles qu'il y a de langues et de cultures distinctes. Les mots et les phrases sont véhiculés dans cet esprit, en dehors de l'organe cérébral, dans un sens qui est largement influencé par le contexte et qui ne répond pas toujours aux lois de la logique. Animé par des notions d'ordre moral et esthétique, l'esprit de chaque personne utilise ce contexte comme différents navigateurs négocient avec le même vent selon l'endroit où ils se trouvent. Une large ouverture à toutes sortes de signaux, plus ou moins explicites, et un appétit pour la nouveauté caractérisent aussi l'esprit humain. Cette ouverture contraste avec l'autarcie des instructions qui s'enchaînent automatiquement dans un programme. A l'exclusion des périodes où il fût bâillonné ou anéanti, l'esprit humain, toujours en quête de liberté, n'a cessé de traverser, au

⁴¹⁴ Orlando-Dessaints N., Montagnini A. & Goffart L. (2019) Tracking a moving visual target in the monkey: influence of the path frequency. 48th Annual Meeting of the Society for Neuroscience Chicago, USA.

⁴¹⁵ Dacunha-Castelle D. (2020) *Op. cit.* pages 243-244.

cours des siècles, un milieu dont les lois pouvaient être assouplies, contrairement au déterminisme des lois de la physique.

Si Didier Dacunha-Castelle insiste sur la notion de programme, c'est parce que "*les démonstrations écrites en langage mathématique formalisé peuvent être traduites ligne après ligne ... pour devenir de véritables programmes informatiques*"⁴¹⁶. Les axiomes mathématiques sont la traduction de programmes universels du cerveau apparus au cours de l'évolution et les théorèmes sont la conséquence du fonctionnement cérébral. Or, si leur démonstration peut être traduite par un programme écrit en lambda calcul, alors on est conduit à faire un parallèle entre l'activité du mathématicien en train de faire cette démonstration et le déroulement d'un programme informatique. Il arrive bien sûr que le mathématicien fasse des erreurs: elles peuvent être causées par une attention réduite ou une moindre rigueur. Ces petites déviations n'impliquent pas que le rapport entre la démonstration et le programme informatique soit comparable au rapport entre l'équation cartésienne de la sphère et sa réalisation physique, au rapport entre le plus court chemin reliant deux points d'un espace mathématique et la trajectoire d'un objet entre deux emplacements du monde "extérieur", ou encore au rapport entre l'idée et sa réalisation. Dans le programme informatique, on ne retrouve pas le pouvoir astucieux et créatif de l'imagination du mathématicien. Enfin, pour la philosophe-logicienne Gabriella Crocco, c'est une fausse idée que pour tout problème mathématique, il existerait un programme informatique capable de le résoudre. Un programme ne peut exister qu'à condition que l'on puisse trouver le bon langage formel dans lequel la preuve puisse être écrite, avant même d'être transformée en programme. Or la recherche d'un tel langage implique des procédures non récursives qui dépassent largement les pouvoirs de toute machine de Turing.

Qu'elles soient produites par un cerveau ou par un programme implanté dans une machine, les actions sont adaptées à un ensemble de conditions environnementales locales. Elles sont limitées par la sensorialité immédiate fournie par les données actuelles du problème à résoudre et par les capacités de compréhension et de mémorisation du but à atteindre et du chemin pour y arriver. La correspondance entre une performance produite par le fonctionnement cérébral et une prouesse technologique n'est justifiée que sur la base du

⁴¹⁶ Dacunha-Castelle D. (2020) *Op. cit.* page 56. Le lambda-calcul est le langage dans lequel les démonstrations sont écrites.

résultat ultime, tel qu'il est mesuré, c'est-à-dire spatio-temporellement localisé et spécifique au problème. La précision peut alors être comparée entre d'une part, le geste d'un animal qui capture du regard, ou avec un membre supérieur, une proie et d'autre part, la configuration terminale du mouvement produit par un automate. Or la physiologie nous apprend que le milieu intérieur n'est pas comparable à un ensemble de rouages pareils à ceux qui vont avancer les aiguilles d'une horloge. Le caractère massivement distribué de la connectivité intra-cérébrale fait qu'une multitude des canaux vont être mobilisés sans qu'ils soient tous strictement nécessaires à la résolution du problème. Même si une lésion endommage une multitude de faisceaux, le problème peut tout de même être résolu, avec un délai parfois un peu plus long. Par contre, la suppression d'une ligne d'instruction sera fatale pour le bon déroulement d'un programme d'ordinateur. A cette multiplicité des faisceaux impliqués dans la réalisation d'une tâche spécifique s'ajoute la multiplicité des tâches auxquelles un faisceau spécifique contribue. Par exemple, pour orienter le regard vers une cible visuelle, même si le mouvement des yeux est largement suffisant, les réseaux neuronaux qui conduisent à changer l'orientation de la tête vont eux-aussi être mobilisés, mais de manière infra-liminaire puisque la tête ne bouge pas. Cette mobilisation parallèle est vraisemblablement responsable des récupérations fonctionnelles observées lors de désordres du réseau oculomoteur⁴¹⁷. Enfin, la comparaison de performance entre un animal et un automate est rendue plus compliquée encore par le fait qu'un même résultat, la capture pour reprendre notre exemple, peut être obtenu par le geste produit par des animaux dont le système nerveux est très différent, comme celui de la mante religieuse, celui du rapace et celui du primate. Cette multiplicité des méthodes de résolution d'un même problème remet donc en question la correspondance entre le fonctionnement du cerveau et celui d'un programme. La complexité du vivant fait qu'il est plus que douteux que le fonctionnement d'un automate puisse éclairer l'exploration physiologique de la vie animale. Il est préférable de mettre en parallèle toutes les performances et de considérer la solution automatique comme une méthode supplémentaire, totalement artificielle, permettant elle-aussi de résoudre le même problème, de la même

⁴¹⁷ Gaymard B., Siegler I., Rivaud-Péchoux S., Israel I., Pierrot-Deseilligny C. & Berthoz A. (2000) A common mechanism for the control of eye and head movements in humans. *Annals of Neurology* 47: 819-822.

manière que des roues et un moteur à explosion permettent eux-aussi de déplacer une ou plusieurs personnes.

A propos de l'efficacité des mathématiques

La thèse de Didier Dacunha-Castelle au sujet de l'efficacité des mathématiques contraste avec celle d'Emmanuel Kant pour qui les mathématiques sont efficaces parce qu'elles relèvent de ces formes nécessaires, et donc incontournables, de l'intuition que sont l'espace et le temps. Pour le philosophe, *“la sensibilité sur la forme de laquelle se fonde la géométrie est ce dont dépend la possibilité des phénomènes extérieurs; ceux-ci ne peuvent donc jamais renfermer autre chose que ce que la géométrie leur prescrit”*⁴¹⁸. Dans les *Prolégomènes à toute métaphysique future*, il nous explique que c'est l'espace que le géomètre a dans la pensée qui rend possible l'extension de la matière, que l'espace physique *“n'est pas une propriété des choses en elles-mêmes, mais seulement une forme de notre faculté de représentation sensible”*⁴¹⁹. Les phénomènes s'accordent donc nécessairement avec les propositions géométriques. Ainsi, Kant dit de sa théorie de l'espace et du temps qu'elle est *“l'unique moyen de garantir à des objets réels l'application d'une des plus importantes connaissances, à savoir celle que la mathématique expose a priori et d'empêcher qu'on ne la prenne pour une simple apparence”*⁴²⁰. Autrement dit, les mathématiques sont efficaces parce qu'elles sont fondées sur notre mode d'appréhension des phénomènes, les intuitions pures d'espace et de temps. Didier Dacunha-Castelle, de son côté, conçoit l'efficacité des mathématiques à partir de la conjonction de deux constatations. Pareillement au programme informatique bien agencé, il y a ce *“miracle qu'est la possibilité pour le cerveau humain d'enchaîner des milliers de raisonnements sans s'emmêler dans les contradictions”*⁴²¹. Le mathématicien fait malheureusement ici encore une confusion entre d'un côté un organe, le cerveau, et de l'autre, les savoirs accumulés au fil des siècles par un mode tout à fait particulier de son fonctionnement, lorsque notamment des personnes humaines s'assemblent et communiquent collectivement. Ce n'est pas le cerveau mais les théories produites au cours

⁴¹⁸ Kant E. (1783/1967) *Op.cit.* page 50.

⁴¹⁹ *Ibid.*, page 51.

⁴²⁰ *Ibid.*, page 57.

⁴²¹ Wigner E.P. & Balibar F. (2012) L'irraisonnable efficacité des mathématiques dans les sciences de la nature. *Rue Descartes* 74: 99-116.

de l'histoire, avec les stratagèmes sociaux et techniques associés, qui ont produit un corpus cohérent de propositions correspondant à quelque chose d'extérieur au cerveau et le rendant capable de maîtriser le déroulement de certains phénomènes de la réalité physique ou biochimique. Il est difficile de croire que la mémoire des théorèmes aurait survécu sans leur démonstration, sans l'assentiment collectif de leur validité et sans leur préservation matérielle sous la forme de textes ou de diagrammes. Ensuite, à l'application des lois de la logique au discours démonstratif, Didier Dacunha-Castelle ajoute *"ces deux autres miracles que sont l'existence de lois de la nature jointe au fait que le cerveau humain [soit] capable de les deviner"*⁴²². Selon lui, cette capacité résulterait de l'introspection, un peu comme chez Jean-Pierre Changeux pour qui *"les objets mathématiques [sont] des objets matériels, des "objets mentaux" aux propriétés analysables par un processus réflexif"*⁴²³. Si l'introspection est un processus au cours duquel le sujet se détache des sollicitations du monde "extérieur" pour se concentrer sur son esprit, alors il faut bien admettre que cette clôture contraste avec l'ouverture fondamentale de tous les organismes vivants à leur milieu, avec les transformations qu'ils y opèrent, parfois sans aucun plan détaillé, juste pour voir et tâtonner, et avec les enseignements qu'ils en tirent.

A cette même question qu'il posait au sujet de savoir *"comment se fait-il que la mathématique, étant un produit de la pensée humaine qui est indépendant de l'expérience, s'ajuste si admirablement aux objets de la réalité? La raison humaine est-elle donc capable, sans expérience, et par la seule pensée, de sonder les propriétés des choses réelles"*⁴²⁴, Albert Einstein donnait la réponse suivante *"pour autant que les propositions de la mathématique se rapportent à la réalité, elles ne sont pas certaines, et pour autant qu'elles sont certaines, elles ne se rapportent pas à la réalité"*⁴²⁵. Rappelant le conventionnalisme d'Henri Poincaré, il explique que l'efficacité de la mathématique ne résulte pas seulement des axiomes, *"créations libres de l'esprit humain"* et des propositions vraies qui peuvent en être logiquement déduites. Elles doivent être complétées par des propositions physiques. *"La mathématique comme telle est incapable d'énoncer quoi que ce soit, ni sur les objets de la représentation intuitive, ni sur*

⁴²² *Ibid.*

⁴²³ Changeux J.-P. (1989) *Matière à pensée*. Paris: Odile Jacob, page 30.

⁴²⁴ Einstein A. (1921) *La géométrie et l'expérience*. Paris: Gauthiers-Villars, page 3-4.

⁴²⁵ *Ibid.* page 4.

*la réalité*⁴²⁶. Ce n'est pas la mathématique qui est soumise au contrôle de l'expérience. C'est son mariage, plus ou moins fécond, avec des lois physiques qui sont, quant à elles, révisables. La théorie mathématico-physique qui en résulte est un système de concepts servant "*à établir une connexion logique entre une multiplicité de phénomènes sensibles réels ou imaginés*"⁴²⁷. A ce jour et à notre connaissance, il n'existe pas de pareil couple dans le domaine des sciences cognitives contemporaines.

Considérations sociales et politiques

La croyance que les sciences du cerveau puissent rendre compte des performances mathématiques humaines est entretenue par une communauté très large guidée par des personnalités dont la parole est entendue non seulement par les décideurs politiques mais aussi par leurs conseillers les plus érudits. Cette proximité fait que leurs propos ont plus de chances d'engendrer l'enthousiasme d'un nouvel éclairage et d'exercer une influence sur les orientations scientifiques nationales. Le ministère de l'Éducation nationale a d'ailleurs validé l'existence d'une intuition innée du nombre et invité les enseignants des écoles à la stimuler et à la solliciter dès les classes d'école maternelle⁴²⁸. En face de cette puissante communauté, quelques chercheurs émettent des doutes qui malheureusement demeurent inaudibles. Cet état de fait n'est pas surprenant quand on s'intéresse à la sociologie de la science⁴²⁹. Une autre forme de conventionnalisme caractérise en effet chaque communauté scientifique. Les chercheurs s'accordent sur un ensemble de concepts et de techniques jusqu'à ce que leur fécondité soit remise en question⁴³⁰. Comme l'explique le philosophe Warren Schmaus, les conventions "*fournissent un guide et une base qui rend possible une recherche empirique partagée*"⁴³¹. Elles délimitent une zone à l'intérieur de laquelle les scientifiques s'accordent de mener leurs explorations. La face moins réjouissante de ce consensus est qu'il définit le

⁴²⁶ *Ibid.* page 5.

⁴²⁷ *Ibid.* page 13.

⁴²⁸ Miravete S., Tricot A. & Amadiou F. (2020) Un sens inné du nombre? Une revue des différentes tâches. *Bulletin de Psychologie* 73: 297-310.

⁴²⁹ Kuhn T.S. (1972) *La structure des révolutions scientifiques*. Paris: Flammarion; Gingras Y. (2013) *Sociologie des sciences*. Que sais-je. Paris: Presses Universitaires de France, Paris.

⁴³⁰ Schmauss W. (2017) Henri Poincaré and Charles Renouvier on conventions; or, How science is like politics. *HOPOS: The Journal of the International Society for the History of Philosophy of Science* 7: 182-198, page 184.

⁴³¹ *Ibid.* page 196.

périmètre au-delà duquel il est préférable de ne pas s'aventurer, au risque de se retrouver marginalisé, ostracisé et banni de la communauté. Implicitement, une sorte de contrat social s'instaure entre les individus rassemblés au sein de diverses communautés scientifiques, plus ou moins indépendantes les unes des autres. Dans le domaine des sciences du cerveau, ce communautarisme ne se limite pas au partage de concepts; il s'étend aux techniques employées pour comprendre le fonctionnement du cerveau. Persuadés qu'un code se cache dans les séquences de potentiels d'action émises par les neurones, les électrophysiologistes constituent une communauté puissante dont le rôle social est entretenu par une micro-économie périphérique et l'appétit qu'elle suscite auprès d'entreprises privées vendant des produits de haute technologie très coûteux. A côté de cette communauté amatrice d'innovations technologiques, rares sont celles et ceux qui refusent d'enregistrer les séquences de potentiels d'action pour déchiffrer le supposé "code neuronal". Nous avons expliqué dans le précédent chapitre comment les connaissances anatomo-physiologiques montrent à quel point nous sommes loin de pouvoir déchiffrer quoi que ce soit. La pratique d'une électrophysiologie unitaire, "à la manière de papa", demeure cependant utile pour identifier et localiser les territoires neuronaux et poursuivre les études de neurologie et de neuropsychologie expérimentale. Malgré l'importance de leurs avertissements, les critiques du code neuronal sont discrètement écartés des grandes cérémonies pour éviter de troubler l'enchantement de ceux qui croient qu'ils vont déchiffrer un des volumes du Grand livre de la nature. Il est difficile et très délicat d'expliquer à une communauté scientifique que ses travaux remplissent un puits sans fond.

Nous rencontrons ici un problème qui dépasse le champ neuroscientifique et les neurophysiologistes se doivent d'apporter un éclairage à celles et ceux qui gouvernent les programmes scientifiques de leur nation. Les problèmes sont fondamentaux parce qu'ils nous conduisent à soulever des interrogations qui portent autant sur les rapports sémantiques entre les mots du langage et les idées de la pensée, que sur les rapports sémiotiques entre les formulations langagières et les faits qu'elles désignent. L'adaptation remarquable de l'homme à son environnement ne repose pas seulement sur des algorithmes génétiques et des processus physiologiques versatiles. L'organisme, son cerveau, la culture et la technologie sont en coévolution. Comme le disait l'anthropologue Edward Sapir, *"il est tout à fait illusoire de croire qu'on s'ajuste à la réalité essentiellement sans l'intermédiaire de la langue et que celle-ci n'est qu'un moyen accessoire pour résoudre des problèmes spécifiques de*

*communication ou de réflexion*⁴³². Face à cette vogue contemporaine qui naturalise les savoirs et certaines pratiques mathématiques, une autre thèse peine à se faire défendre car elle ne relève ni des sciences de la vie ni de l'informatique : la thèse de l'acculturation. La complexité qui la caractérise la rend effectivement moins simple et moins commode. Par exemple, Rafael Núñez défend la conception selon laquelle *"les nombres et l'arithmétique sont ... - en dehors de la sélection naturelle - le produit de l'interaction biologiquement contrainte que les individus entretiennent avec les variations phénotypiques culturelles et historiques appropriées que sont le langage, les systèmes d'écriture et l'éducation"*⁴³³. L'approche anthropologique ne fait pas appel à des technologies sophistiquées; elle repose plutôt sur une observation aiguisée et une argumentation logique. Une compétition inégale oppose donc les anthropologues à une vaste communauté d'expérimentateurs cognitivistes, armée d'instrumentations coûteuses et sophistiquées. Leurs travaux ne sont quasiment pas entendus car leurs publications sont considérablement moins nombreuses et moins populaires que celles des défenseurs des thèses évolutionnistes et cérébralistes. Ces derniers continuent de plonger, dans quelque chose qui n'est en fait qu'un simulacre de fonctionnement cérébral, des notions appartenant à un ensemble consensuel de conventions de communication, un jargon en quelque sorte. De plus, les explications phrénologiques qui jadis caractérisaient certains discours neurologiques paraissent fantaisistes de nos jours. Elles sont aujourd'hui remplacées par un discours "cérébrographique" où les formes courbes de l'os crânien sont remplacées par les circonvolutions de l'écorce cérébrale située juste en dessous du crâne, coloriées puis catégorisées en modules. La pensée physiologique a disparu de ces études; la propagation distribuée des activités cérébrales et leur diffusion sont ignorées ou alors considérées comme secondaires. Cette négligence résulte en fait des limitations temporelles des techniques d'imagerie cérébrale. Des fonctions mentales sont attribuées à des zones restreintes d'un cerveau dont on a retiré toute la dynamique. C'est un peu comme si l'étude de la fréquentation des carrefours routiers pouvait suffire à expliquer les activités économiques ou industrielles d'une région. Cette pratique resterait insignifiante si elle ne commençait pas à se lancer dans des extrapolations cherchant à identifier des marqueurs anatomiques préfigurant certains "profils" psychopathologiques.

⁴³² Sapir E. (1929) The status of linguistics as a science. *Language* 5: 207-214, page 209.

⁴³³ Núñez R. (2009) Numbers and arithmetic: Neither hardwired nor out there. *Biological theory* 4: 68-83.

La décision de lancer des programmes de recherche scientifique dans certains domaines spécifiques plutôt que dans d'autres n'est pas sans risque. Ceux-ci peuvent en effet se révéler stériles si l'on découvre que les démonstrations sur la base desquelles les interlocuteurs fondent leur théorie ne sont pas convaincantes, voire ne sont d'aucune solidité. La conséquence déplorable est que l'attention de la jeunesse étudiante qui était censée apporter des renforts et prendre le relais de leurs prédécesseurs soit détournée des travaux les mieux construits, souvent les plus cruciaux ou fondamentaux, sans doute les moins attrayants. De manière collatérale, ce détournement accélère la disparition, faute de "combattants", des secteurs pourtant parmi les plus avancés, mais aussi souvent les plus ingrats de la recherche neuroscientifique. Aujourd'hui, nous assistons à l'explosion de nouvelles techniques d'enregistrement par imagerie photonique, elles aussi très onéreuses. Malgré leur très faible résolution temporelle, elles suscitent un engouement car elles offrent la possibilité d'enregistrer l'activité de plusieurs milliers de neurones chez l'animal transparent comme la larve de poisson-zèbre. Le caractère quasi-ludique de ces recherches contraste avec celui autrement plus pénible et socialement ingrat des recherches invasives menées chez le singe macaque. Jadis considérées parmi les plus prestigieuses, celles-ci sont en train de disparaître, incapables de rivaliser contre le ludisme scientifique et le désintéressement vis-à-vis des connaissances élaborées qu'elles ont apportées.

Vraisemblablement liée au désir de partager un savoir que l'on ressent quand il est parvenu à maturation, l'intention des vulgarisateurs contribue à populariser ce domaine de recherche et, secondairement, à augmenter les crédits que les décideurs politiques vont accorder à une communauté plus ou moins large, plus ou moins homogène et soudée. La vulgarisation est sans doute une manière efficace de procéder pour sensibiliser les décideurs. Comment pourraient-ils autrement savoir quelles sont les promesses qui seront tenues et contribueront à améliorer le bien-être de leurs concitoyens? Aussi est-il impératif de veiller à préserver les débats contradictoires, à les encourager même, pour éviter que les rassemblements scientifiques ne se transforment en des sortes de grandes messes où les participants assistent, souvent passivement, à la présentation d'un château de cartes, sans rien connaître du socle conceptuel sur lequel il repose, ni remettre en question l'interprétation des mesures. Si la recherche scientifique est une entreprise collective socialement épanouissante, il ne s'agit pas non plus qu'elle héberge une illusion collective entretenue par une idéologie partagée par une petite communauté d'individus qui

commencent à se resserrer les uns contre les autres, dès lors que les promesses grandioses n'ont pas été tenues, ou alors quand surgit le sentiment désagréable d'avoir mené une recherche insignifiante ou dénuée de sens. Les finances d'un état-nation ne sont pas illimitées et les politiques stratégiques sont multiples. Les décisions doivent donc être prises et leur responsabilité assumée car d'autres services publics importants (comme ceux de la santé ou de la protection de l'environnement) auraient peut-être mérité plus de crédits que ceux qui leur ont été accordés. Les sciences cognitives ont eu le privilège d'être soutenues par de vastes programmes spécifiques, en raison peut-être de promesses, mais peut-être aussi à cause d'un mimétisme destiné à faire montre d'une compétitivité internationale. Dans ce deuxième cas, il est crucial de dénoncer la supercherie de certains responsables quand par exemple, ils déclarent parfois publiquement que le singe macaque est voué à être remplacé par le ouistiti dans les investigations neuroscientifiques parce qu'il est moins coûteux et plus pratique à manipuler. Il faut également prendre le temps de s'interroger et d'évaluer les bienfaits que certaines pistes de recherche ont apportés, autres que celui d'accroître la taille de la communauté scientifique qui s'y était engagée et ainsi, d'augmenter, par le biais d'une boucle de rétroaction positive, l'assise politique de ses revendications.

Compte tenu de leur audience, il nous semble impératif d'étudier les faits sur la base desquels des savants et une multitude d'autres sont amenés à construire pareilles thèses ou à les défendre. Il faut ré-analyser la solidité de leurs arguments car, au regard du neurophysiologiste connexionniste, il n'est pas du tout évident que les sciences du cerveau puissent être plus utiles pour améliorer la pédagogie et contrecarrer l'impact d'une multitude d'autres facteurs psycho-socio-économiques sur l'acquisition par nos jeunes enfants, du savoir mathématique ou de tout autre savoir. L'ensemble des concepts est d'une complexité tellement différente de celle de l'ensemble des nombres réels, que ceux-ci soient regroupés sur une ligne, dans un plan ou un volume quelconque, qu'on peut se demander comment des relations peuvent être imaginées entre les deux sans qu'on néglige la multidimensionnalité des concepts. Le problème est plus complexe encore quand on considère les relations entre l'ensemble des concepts et l'ensemble des phénomènes cérébraux. Jean Delacour, neurobiologiste spécialiste de l'apprentissage et de la mémoire nous avertissait justement que *"certains concepts ou descriptions psychologiques peuvent être d'origine purement culturelle*

et il serait vain d'en chercher la contrepartie neurobiologique"⁴³⁴. L'horizon fuyant des neurosciences cognitives augure-t-il la recherche imminente des bases neuronales de la pratique du jeu d'échec ou du jeu de go afin de comprendre pourquoi la performance humaine est inférieure à celle de machines créées par les ingénieurs en intelligence artificielle? Un examen de la littérature montre une prolifération d'études dont l'analyse est désormais requise pour nous assurer de leur caractère scientifique. Car il ne suffit pas de jongler avec des nombres, de montrer des images diversement colorées et de faire des analyses statistiques sophistiquées pour garantir la scientificité d'une étude. En plus de veiller à augmenter les connaissances certaines et exactes, il est important aussi de contrôler la prolifération des études pseudo-scientifiques qui inondent le monde académique et qui risquent de plonger notre culture dans la confusion et la désorientation.

A propos du temps

Nous concluons notre travail avec la notion de temps pour témoigner de l'ivresse cognitive ou de la désorientation causées le recours à certains concepts fondamentaux métaphysiques. Quand les chercheurs en neuroscience cognitive utilisent la notion de temps, on ne sait pas bien à quoi ils font référence. Il serait invraisemblable qu'il s'agisse de ce "temps" mécanique composé d'intervalles identiques et périodiques, comme celui de l'horloge de l'ordinateur qui cadence l'enregistrement des mesures. Cette périodicité est totalement étrangère aux facteurs qui déterminent la propagation des signaux dans le milieu cérébral. Il n'y a aucune horloge centrale qui cadence l'émission des potentiels d'action par les cellules nerveuses. Au niveau neuronal, la transmission d'une excitation pré-synaptique à un neurone post-synaptique dépend à la fois de l'état plus ou moins dépolarisé de sa membrane et de la contemporanéité des excitations et inhibitions apportées par les autres cellules pré-synaptiques. A l'exception de certaines cellules, la cadence avec laquelle la plupart des neurones émettent des potentiels d'action n'est ni régulière ni invariable comme celle d'un oscillateur ou d'une horloge. Avec l'exercice, nous constatons que les mouvements deviennent plus rapides et mettent en jeu une coordination plus harmonieuse des contractions musculaires. Pour le neurologue Peter Thier, cette évolution serait le résultat

⁴³⁴ Delacour J. (1994) *Biologie de la conscience*. Presses Universitaires de France, page 27.

d'une optimisation de la "représentation du temps" dans le cerveau⁴³⁵. Alain Berthoz semble défendre une thèse similaire puisque selon lui, *"le cerveau sert à prédire le futur, à anticiper les conséquences de l'action (la sienne propre ou celle des autres), à gagner du temps"*⁴³⁶. Pourtant, une explication strictement neurophysiologique est possible, sans aucun recours à la notion de temps, sans supposer non plus qu'une telle chose existe dans le fonctionnement cérébral. L'évolution des conduites avec l'apprentissage peut simplement être conçue comme une modification des flux d'activité telle que leur écoulement au travers des circuits cérébraux soit facilité et dure physiquement moins longtemps. Nombreux sont celles et ceux qui projettent dans le fonctionnement cérébral certaines des notions que nous avons coutume d'utiliser pour organiser notre vie, comme cet axe du temps, composé d'un passé et d'un futur. Or cette distinction entre passé et futur n'existerait pas dans certaines langues. L'anthropologue américain Benjamin Whorf signalait par exemple que les amérindiens Hopis n'ont *"aucune notion générale ou aucune intuition du temps comme un continuum fluide dans lequel tout dans l'univers procède à un rythme égal, d'un futur vers un passé, à travers un présent ... Au lieu de nos catégories d'espace et de temps, le Hopi distingue plutôt le "manifeste", tout ce qui est accessible aux sens, sans distinction entre le présent et le passé, et le "non-manifeste" comprenant le futur ainsi que ce que nous appelons le mental"*⁴³⁷. Il n'est donc pas du tout certain que l'on puisse trouver dans le cerveau des signaux correspondant à un état futur. Il est possible que les signaux ne se propagent guère au-delà de ce qu'est physiquement l'état présent. Les études chez le singe ont d'ailleurs montré que la possibilité de prédire le futur n'est fondée sur aucune observation, du moins dans le cadre de l'orientation du regard. Ces études auxquelles nous nous sommes fréquemment référés, offrent la possibilité de reconstruire les chaînes de causalité, c'est-à-dire les cascades d'activation responsables des mouvements mesurés. Les études chez l'homme non seulement se limitent à des études corrélatives dont la granularité n'a pas encore atteint celle des études menées chez le singe, mais surtout, elles font intervenir le langage et la compréhension, dont l'influence sur notre sensibilité et nos conduites est considérable. Comme le disait

⁴³⁵ Thier P., Dicke P.W., Haas R. & Barash S. (2000) Encoding of movement time by populations of cerebellar Purkinje cells. *Nature* 405: 72–76.

⁴³⁶ Berthoz A. (1997) *Le sens du mouvement*. Paris: Odile Jacob. page 7.

⁴³⁷ Whorf B.L. (1969) *Linguistique et anthropologie. Les origines de la sémiologie*. Paris: Denoël.

merveilleusement bien le philosophe Ferdinand Gonseth : *"ayant pris l'image du monde que nous nous étions faite pour une intangible réalité extérieure, nous avons mille peines à nous en dégager ... Nous sommes lents à reconnaître, dans ce que nous croyons être des vérités par elles-mêmes et en quelque sorte extérieures, la part de notre esprit"*⁴³⁸.

⁴³⁸ Gonseth F. (1926) *Les fondements des mathématiques*. Paris: Blanchard, pages 111 et 137.

BIBLIOGRAPHIE

- Adeli H., Vitu F. & Zelinsky G.J. (2017) A model of the superior colliculus predicts fixation locations during scene viewing and visual search. *Journal of Neuroscience* 37: 1453-1467.
- Anderson R.W., Keller E.L., Gandhi N.J. & Das S. (1998) Two-dimensional saccade related population activity in superior colliculus in monkey. *Journal of Neurophysiology* 80: 798–817.
- Bain A. (1855 ; 1895) *Les sens et l'intelligence*. Traduit pas M.E. Cazelles, Paris: Alcan.
- Barton E.J. & Sparks D.L. (2001) Saccades to remembered targets exhibit enhanced orbital position effects in monkeys. *Vision research* 41: 2393-2406.
- Bayer R. (1954) *Epistémologie et logique depuis Kant jusqu'à nos jours*. Paris: Presses universitaires de France
- Belkind O. (2013) Leibniz and Newton on Space. *Foundations of Science* 18: 467-497.
- Bellis D (2018) Imaginary spaces and cosmological issues in Gassendi's philosophy. In: FA Bakker et al. (Eds) *Space, imagination and the Cosmos from Antiquity to the early modern period*. Studies in History and Philosophy of Sciences 48
- Bellis D. (2013) Lieu et espace dans la philosophie de Gassendi. In : L. Petterschmitt (Ed) *Espace et métaphysique de Gassendi à Kant* (pp. 61-75) Hermann.
- Bergson H. (1997) *Essai sur les données immédiates de la conscience*. Paris : Quadrige PUF.
- Berry G (2017) *L'hyperpuissance de l'informatique: algorithmes, données, machines, réseaux*. Paris: Odile Jacob.
- Berthoz A. (1997) *Le sens du mouvement*. Paris: Odile Jacob.
- Berthoz A. (2005). Espace perçu, espace vécu, espace conçu. In: *Les Espaces de l'homme*. A. Berthoz & R. Recht (Eds), Paris: Odile Jacob.
- Berthoz A. (2009) *La simplicité*. Paris: Odile Jacob.
- Berthoz A., Grantyn A. & Droulez J. (1986) Some collicular efferent neurons code saccadic eye velocity. *Neuroscience Letters* 72: 289-294.
- Berthoz A. & Petit J.-L. (2006) *Phénoménologie et physiologie de l'action*. Paris: Odile Jacob.
- Biguer B., Donaldson I.M., Hein A. & Jeannerod M. (1988) Neck muscle vibration modifies the representation of visual motion and direction in man. *Brain* 111:1405-1424.
- Binetti N., Hagura N., Fadipe C., Tomassini A., Walsh V. & Bestmann S (2015) Binding space and time through action. *Proceedings of the Royal Society Biological Sciences* 282:20150381.
- Bonato M., Zorzi M. & Umiltà C. (2012) When time is space: evidence for a mental time line. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 36: 2257-2273.

Bourrelly C., Quinet J. & Goffart L. (2021) Bilateral control of interceptive saccades: evidence from the ipsipulsion of vertical saccades after caudal fastigial inactivation. *Journal of Neurophysiology* 125 : 2068-2083.

Boussaoud D. & Bremmer F. (1999) Gaze effects in the cerebral cortex: reference frames for space coding and action. *Experimental Brain Research* 128: 170-180.

Bouveresse J. (1991) Le problème de l'a priori et la conception évolutionniste des lois de la pensée. *Revue de théologie et de philosophie* 123: 353-368.

Bras H., Gogan P. & Tyc-Dumont S. (1987) The dendrites of single brain-stem motoneurons intracellularly labelled with horseradish peroxidase in the cat. Morphological and electrical differences. *Neuroscience* 22: 947-970.

Bremmer F., Schlack A., Duhamel J.-R., Graf W. & Fink G.R. (2001) Space coding in primate posterior parietal cortex. *Neuroimage* 14: S46-S51.

Burr D.C., Ross J., Binda P. & Morrone M.C. (2010) Saccades compress space, time and number. *Trends in cognitive sciences* 14: 528-533.

Butterworth B. (1999) *The mathematical brain*. London: Macmillan.

Buzsáki G. & Llinás R. (2017) Space and time in the brain. *Science* 358: 482-485.

Cannon S.C. & Robinson D.A. (1987) Loss of the neural integrator of the oculomotor system from brain stem lesions in monkey. *Journal of Neurophysiology* 57: 1383-1409.

Capek M. (2014) *The concepts of space and time: their structure and their development*. Springer.

Carey S. & Spelke E. (1994) Domain-specific knowledge and conceptual change. In: *Mapping the mind: Domain specificity in cognition and culture*, in: L.A. Hirschfeld & S.A. Gellman (Eds) pp 169-200; Spelke E.S. & Kinzler K.D. (2007). Core knowledge. *Developmental science* 10: 89-96.

Cassirer E. (1995) Le problème de la connaissance dans la philosophie et la science des temps modernes. volume 4 *De la mort de Hegel aux temps présents*. Paris: Les éditions du Cerf.

Changeux J.-P. & Connes A. (1989) *Matière à pensée*. Paris: Odile Jacob.

Choquet D. & Triller B. (2013) The dynamic synapse. *Neuron* 80: 691-703, 2013.

Cipora K., Schroeder P.A., Soltanlou M. & Nuerk H.-C. (2018) More space, better mathematics: Is space a powerful tool or a cornerstone for understanding arithmetic? In: *Visualizing mathematics*, K.S. Mix & MT Battista (Eds), pp 77-116.

Dacunha-Castelle D. (2020) *Les mathématiques, le cerveau de l'âne et l'évolution*. Paris : Cassini.

Davis-López de Carrizosa M.A., Morado-Díaz C.J., Miller J.M., de la Cruz R.R. & Pastor A.M. (2011) Dual encoding of muscle tension and eye position by abducens motoneurons. *Journal of Neuroscience* 31: 2271-2279.

de Cruz H. (2009) An enhanced argument for innate elementary geometric knowledge and its philosophical implications. In: van Kerkhove B (ed) *New perspectives on mathematical practices. Essays in philosophy and history of mathematics*, 185-206.

Dehaene S. (2010) *La bosse des maths*. Paris: Odile Jacob.

Dehaene S. (2012). Les formes de la géométrie et l'universalité des intuitions mathématiques. Dans J-P Changeux (Ed) *La vie des formes et les formes de la vie*. Paris: Odile Jacob

Dehaene S. & E. Brannon (2012) *Space, time and number in the brain*. London: Academic Press, London.

Dehaene S., Molko N., Cohen L. & Wilson A.J. (2004). Arithmetic and the brain. *Current Opinion in Neurobiology* 14: 218-224.

Dehaene S., Spelke E., Pinel P., Stanescu R. & Tsivkin S. (1999) Sources of mathematical thinking: Behavioral and brain-imaging evidence. *Science* 284: 970-974.

Delacour J. (1994) *Biologie de la conscience*. Presses Universitaires de France.

de Paz M. (2018) From jurisprudence to mechanics: Jacobi, Reech, and Poincaré on convention. *Science in context* 31: 223–250.

de Risi V. (2016) Francesco Patrizi and the new geometry of space. In: *Boundaries, extents and circulations*, K. Vermeir & J. Reger (Eds) pp. 55-106, Springer.

Descartes R. (1681) *Les principes de la philosophie*. 2ème partie, paragraphe 4. Dans Œuvres de Descartes, publiées par Victor Cousin (1824-1826) tome 3, Paris: Levrault.

de Vittori T. (2009) *Les notions d'espace en géométrie. De l'antiquité à l'âge classique*. Paris: L'harmattan

DeWind N.K., Peng J., Luo A., Brannon E.M., Platt M.L. (2017). Pharmacological inactivation does not support a unique causal role for intraparietal sulcus in the discrimination of visual number. *PLOS one*, 12(12), e0188820.

Dias E.C. & Segraves M.A. (1999) Muscimol-induced inactivation of monkey frontal eye field: effects on visually and memory-guided saccades. *Journal of Neurophysiology* 81: 2191–2214.

Drucker C.B. & Brannon E.M. (2014) Rhesus monkeys (*Macaca mulatta*) map number onto space. *Cognition* 132: 57-67.

Du Châtelet E (1742) *Institutions de Physique*, Paris : Prault.

Ducheyne S. (2001) Isaac Newton on space and time: metaphysician or not? *Philosophica* 67:77-114.

- Durand J. (1989) Electrophysiological and morphological properties of rat abducens motoneurons. *Experimental Brain Research* 76: 141–152.
- Edelheit A. (2009) Francesco Patrizi's two books on space: geometry, mathematics, and dialectic beyond Aristotelian science. *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 40: 243-257.
- Einstein A. (1921) *La géométrie et l'expérience*. Paris: Gauthiers-Villars
- Ekstrom A.D., Harootonian S.K. & Huffman D.J. (2020) Grid coding, spatial representation, and navigation: Should we assume an isomorphism? *Hippocampus* 30: 422-432.
- Enriques F. (1914) *Les concepts fondamentaux de la Science*. Paris : Flammarion
- Faulkenberry T.J., Witte M. & Hartmann (2018) Tracking the continuous dynamics of numerical processing: A brief review and editorial. *Journal of Numerical Cognition* 4: 271-285.
- Ferreirós J. & García-Pérez M.J. (2020). Beyond natural geometry: on the nature of proto-geometry. *Philosophical Psychology* 33: 181-205.
- Fogassi L., Gallese V., Di Pellegrino G., Fadiga L., Gentilucci M. & Luppino G. & Rizzolatti G. (1992) Space coding by premotor cortex *Experimental Brain Research* 89: 686-690.
- Fruhmann Berger M., Johannsen L. & Karnath H.-O. (2008) Time course of eye and head deviation in spatial neglect. *Neuropsychology* 22: 697-702.
- Galilée G. (1980) *L'Essayeur*, trad. C. Chauviré. Besançon : Presses Universitaires de Franche-Comté.
- Gallistel C.R. (2017) Finding numbers in the brain. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 373: 201701119
- Gardenfors P. (2004) *Conceptual spaces: The geometry of thought*. MIT press; Gardenfors P (2014). *The geometry of meaning: Semantics based on conceptual spaces*. Cambridge: MIT press.
- Gaymard B., Siegler I., Rivaud-Péchoux S., Israel I., Pierrot-Deseilligny C. & Berthoz A. (2000) A common mechanism for the control of eye and head movements in humans. *Annals of Neurology* 47: 819-822.
- Gauthier G.M., Nommay D. & Vercher J.L. (1990) The role of ocular muscle proprioception in visual localization of targets. *Science* 249: 58-61.
- Gingras Y. (2013) *Sociologie des sciences*. Que sais-je. Paris: Presses Universitaires de France, Paris.
- Goffart L. (2018). De la représentation cérébrale spatio-temporellement distribuée à la capture ici et maintenant d'un objet visuel en mouvement. In: *L'avenir de la complexité et du désordre* (Eds. J-C. S. Lévy & S. Ofman) Editions matériologiques, pp 267-294.

Goffart L. (2019) Kinematics and the neurophysiological study of visually-guided eye movements. *Progress in Brain Research* 249: 375-384.

Goffart L. (2020) Itinéraire pour une contribution de la Neurophysiologie de l'orientation du regard à la recherche des conditions de possibilité de l'intuition spatiale. Aix-Marseille Université (AMU).

Goffart L., Bourrelly C. & Quinet J. (2017) Synchronizing the tracking eye movements with the motion of a visual target: Basic neural processes. *Progress in Brain Research* 236: 243-268.

Goffart L., Bourrelly C. & Quinton J.C. (2018) Neurophysiology of visually guided eye movements: critical review and alternative viewpoint. *Journal of Neurophysiology* 120: 3234-3245.

Goffart L., Cecala A.L. & Gandhi N.J. (2017) The superior colliculus and the steering of saccades toward a moving visual target. *Journal of Neurophysiology* 118: 2890-2901.

Goffart L., Chen L.L. & Sparks D.L. (2004) Deficits in saccades and fixation during muscimol inactivation of the caudal fastigial nucleus in the rhesus monkey. *Journal of Neurophysiology* 92: 3351-3367.

Goffart L., Guillaume A. & Pélisson D. (1998) Compensation for gaze perturbation during inactivation of the caudal fastigial nucleus in the head-unrestrained cat. *Journal of Neurophysiology* 80: 1552-1557.

Goffart L., Hagedorn Z.M. & Krauzlis R.J. (2012) Visual fixation as equilibrium: evidence from superior colliculus inactivation. *Journal of Neuroscience* 32: 10627-10636.

Goffart L. & Pélisson D. (1998) Orienting gaze shifts during muscimol inactivation of caudal fastigial nucleus in the cat. I. Gaze dysmetria. *Journal of Neurophysiology* 79: 1942-1958.

Goffart L., Quinet J. et al. (2006) Influence of background illumination on fixation and visually guided saccades in the rhesus monkey. *Vision Research* 46: 149-162.

Goffart L., Quinet J. & Bourrelly C. (soumis) Neurophysiology of gaze orientation: Core neuronal networks. In: J. Grafman (Ed) *Encyclopedia of the Human Brain*. Elsevier.

Gonseth F. (1926, 1974) *Les fondements des mathématiques*. Blanchard : Paris

Grant E. (2008) *Much ado about nothing: Theories of space and vacuum from the middle ages to the scientific revolution*. Cambridge : Cambridge University Press.

Grantyn A., Brandi A.M., Dubayle D., Graf W., Ugolini G., Hadjidimitrakakis K. & Moschovakis A. (2002) Density gradients of trans-synaptically labeled collicular neurons after injections of rabies virus in the lateral rectus muscle of the rhesus monkey. *Journal of Comparative Neurology* 451: 346-361.

Graziano M., Yap G.S. & Gross C. (1994) Coding of visual space by premotor neurons. *Science* 266: 1054-1057.

Grievies R.M. & Jeffery K.J. (2017) The representation of space in the brain. *Behavioural processes* 135: 113-131.

Guerrasio L., Quinet J., Büttner U. & Goffart L. (2010) The fastigial oculomotor region and the control of foveation during fixation. *Journal of Neurophysiology* 103: 1988-2001.

Guthrie B.L., Porter J.D. & Sparks D.L. (1983) Corollary discharge provides accurate eye position information to the oculomotor system. *Science* 221: 1193-1195.

Hafed, Z.M., & Chen, C.Y. (2016). Sharper, stronger, faster upper visual field representation in primate superior colliculus. *Current Biology* 26: 1647-1658.

Hafed Z.M. & Goffart L. (2020) Gaze direction as equilibrium: more evidence from spatial and temporal aspects of small-saccade triggering in the rhesus macaque monkey. *Journal of Neurophysiology* 123: 308-322.

Hamou P. (2014) Sensorium Dei. Espace et présence sensible de l'esprit chez Newton. *Revue philosophique de la France et de l'Etranger* 139: 47-72.

Hanushek E.A., Jamison D.T., Jamison E.A. & Woessmann L. (2008). Education and economic growth: It's not just going to school, but learning something while there that matters. *Education next* 8: 62-71.

Hartmann M. & Fischer M.H. (2016) Exploring the numerical mind by eye-tracking: a special issue. *Psychological Research* 80: 325-333.

Hartmann M., Mast F.W. & Fischer M.H. (2016) Counting is a spatial process: evidence from eye movements. *Psychological Research* 80: 399-409.

Hasselmo M.E. & Stern C.E. (2015) Current questions on space and time encoding. *Hippocampus* 24: 744-752

Hatfield G. (1990) *The natural and the normative. Theories of spatial perception from Kant to Helmholtz*. Cambridge: MIT Press.

Hawes Z. & Ansari D. (2020) What explains the relationship between spatial and mathematical skills? A review of evidence from brain and behavior. *Psychonomic Bulletin and Review* 1-18.

Heisenberg W (2010) *Le manuscrit de 1942*, Editions Allia.

Herzfeld D.J., Kojima Y., Soetedjo R. & Shadmehr R. (2015). Encoding of action by the Purkinje cells of the cerebellum. *Nature* 526 : 439-442.

Houdé O. & Tzourio-Mazoyer N. (2003) Neural foundations of logical and mathematical cognition. *Nature Reviews Neuroscience* 4: 507-514.

Hu X., Jiang H., Gu C., Li C. & Sparks D.L. (2007) Reliability of oculomotor command signals carried by individual neurons. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 104: 8137-8142.

Husain M. & Nachev P. (2007) Space and the parietal cortex. *Trends in cognitive sciences* 11: 30-36.

Isa T., Itouji T. & Sasaki S. (1992) Control of head movements in the cat: two separate pathways from the superior colliculus to neck motoneurons and their roles in orienting movements. In: *Vestibular and Brain Stem Control of Eye, Head and Body Movements*. H. Shimazu & Y. Shinoda (Eds.), Japan Scientific Societies Press, Tokyo, pp. 275–284.

Jacques (1842) *Œuvres de Leibniz*. Paris : Charpentier.

Jammer M. (2008) *Concepts d'espace. Une histoire des théories de l'espace en physique*. Paris : Vrin.

Jeannerod M. (1997) *The cognitive neuroscience of action*. Oxford: Blackwell.

Johansson R., Holsanova J. & Holmqvist K. (2013) Using eye movements and spoken discourse as windows to inner space. In: *The construal of spatial meaning: Windows into conceptual space* (pp. 9-28). Oxford University Press.

Jürgens R., Becker W. & Kornhuber H.H. (1981) Natural and drug-induced variations of velocity and duration of human saccadic eye movements: evidence for a control of the neural pulse generator by local feedback. *Biological Cybernetics* 39: 87–96.

Kaneko C.R. (1997) Eye movement deficits after ibotenic acid lesions of the nucleus prepositus hypoglossi in monkeys. I. Saccades and fixation. *Journal of Neurophysiology* 78: 1753–1768.

Kant E. (1770, 1980) De la forme et des principes du monde sensible et du monde intelligible (Dissertation de 1770). *Œuvres philosophiques* tome 1, Bibliothèque de la Pléiade.

Kant E. (1781/1787, 1980) Critique de la raison pure. *Œuvres philosophiques*. Bibliothèque de la Pléiade, Gallimard.

Kant E. (1783/1967) *Prolégomènes à toute métaphysique future qui pourra se présenter comme science*. Paris: Vrin.

Keller E.L. (1989) The cerebellum. *Reviews in Oculomotor Research* 3: 391–411.

Keller E.L., Gandhi N.J. & Shieh J.M. (1996) Endpoint accuracy in saccades interrupted by stimulation in the omnipause region in monkey. *Visual Neuroscience* 13: 1059–1067.

Keller E.L., Gandhi N.J. & Weir P.T. (1996) Discharge of superior collicular neurons during saccades made to moving targets. *Journal of Neurophysiology* 76: 3573–3577.

Keller E.L., Slakey D.P. & Crandall W.F. (1983) Microstimulation of the primate cerebellar vermis during saccadic eye movements. *Brain Research* 288: 131–143.

Knops A., Thirion B., Hubbard E.M., Michel V. & Dehaene S. (2009). Recruitment of an area involved in eye movements during mental arithmetic. *Science* 324: 1583-1585.

- Kojima Y., Soetedjo R. & Fuchs A.F. (2010) Effects of GABA agonist and antagonist injections into the oculomotor vermis on horizontal saccades. *Brain Research* 1366 : 93-100.
- Kornhuber H.H. (1971) Motor functions of cerebellum and basal ganglia: the cerebellocortical saccadic (ballistic) clock, the cerebellonuclear hold regulator, and the basal ganglia ramp (voluntary speed smooth movement) generator. *Kybernetik* 8: 157–162.
- Koyré A (1980) *Etudes galiléennes*. Paris: Hermann.
- Krauzlis R.J. & Lisberger S.G. (1994) A model of visually-guided smooth pursuit eye movements based on behavioral observations. *Journal of Computational Neuroscience* 1: 265-283.
- Kuhn T.S. (1972) *La structure des révolutions scientifiques*. Paris: Flammarion.
- Kustov A.A. & Robinson D.L. (1995) Modified saccades evoked by stimulation of the macaque superior colliculus account for properties of the resettable integrator. *Journal of Neurophysiology* 73: 1724-1728.
- Lange F.A. (1879) *Histoire du matérialisme et critique de son importance à notre époque. Tome second Histoire du matérialisme depuis Kant*. Reinwald et Cie, Paris.
- Laurutis V.P. & Robinson D.A. (1986) The vestibulo-ocular reflex during human saccadic eye movements. *Journal of Physiology* 373: 209–233.
- Lennerstrand G., Tian S. & Zhao T.X. (1993) Force development and velocity of human saccadic eye movements. I: Abduction and adduction. *Clinical Vision Sciences* 8: 295–305.
- Lewis R.F., Zee D.S., Hayman M.R. & Tamargo R.J. (2001) Oculomotor function in the rhesus monkey after deafferentation of the extraocular muscles. *Experimental Brain Research* 141: 349–358.
- Li C.S.R., Mazzoni P. & Andersen R.A. (1999) Effect of reversible inactivation of macaque lateral intraparietal area on visual and memory saccades. *Journal of Neurophysiology* 81: 1827-1838.
- Lippert M.T., Steudel T., Ohl F., Logothetis N.K. & Kayser C. (2010) Coupling of neural activity and fMRI-BOLD in the motion area MT. *Magnetic resonance imaging* 28: 1087-1094.
- Lisberger S.G., Morris E.J. & Tychsen L. (1987) Visual motion processing and sensory-motor integration for smooth pursuit eye movements. *Annual Review of Neuroscience* 10: 97-129.
- Lockart (2014) *Measurement*. Harvard University Press. Voir aussi Dowek G. (2011) *Les métamorphoses du calcul*. Paris : Le Pommier.
- Loetscher T., Bockisch C.J. & Brugger P. (2008) Looking for the answer: The mind's eye in number space. *Neuroscience* 151: 725-729.
- Loetscher T., Bockisch C.J., Nicholls M.E.R. & Brugger P. (2010) Eye position predicts what number you have in mind. *Current Biology* 20: R264-R265.

Lorenz K. (1981) La doctrine kantienne de l'a priori à la lumière de la biologie contemporaine. Dans: *L'homme dans le fleuve du vivant*. Paris: Flammarion.

Lorenz K. (2013) Innate bases of learning. In: *Learning as self-organization*. Psychology Press.

Lotze H. (1877) Sur la formation de la notion d'espace. *Revue philosophique de la France et de l'Etranger* 4: 345-368.

Ly I. (2005) L'espace est-il un concept? Mesure et géométrie dans l'œuvre philosophique de Poincaré.

Mach E. (1901) On physiological, as distinguished from geometrical, space. *The Monist* 11: 321-338.

Mach E. (1903) Space and geometry from the point of view of physical enquiry. In: *Space and geometry in the light of physiological, psychological and physical enquiry*. Mineola, USA : Dover Publications Inc.

Mach E. (1914) *The analysis of sensations, and the relation of the physical to the psychical*. Chicago: Open Court.

Mach E. (1919) *La connaissance et l'erreur*. Paris : Flammarion.

Magnani B., Mangano G.R., Frassinetti F. & Oliveri M. (2013) The role of posterior parietal cortices on prismatic adaptation effects on the representation of time intervals. *Neuropsychologia* 51:2825-2832.

Masino T. (1992) Brainstem control of orienting movements: intrinsic coordinate systems and underlying circuitry. *Brain, Behavior and Evolution* 40: 98-111.

Mays L. (1998) Has Hering been hooked? *Nature Medicine* 4: 889-890.

McGuire J.E. (1978) Newton on Place, Time and God : an unpublished source. *The British Journal for the History of Science* 11: 114-129.

McIlwain J.T. (1976) Large receptive fields and spatial transformations in the visual system. *International Review of Physiology* 10: 223–248.

Meulders M. (2001) *Helmholtz. Des Lumières aux neurosciences*. Paris : Odile Jacob.

Miravete S., Tricot A. & Amadiou F. (2020) Un sens inné du nombre? Une revue des différentes tâches. *Bulletin de Psychologie* 73: 297-310.

Mitrani L. & Dimitrov G. (1978) Pursuit eye movements of a disappearing moving target. *Vision Research* 18: 537–539.

Mix KS & Cheng Y-L (2012) The relation between space and math: Developmental and educational implications. In: *Advances in child development and behavior*. J.B. Benson (Ed) pp 197-243.

- Mix K.S. (2019) Why are spatial skill and mathematics related? *Child Development Perspectives* 13: 121-126.
- Monnoyeur F. (1995) Henry More: plaidoyer pour un espace infini et divin. In: F. Monnoyeur (Ed) *Infini des philosophes, infini des astronomes*, p 77-92, Paris: Belin.
- Morel C (2007). Localisation spatiale et théorie de l'intuition sensible chez R.H. Lotze : le transcendantal et l'affection. *Séminaire de recherche*, Clermont-Ferrand.
- Morrone M.C., Ross J. & Burr D. (2005). Saccadic eye movements cause compression of time as well as space. *Nature neuroscience* 8: 950-954
- Moschovakis A.K., Scudder C.A. & Highstein S.M. (1996) The microscopic anatomy and physiology of the mammalian saccadic system. *Progress in Neurobiology* 50: 133-254.
- Moschovakis A.K., Kitama T., Dalezios Y., Petit J., Brandi A.M. & Grantyn AA (1998) An anatomical substrate for the spatiotemporal transformation. *Journal of Neuroscience* 18: 10219-10229.
- Mullette-Gillman O.D.A., Cohen Y.E. & Groh J.M. (2009). Motor-related signals in the intraparietal cortex encode locations in a hybrid, rather than eye-centered reference frame. *Cerebral Cortex* 19: 1761-1775.
- Munoz F., Jensen G., Kennedy B.C., Alkan Y., Terrace H.S., & Ferrera V.P. (2020). Learned representation of implied serial order in posterior parietal cortex. *Scientific Reports*, 10(1), 1-14.
- Newcombe N.S., Levine S.C. & Mix K.S. (2015) Thinking about quantity: the intertwined development of spatial and numerical cognition. *WIREs Cognitive Science* 6: 491-505.
- Newton I. (1985) *De la gravitation ou des fondements de la mécanique classique* (traduction M.F. Biarnais). Paris: Les Belles Lettres.
- Nichols M.J. & Sparks D.L. (1995) Nonstationary properties of the saccadic system: new constraints on models of saccadic control. *Journal of Neurophysiology* 73: 431-435.
- Nichols M.J. & Sparks D.L. (1995) Nonstationary properties of the saccadic system: new constraints on models of saccadic control. *Journal of Neurophysiology* 73: 431-435.
- Nichols M.J. & Sparks D.L. (1996) Component stretching during oblique stimulation-evoked saccades: the role of the superior colliculus. *Journal of Neurophysiology* 76 : 582-600.
- Nichols M.J. & Sparks D.L. (1996) Independent feedback control of horizontal and vertical amplitude during oblique saccades evoked by electrical stimulation of the superior colliculus. *Journal of Neurophysiology* 76 : 4080-4093.
- Nieder A. (2017) Number faculty is rooted in our biological heritage. *Trends in cognitive sciences* 21: 403-404.

Noda H., Murakami S. & Warabi T. (1991) Effects of fastigial stimulation upon visually-directed saccades in macaque monkeys. *Neuroscience Research* 10: 188-199.

Nowak L. & Bullier J. (1997) The timing of information transfer in the visual system. In: *Cerebral Cortex. Extrastriate Cortex in Primates*, edited by Rockland KS, Kaas J.H. & Peters A. New York: Plenum, 1997, vol. 12, p. 205–241.

Núñez R. (2009) Numbers and arithmetic: Neither hardwired nor out there. *Biological theory* 4: 68-83.

Núñez R. (2016) How much mathematics is “hardwired,” if any at all: Biological evolution, development, and the essential role of culture. In *Minnesota Symposia on Child Psychology: Culture and Developmental Systems*, Volume 38 (pp. 83-124). Hoboken USA: John Wiley & Sons, Inc.

O’Keefe J. (1993) Kant and the sea-horse: An essay in the neurophilosophy of space. In: *Spatial representation. Problems in philosophy and psychology*. N Eilan, R McCarthy & B Brewer (eds) Oxford University Press.

Orlando-Dessaints N., Montagnini A. & Goffart L. (2019) Tracking a moving visual target in the monkey: influence of the path frequency. *48th Annual Meeting of the Society for Neuroscience* Chicago, USA.

Patrizi F. & Brikman B. (1943) On physical space. *Journal of the History of Ideas* 4: 224-245.

Pecere P. (2021) “Physiological Kantianism” and the “organization of the mind”: a reconsideration. *Intellectual History Review* 31: 693-714.

Pellionisz A. & Llinás R. (1982) Space-time representation in the brain. The cerebellum as a predictive space-time metric tensor. *Neuroscience* 7: 2949–2970.

Piaget J. (1968) Quantification, conservation, and nativism. *Science* 162: 976-979.

Poincaré H. (1906). La relativité de l'espace. *L'année psychologique* 13: 1-17.

Poincaré H. (1913) *Dernières pensées*, Paris : Flammarion.

Poincaré (1921) *Des fondements de la géométrie*, Paris: Chiron.

Poincaré H. (2002) *L’opportuniste scientifique*. Basel : Birkhäuser.

Poincaré H. & Bourguignon J.P. (2013) Science et méthode, In : *La science selon Henri Poincaré*, collection Idem, Paris: Dunod.

Poincaré H. & Bourguignon J.P. (2013) La science et l’hypothèse, In : *La science selon Henri Poincaré*, collection Idem, Paris: Dunod.

Popper K.R. (1985) *Conjectures et réfutations. La croissance du savoir scientifique*. Paris: Payot.

Popper K.R. (1991) *La connaissance objective*. Paris: Aubier.

Power J.E. (1970) Henry More and Isaac Newton on absolute space. *Journal of the History of Ideas* 31:289-296.

Pulte H. (2000) Beyond the edge of certainty: Reflections on the rise of physical conventionalism. *Philosophia Scientiae* 4: 47-68.

Quinet J. & Goffart L. (2015) Does the brain extrapolate the position of a transient moving target? *Journal of Neuroscience* 35: 11780–11790.

Quinet J, Schultz K, May P.J. & Gamlin P.D. (2020). Neural control of rapid binocular eye movements: Saccade-vergence burst neurons. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117: 29123-29132.

Rey O (2016) *Quand le monde s'est fait nombre*. Stock.

Ribot T (1881) *La psychologie anglaise contemporaine*, 3^{ème} édition, Paris: Baillière.

Ribot T. (1879) *La psychologie allemande contemporaine*. Paris: Baillière.

Rinaldi L., Brugger P., Bockisch C.J., Bertolini G. & Girelli L. (2015) Keeping an eye on serial order: Ocular movements bind space and time. *Cognition*, 142, 291-298.

Robinson D.A. (1971) Models of oculomotor neural organization. In: *The control of eye movements*, P. Bach-Y-Rita, C. Collins & J. Hyde (Eds), Academic Press, pp 519-538.

Robinson D.A. (1972) Eye movements evoked by collicular stimulation in the alert monkey. *Vision Research* 12: 1795-1808.

Robinson D.A. (1975) Oculomotor control signals. In: *Basic mechanisms of ocular motility and their clinical implications*, Lennerstrand G & Bach-y- Rita P. (Editeurs) Oxford: Pergamon p. 337–374.

Robinson D.A. (1992) Implications of neural networks for how we think about brain function. *Behavioral and Brain Sciences* 15: 42-63.

Robinson D.A. (1992) How far into brain function can neural networks take us? *Behavioral and Brain Sciences* 15: 823-828.

Roitman JD, Brannon E.M. & Platt ML (2007) Monotonic coding of numerosity in macaque lateral intraparietal area. *PLoS biology* 5: e208. Sapir E. (1929) The status of linguistics as a science. *Language* 5: 207-214.

Roll J.P., Roll R. & Velay J.L. (1991) Proprioception as a link between body space and extra-personal space. In: *Brain and space*, J. Paillard (Ed) Oxford: Oxford University Press pp 112-132.

Rollinger R.D. (2001). Lotze on the sensory representation of space. In : L. Albertuzzi (Ed). *The dawn of cognitive science. Early european contributors*, Kluwer Academic Publishers pp 103-122.

Salvaggio S., Masson N. & Andres M. (2018) Eye position reflects the spatial coding of numbers during magnitude comparison. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 45: 1910-1921.

Sapir E. (1929) The status of linguistics as a science. *Language* 5: 207-214.

Sato H. & Noda H. (1992) Saccadic dysmetria induced by transient functional decortication of the cerebellar vermis. *Experimental Brain Research* 88: 455-458.

Schiller P.H. & Koerner F. (1971) Discharge characteristics of single units in superior colliculus of the alert rhesus monkey. *Journal of Neurophysiology* 34: 920-936.

Schiller P.H. & Stryker M. (1972) Single-unit recording and stimulation in superior colliculus of the alert rhesus monkey. *Journal of Neurophysiology* 35: 915-924.

Schmauss W. (2017) Henri Poincaré and Charles Renouvier on conventions; or, How science is like politics. *HOPOS: The Journal of the International Society for the History of Philosophy of Science* 7: 182-198.

Schmolesky M.T., Wang T., Hanes D.P, Thompson K.G., Leutgeb S., Schall J.D. & Leventhal A.G. (1998) Signal timing across the macaque visual system. *Journal of Neurophysiology* 79: 3272–3278, 1998.

Schlag J., Pouget A., Sadeghpour S. & Schlag-Rey M. (1998) Interactions between natural and electrically evoked saccades. III. Is the nonstationarity the result of an integrator not instantaneously reset? *Journal of Neurophysiology* 79: 903–910.

Schneider E., Maruyama M., Dehaene S. & Sigman M. (2012) Eye gaze reveals a fast, parallel extraction of the syntax of arithmetic formulas. *Cognition* 125: 475-490.

Scudder C.A., Kaneko C.S. & Fuchs A.F. (2002) The brainstem burst generator for saccadic eye movements: a modern synthesis. *Experimental Brain Research* 142: 439-462.

Séguy-Duclot A. (2019) *Généalogie des mathématiques*. Paris: Spartacus.

Smalianchuk I., Jagadisan U.K. & Gandhi N.J. (2018) Instantaneous midbrain control of saccade velocity. *Journal of Neuroscience* 38: 10156-10167.

Souriau J.-M. (1970) *Structure des systèmes dynamiques*. Dunod, Paris.

Sparks D.L. (1988) Neural cartography: sensory and motor maps in the superior colliculus. *Brain, behavior and evolution* 31: 49-56.

Sparks D.L. (2002) The brainstem control of saccadic eye movements. *Nature Reviews Neuroscience* 3: 952–964. Sparks D.L., Mays L.E. & Porter J.D. (1987) Eye movements induced by pontine stimulation: interaction with visually triggered saccades. *Journal of Neurophysiology* 58: 300-318.

Sparks D.L., Barton E.J., Gandhi N.J. & Nelson J. (2002) Studies of the role of the paramedian pontine reticular formation in the control of head restrained and head unrestrained gaze shifts. *Annals of the New York Academy of Sciences* 956: 85-98.

Sparks D.L., Holland R. & Guthrie B.L. (1976) Size and distribution of movement fields in the monkey superior colliculus. *Brain Research* 113: 21–34.

Sparks D.L., Lee C. & Rohrer W.C. (1990) Population coding of the direction, amplitude and velocity of saccadic eye movements by neurons in the superior colliculus. *Cold Spring Harbor Symposium on Quantitative Biology* 55: 805-811.

Sparks D.L. & Nelson I.S. (1987) Sensory and motor maps in the mammalian superior colliculus. *Trends in Neurosciences* 10: 312-317.

Spelke E.S. (2017) Core knowledge, language, and number. *Language Learning and Development* 13: 147-170.

Spencer H. (1892) *Principes de Psychologie*. Tome 2 ; trad. sur la nouvelle édition anglaise par T. Ribot et A. Espinas.

Srinivasan M. & Carey S. (2010) The long and the short of it: On the nature and origin of functional overlap between representations of space and time. *Cognition* 116: 217-241.

Strohmaier A.R., MacKay K.J., Obersteiner A. & Reiss K.M. (2020). Eye-tracking methodology in mathematics education research: A systematic literature review. *Educational Studies in Mathematics* 104: 147-200.

Stump DJ (2015) *Conceptual changes and the philosophy of science. Alternative interpretations of the a priori*. London : Routledge.

Suarez-Nani T. (2018) Space and movement in medieval thought: The Angelological shift. In: *Space, imagination and the cosmos from antiquity to the early modern period*, F.A. Bakker, D. Bellis & C.R. Palmerino (Eds) pp. 69-89, Springer.

Sun Z., Smilgin A., Junker M., Dicke P.W. & Thier P. (2017) The same oculomotor vermal Purkinje cells encode the different kinematics of saccades and of smooth pursuit eye movements. *Science Reports* 7: 40613.

Supiot A. (2015) *La gouvernance par les nombres*. Fayard.

Thier P., Dicke P.W., Haas R. & Barash S. (2000) Encoding of movement time by populations of cerebellar Purkinje cells. *Nature* 405: 72–76.

Thinus-Blanc C., Chabanne V., Tommasi L., Peruch P. & Vauclair J. (2010) The encoding of geometry in various vertebrate species. *Spatial cognition, spatial perception: mapping the self and space*, 99-116.

Toomarian E.Y. & Hubbard E.M. (2018) On the genesis of spatial-numerical associations: evolutionary and cultural factors co-construct the mental number line. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 90: 184-199.

- Tommasi L., Chiandetti C., Pecchia T., Sovrano V.A. & Vallortigara G. (2012) From natural geometry to spatial cognition. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 36: 799-824.
- Toulmin S. & Goodfield J. (1982) *The discovery of time*. Chicago: University of Chicago Press.
- Umiltà C., Priftis K. & Zorzi M. (2009) The spatial representation of numbers: evidence from neglect and pseudoneglect. *Experimental Brain Research* 192: 561-569.
- Vallortigara G. (2009) Animals as natural geometers. *Cognitive biology: Evolutionary and developmental perspectives on mind, brain and behavior*, 83-104
- Vallortigara G. (2012) Core knowledge of object, number, and geometry: A comparative and neural approach. *Cognitive Neuropsychology* 29: 213-236.
- Vallortigara G. (2017) Comparative cognition of number and space: the case of geometry and of the mental number line. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 373: 20170120.
- van Essen D.C., Newsome W.T. & Maunsell J.H. (1984). The visual field representation in striate cortex of the macaque monkey: asymmetries, anisotropies, and individual variability. *Vision Research* 24: 429-44.
- van Opstal A.J., Hepp K., Hess B.J., Straumann D. & Henn V. (1991). Two-rather than three-dimensional representation of saccades in monkey superior colliculus. *Science* 252: 1313-1315.
- von Bartalanffy L. (2008) *General system theory*, New York: Braziller.
- von Helmholtz H. (1865) *Optique physiologique*. Tome 3. Traduction française par E. Javal & N. Th. Klein. Paris: Masson.
- von Helmholtz H. (1855) Sur le voir humain. *Philosophia Scientiae* 14: 13-35.
- von Helmholtz H. (1878, 2003) Les faits dans la perception. *Philosophia Scientiae* 7: 49-78.
- von Helmholtz H. (2008) Sur l'origine et la signification des axiomes géométriques. In : "*Les fondements de la géométrie*", traduction de D. Mascré, Reims: Editions de l'infini.
- von Neumann J. (1996) *L'ordinateur et le cerveau*. Paris: Champs Flammarion.
- von Uexküll J. (1956/2010) *Milieu animal et milieu humain*, Paris : Rivages.
- Wang L., Li M., Yang T. & Zhou X. (2021) Mathematics meets science in the brain. *Cerebral Cortex* 32: 123-136.
- Wardak C., Olivier E. & Duhamel J.-R. (2002) Saccadic target selection deficits after lateral intraparietal area inactivation in monkeys. *Journal of Neuroscience* 22: 9877-9884.
- Warren W.H. (2019). Non-euclidean navigation. *Journal of Experimental Biology* 222: jeb187971.

White J.M., Sparks D.L. & Stanford T.R. (1994). Saccades to remembered target locations: an analysis of systematic and variable errors. *Vision research* 34: 79-92.

Whorf B.L. (1969) *Linguistique et anthropologie. Les origines de la sémiologie*. Paris: Denoël.

Wigner E.P. & Balibar F. (2012) L'irraisonnable efficacité des mathématiques dans les sciences de la nature. *Rue Descartes* 74: 99-116.

Wittgenstein L. (2006) *De la certitude*. Paris: Gallimard.

Wuketits F.M. (1984) Evolutionary epistemology - a challenge to science and philosophy. In: F.M. Wuketits (ed) *Concepts and approaches in evolutionary epistemology*, Reidel Publishing Company.

Wurtz R.H. & Goldberg M.E. (1972) Activity of superior colliculus in behaving monkey. III. Cells discharging before eye movements. *Journal of Neurophysiology* 35: 575-586.

Young C.J., Levine S.C. & Mix K.S. (2018) The connection between spatial and mathematical ability across development. *Frontiers in Psychology* 9: 755.