

Université de Montréal

Visualisation du cerveau et théories de l'esprit

La création d'une interface cerveau-machine

par Nicolas Brault

Histoire de l'art et études cinématographiques
Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des arts et des sciences
en vue de l'obtention du grade de maîtrise
en études cinématographiques
option recherche et création

Décembre, 2018

©, Nicolas Brault, 2018

Résumé

Les interfaces cerveau-machine (ICM), grâce à l'imagerie médicale moderne, font de l'esprit au travail un outil de contrôle cinétique pour de nombreuses applications médicales et artistiques. Ainsi, depuis les quinze dernières années, ce champ de recherches émergent met à profit les corrélations établies par les neurosciences entre l'activité cognitive et l'activité électrique du cerveau. C'est donc à partir de la problématique suivante que nous avons élaboré notre plan de travail : comment les interfaces cerveau-machine, à travers différents dispositifs techniques de visualisation du cerveau (IRMf, EEG), tracent une nouvelle topologie du *soi*, entendu ici comme un rapport du sujet avec lui-même? Notre analyse démontrera comment l'histoire de la visualisation du cerveau, de la préhistoire jusqu'à aujourd'hui, établit des rapprochements entre les représentations du cerveau et le développement des théories de l'esprit. De plus, il sera question des théories picturales et des principaux modèles de la pensée soutenus par les sciences cognitives. Enfin, notre réflexion se poursuivra à partir d'un retour sur les défis rencontrés lors de la création d'une interface ICM pour le projet *Télékinésium*.

Au terme de notre projet de recherche, nous constaterons que de nos trois axes d'analyse – une brève histoire de la visualisation du cerveau, la pensée-image, *Télékinésium* : une interface cerveau-machine – resurgit la question identitaire liée à l'ouverture de cette boîte noire qu'a longtemps été le cerveau.

Mots-clés : Interface cerveau-machine ; Théories de l'esprit ; Imagerie médicale

Abstract

Thanks to modern medical imaging, the brain-computer interface (BCI) can transform the working mind into a kinetic control tool, which has many medical and artistic applications. Thus, for the past fifteen years, this emerging field of research has studied the correlations established by neuroscience between the cognitive activity and the electrical activity of the brain. We developed our research plan by studying the following question: how does BCI define a new topology of the *self* – defined as the relationship between the subject and oneself – through various neuroimaging technologies (fMRI, EEG)? Our analysis will demonstrate how the history of neuroimaging, from prehistory to the present day, brings together representations of the brain and the development of theory of mind. In addition, we will discuss theories of pictorial representation and the main models of thought supported by cognitive science. Finally, we will reflect on the challenges encountered while creating BCI for the *Telekinesium* project.

To conclude our three-pronged analysis – a brief history of neuroimaging, the thought-image and *Telekinesium*: a BCI – fundamental questions surrounding our identity resurface, which are linked to the opening of this black box: the human brain.

Keywords: brain-computer interface, theory of mind, medical imaging

Table des matières

Résumé.....	i
Abstract.....	ii
Liste des figures.....	v
Remerciements	vii
Avant-propos	viii
Introduction.....	1
Chapitre 1 – Une brève histoire de la visualisation du cerveau.....	4
Médecine : préhistoire et protohistoire	4
Les « esprits animaux »	8
Ibn al-Haytham.....	9
Renaissance en anatomie	11
La glande pinéale : siège de l'âme.....	12
Théorie réticulaire et théorie du neurone	14
IRM, connectome.....	18
Briser la barrière de diffraction.....	19
Chapitre 2 – La pensée-image.....	22
La pensée-image : avant le 20 ^e siècle.....	22
Internalisme — externalisme.....	24
Sciences cognitives : les principaux modèles de la pensée	28
David Chalmers : le problème facile et le problème difficile.....	31
La pensée-image depuis le 20 ^e siècle	35
Chapitre 3 – <i>Télékinésium</i> : une interface cerveau-machine	42
L'émergence des interfaces cerveau-machine : un certain fantasme électrique.....	42
<i>Télékinésium</i> : les chemins de la création	46
Les étapes séquentielles d'un système ICM	51
Onde cérébrale : potentiel d'action et potentiel évoqué.....	51
Calibration et paradigmes	54
Les casques EEG.....	56

Télékinésium : configuration technique du prototype.....	58
Télékinésium : évaluation du prototype	59
Utopie et manipulation.....	61
Conclusion	64
Bibliographie	65
Annexe A.....	i

Liste des figures

Figure 1- Crâne trépané. Location : musée cantonal d'archéologie et d'histoire. 3500 AEC	5
Figure 2 - Image tirée du livre <i>Le Code de la conscience</i> , p. 4.....	6
Figure 3 - Reproduction de la page 22 du livre <i>Portraits of the Mind: Visualizing the Brain from Antiquity to the 21st century</i> . Vers 1027.....	9
Figure 4 - Couverture du traité d'Andreas Vesalius, <i>De Humani Corporis Fabrica</i> . 1543.	11
Figure 5 - Reproduction de la page 30 du livre de Carl Scoolover : <i>Portraits of the Mind: Visualizing the Brain from Antiquity to the 21st century</i> . « Glande pinéale » René Descartes, 1664.....	13
Figure 6 - Caméra lucida	15
Figure 7 - Reproduction de la page 55 du livre de Javier DeFelipe. <i>Cajal's Butterflies of the soul: science and art</i> . New York. Musée Cajal à Madrid. Santiago Ramón y Cajal. 1896	16
Figure 8 - Jean Livet. Protéines bioluminescentes (Brainbow).	17
Figure 9 - Carte mentale de Stephen Kosslyn.....	38
Figure 10 - Spirit trumpet.	49
Figure 11 - « Edison's Own Secret Spirit Experiments », <i>Modern Mechanix</i> , octobre 1933, p.34-6. ...	50
Figure 12 - Humain Brainwave. Site web (2018) http://www.chosemuse.com	53
Figure 13 - Paradigme «Oddball» dans le domaine visuel (Daltrozzo et Conway 2014).....	55
Figure 14 - Forme d'onde obtenue grâce au paradigme oddball (Mc Laughlin, et al. 2013).....	55
Figure 15 - Site web (2018) http://www.chosemuse.com	56
Figure 16 - Standard EEG international 10-20.	57
Figure 17 - L'architecture du prototype <i>Télékinésium</i> fournie par NeuroTechX.	59
Figure 18 - Cortex moteur	60
Figure 19 - Impression 3D : guide pour le travail de soudure.	i
Figure 20 - Plaques métalliques pliées et soudées.	ii
Figure 21 - Photographie sur socle mobile (rotation 360°).....	ii
Figure 22 – Modèle 3d : interface Agisof (photoscan).	iii

À mes amis et ma famille.

Remerciements

En premiers lieux, je remercie mon directeur Oliver Asselin pour la qualité de nos échanges et la rigueur de son accompagnement qui m'a permis de clarifier ma pensée et mes réflexions sur mon sujet de recherche. Il a su mener ce mémoire recherche-crédation vers des horizons théoriques et philosophiques stimulants qui s'enrichiront certainement dans le futur.

Je remercie également mes collègues et amis pour leurs précieux conseils et leur soutien. Je pense particulièrement à mon mentor de toujours, Jean-Philippe Fauteux et mes amies et relectrices, Gwenaëlle Journet (enseignante en anthropologie), Laurence Baret (conseillère clinicienne en génétique) et Myriam Laflamme (musicienne).

Finalement, je remercie la vieille garde de l'ONF de m'avoir initié au cinéma d'animation : Pierre Hébert, Michelle Cournoyer, Jacques Drouin, Co Hoedeman, Claude Cloutier, Michel Murray et tant d'autres.

Avant-propos

Mon parcours professionnel commence en 2000 lorsque je remporte le concours Cinéaste recherché(e) de l'Office national du film du Canada. Deux ans plus tôt, je perdais ma mère lors de la *crise du verglas*¹ qui secoua la vallée du Saint-Laurent en 1998. À la suggestion de ma productrice d'alors Julie Roy, j'ai approché cet épisode de ma vie à l'intérieur de mon film *Le cirque* (2010). Paradoxalement, l'effet cathartique de cette création mis court, pour un moment, à mes inspirations artistiques. Cette paralysie, empreinte de questionnements identitaires, fut par la suite examinée dans une série de courts métrages expérimentaux sur le corps humain. L'entreprise de ce mémoire de recherche-crédation trouve une partie de ses sources dans ces réflexions. Il comporte deux parties : une textuelle, traçant un bref historique de la visualisation du cerveau, des théories de l'esprit et de l'imagination, et une création, proposant une interface cerveau-machine *active* (ICMa)² où l'utilisateur manipule consciemment des objets 3D par la pensée.

Ces deux parties dialoguent entre elles de manière implicite, car si la signature électrique de l'esprit au travail peut être captée et catégorisée par l'électroencéphalographie, sa nature reste fuyante. Le taux de succès des ICA n'excédant pas les 85%, hors des laboratoires de recherche, suggère que certaines corrélations entre électricité et activité cognitive sont incomplètes ou inadéquates. En ce sens, la réalisation d'une ICM ne peut faire l'économie des connaissances issues de l'imagerie médicale moderne et des théories de l'esprit qui nous proviennent des sciences cognitives et de la philosophie. De manière plus large, nous espérons que ce dialogue entre science et philosophie enrichira les réflexions contemporaines sur l'image animée et l'interactivité.

¹ Du 5 au 10 janvier 1998, 100mm de pluie verglaçante est tombé sur le sud du Québec, de l'Est ontarien à la frontière du Nouveau-Brunswick, privant de nombreuses familles d'électricité pour plusieurs semaines. Plus de 100 000 personnes ont été évacuées.

² Les interfaces cerveaux-machines peuvent être catégorisées comme : active, réactive, passive ou hybride (voir *les étapes séquentielles d'un système ICM*, chapitre 3). Elles sont également nommées *interface neuronale directe* (IND) et en anglais, elles sont identifiées comme *brain-computer interface* (BCI) ou *brain-machine interface* (BMI).

Introduction

Les interfaces cerveau-machine (ICM), grâce à l'imagerie médicale moderne, font du cerveau le lieu d'investigation de l'esprit au travail et un outil de contrôle cinétique pour de nombreuses applications médicales et artistiques. Ainsi, depuis les quinze dernières années, ce champ de recherches émergent met à profit les corrélations établies par les neurosciences entre l'activité cognitive et l'activité électrique du cerveau. Nous avons remarqué que la littérature scientifique autour des ICM n'abordait que rarement les questions philosophiques relatives à l'esprit et que certains a priori, tel que les états mentaux y sont omniprésents. Pourtant, l'étude des principaux modèles de l'esprit remet en question ces a priori et permet d'apporter un éclairage nouveau sur ces systèmes. Pour ces raisons, il nous semble essentiel qu'une telle recherche soit entreprise. Tributaires des outils de visualisation tels que l'électroencéphalographie (EEG) et l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelles (IRM), les ICM font face à certains paradoxes tels que la délocalisation de l'activité cognitive. Nous avons donc formulé l'hypothèse que ces dispositifs humain-machine, pouvant agir sur les processus cognitifs préconscients, interrogent l'origine de nos actions conscientes. C'est donc à partir de la problématique suivante que nous avons élaboré notre plan de travail : comment les interfaces cerveau-machine, à travers différents dispositifs techniques de visualisation du cerveau (IRMf, EEG), tracent une nouvelle topologie du *soi*, entendu ici comme un rapport du sujet avec lui-même?³ Nous répondrons à cette question en privilégiant trois axes : les outils de visualisation du cerveau, les théories de l'esprit, la création d'une interface cerveau-machine nommé *Télékinésium*.

Le premier chapitre s'intéressera aux développements des outils de visualisation du cerveau dont nous pouvons retracer l'origine jusqu'à la préhistoire et la protohistoire de la médecine. Nous verrons également qu'il semble impossible de dissocier l'acte de dévoilement du corps intérieur (autopsie, représentation, etc.) du développement des théories sur l'esprit. Dans cette optique, nous traiterons de l'ancienne théorie des *esprits animaux* qui domina la réflexion sur le

³ Le terme *soi* est polysémique. Ce mémoire veut en rendre compte à travers l'investigation des axes de recherche proposés.

système nerveux pour plus de 1500 ans, du développement des microscopes et, à travers les nouvelles possibilités computationnelles permettant la simulation de système complexe, de l'étude de phénomènes émergents telle la conscience.

Dans le deuxième chapitre, il sera question des principales théories de l'esprit. Nous allons commencer par nous demander si l'esprit, ou plus précisément la pensée elle-même, est une image. Ce travail de recherche veut tracer une topologie de la pensée et de l'imagination — révélatrice des mécaniques de l'esprit et constitutive des frontières du *soi*. Avec l'arrivée de l'imagerie médicale moderne, ce vieux débat philosophique s'immisce dans le champ des sciences cognitives. Nous commencerons par tracer un portrait des théories dites picturales⁴ soutenues avant le 20^e siècle puis nous définirons les notions d'internalisme et d'externalisme, que nous associerons ensuite aux principaux modèles de l'esprit défendu par les sciences cognitives : cognitivisme, connexionnisme, esprit incarné, esprit étendu. Le caractère introspectif de l'imagerie mentale mène naturellement vers la question de la conscience que nous visiterons à travers sa catégorisation par le philosophe de l'esprit David Chalmers (Chalmers, 20th Anniversary Conference. *Toward a Science of Consciousness* 2014). Pour conclure, et en me laissant guider par le travail liminaire du philosophe britannique Michael Tye dans *The Imagery Debate* (Tye 1991), nous verrons quels modèles théoriques, relatifs à l'imagerie mentale, ont émergé depuis le 20^e siècle. L'étude de cette question est éminemment paradigmatique et soulève plusieurs questions. À travers ce voyage, nous en explorerons quelques aspects dont : l'imprécision ou l'indétermination des images mentales et le problème des boucles infinies de l'œil qui se regarde lui-même.

En dernier lieu, l'examen des modalités de création d'une interface cerveau-machine veut faire la somme, de manière théorique et pratique, de deux aspects traités antérieurement dans ce mémoire soit : les outils de visualisation du cerveau et les théories sur la pensée et l'imagination. Pour ce faire, nous nous appuierons, d'une part, sur un riche recueil d'articles scientifiques dirigé par les chercheurs Chang S. Nam, Anton Nijholt et Fabien Lotte (*Brain-Computer Interfaces Handbook : Technological and Theoretical Advances*, 2017) et d'une autre, sur le

⁴ Traduction de l'anglais *picture theory*

développement d'une œuvre interactive à interface cerveau-machine nommée *Télékinésium*. Cette dernière propose une expérience de télékinésie où, par l'entremise d'une commande mentale, des objets sont manipulés par la pensée. L'arrivée de ces interfaces permet à l'humain, pour la première fois de son histoire, de contrôler son environnement directement par son système nerveux central, sans passer par son système périphérique. Aujourd'hui, une série d'applications ont vu le jour et permettent un contrôle cinétique : membres robotisés, fauteuils roulants, outils de diction, jeux vidéo, installations, création musicale et cinématique, etc. J'avancerai que ce couplage humain-machine, où l'interface est reine, réactualise également les questions ontologiques du *soi*. Après une courte introduction historique, nous allons, en premier lieu, examiner les principaux protocoles liés aux paradigmes ICM et, en second lieu, identifier et parcourir les étapes séquentielles de ce système. Pour conclure, nous évaluerons les enjeux rencontrés lors de la réalisation de l'interface cerveau-machine développé pour *Télékinésium*.

Chapitre 1 – Une brève histoire de la visualisation du cerveau

Une brève histoire de la visualisation du cerveau, de la préhistoire jusqu'à aujourd'hui, révèle d'étonnantes corrélations entre les représentations du cerveau et le développement des théories de l'esprit. Nous évaluerons l'influence des anatomistes, philosophes et neuroscientifiques Galien de Pergame, René Descartes et Santiago Ramón y Cajal.

Médecine : préhistoire et protohistoire

Nous pouvons probablement retracer l'origine des premières représentations de l'intérieur du corps humain jusqu'à la préhistoire et la protohistoire de la médecine. C'est peut-être à l'époque géologique du Pléistocène — lorsque l'homme décide d'enterrer ses morts et ainsi limite, de façon consciente ou non, la propagation de certaines maladies — que l'acte médical est né et qu'un discours sur « soi-même, comme un autre », commence à se formuler (Ricoeur 1990).

Relativement au discours médical, Michel Foucault, dans *La Naissance de la clinique* (1963), s'interroge sur la distribution originare du visible et de l'invisible à travers l'émergence de la médecine moderne qu'il fixe vers les dernières années du 18^e siècle.

« Il faudra questionner la distribution originare du visible et de l'invisible dans la mesure où elle est liée au partage de ce qui s'énonce et de ce qui est tu : alors apparaîtra, en une figure unique, l'articulation du langage médical et de son objet » (Foucault, p. vii).

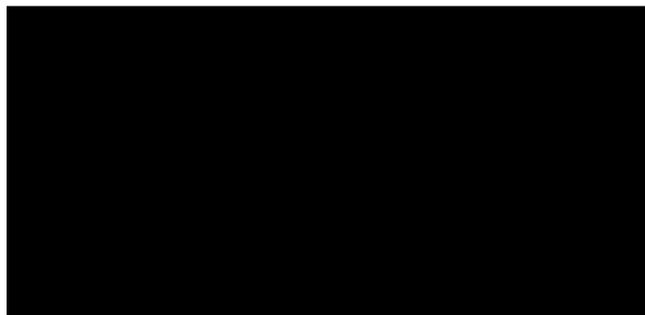
En ce sens, nous pouvons dire que l'art rupestre et l'acte de sépulture sont déjà un discours sur le *soi*.

Après cette mise en contexte, retraçons les grandes lignes historiques des représentations du corps interne et plus spécifiquement du cerveau. Aujourd'hui, les anthropologues s'accordent pour dire que c'est à l'*Homo heidelbergensis*, ayant vécu en Afrique, en Europe et en Asie occidentale

entre 700 000 et 300 000 ans, que nous attribuons les premières sépultures. C'est pourtant, comme le souligne le paléanthropologue Bruno Maureille, à l'homo sapiens que l'on doit, de façon incontestable, les plus anciennes tombes connues à ce jour (datées à environ 100 000 ans) (Maureille 2004). La plus vieille se trouve dans la grotte de Skhül en Israël et met à jour les squelettes de trois enfants et de sept adultes recroquevillés dans des fosses peu profondes surmontées d'une mandibule de sanglier. Nous serions tentés de dire que ces sépultures, en suggérant un acte limitant la propagation de certaines maladies, attestent d'une activité médicale. De la même manière, l'analyse des ossements permettant de diagnostiquer certaines maladies et syndromes indique que certains individus atteints de paralysie étaient complètement dépendants des autres pour leur survie (Oxenham, et al. 2009). Malgré ces conjectures, comme le souligne Jacques Cayotte — dans son livre *La Médecine au temps préhistorique* :

« Si l'on possède de nombreux témoignages sur les maladies ayant sévi à l'époque préhistorique, il est plus difficile d'entrevoir les traces d'une quelconque activité médicale, car le fait qu'il existait des maladies et des malades n'implique nullement qu'il y ait eu des *médecins* » (Cayotte, p. 296).

Du même souffle, Cayotte (Cayotte 1976) défend la thèse qu'il y a bien eu des hommes (médecins, chamans ou sorciers) qui soignaient leurs semblables grâce à leurs connaissances anatomiques. Il donne l'exemple des crânes trépanés (figure 1) que les archéologues ont exhumés sur plusieurs sites partout sur la planète et dont les plus anciennes traces remontent à la fin du Néolithique.



**Figure 1- Crâne trépané. Location : musée cantonal d'archéologie et d'histoire.
3500 AEC .**

Il souligne qu'à l'intérieur de la grotte des Trois-Frères⁵, « (...) dans la vallée de l'Ariège, existe la représentation d'un homme qu'on doit tenir pour l'ancêtre d'une longue lignée de médecins : il trépanait les crânes pour en faire sortir la maladie » (Cayotte 1976, p. 296). Il est intéressant de noter que ces premières opérations exigeaient une connaissance anatomique, au moins sommaire, du crâne et de son contenu. C'est peut-être à cette époque que germent les premières théories sur le pouvoir divinatoire et la vertu de certains viscères, comme si le corps intérieur, une fois révélé, était nécessairement porteur de sens. Comme le souligne le psychologue cognitiviste et neuroscientifique français Stanislas Dehaene, en introduction de son livre *Le Code de la conscience*, la caverne a peut-être été le lieu d'émergence des premières réflexions sur l'esprit (Dehaene 2014). Il donne l'exemple d'une peinture rupestre, située dans la célèbre grotte de Lascaux, montrant un homme en érection, étendu sur le dos, les bras écartés et les paumes tournées vers le haut. Près de lui, un oiseau est perché sur un bâton et, plus loin, une lance brisée vient d'éventrer un énorme bison dont les intestins se répandent (figure 2).

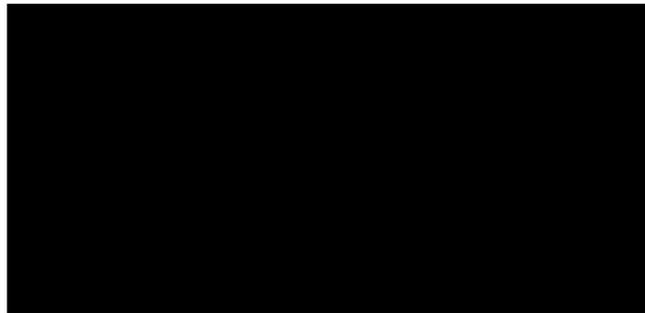


Figure 2 - Image tirée du livre *Le Code de la conscience*, p. 4

Le spécialiste français du sommeil, Michel Jouvet, lève en partie le voile sur la signification de cette image en spécifiant que l'érection accompagne systématiquement le *sommeil paradoxal*. De ce fait, pour Dehaene, « l'oiseau serait la métaphore naturelle de l'âme du rêveur qui

⁵ La grotte des Trois-Frères fait partie des trois Cavernes du Volp, qui forment un ensemble archéologique unique. Avec plus de 1300 gravures et peintures, elle représente à elle seule plus de la moitié du corpus pariétal des Pyrénées ariégeoises. Présentation de l'éditeur (Bégouën, et al. 2014).

s'échappe en songe et s'envole vers des temps et des lieux lointains, aussi libre qu'une hirondelle. » (Dehaene 2014, p. 7). Cette association archétypale du sommeil, de l'oiseau, de l'âme et de l'érection se révèle présente dans l'art et le symbolisme des cultures les plus diverses. « Dans l'Égypte ancienne, un oiseau à tête humaine, souvent pourvu d'un étrange phallus en érection, symbolisait le *ba*, l'âme immatérielle. Chaque personne abritait un *ba* immortel qui prenait son envol après la mort » (Dehaene 2014, p. 8).

Ces exemples suggèrent que l'introspection des phénomènes de l'esprit, telle que le sommeil paradoxal, est constitutive d'une conception étendue de *soi* (voir la pensée distribuée, chapitre 2).

L'arrivée de l'écriture atteste également des premières réflexions sur l'esprit. Les plus anciens textes « médicaux » connus remontent au III^e millénaire et sont attribués aux Sumériens. Le texte majeur de cette époque est le *Code de Hammourabi*, datant de 1750 AEC. Pour cette civilisation, qui a fait naître l'écriture cunéiforme, la médecine devait obéir à deux principes : l'exorcisme avec les *âshipou* — où l'on intervenait que lorsque la cause du mal semblait surnaturelle — et la médecine « physique » avec les *asoû*. Pour les Sumériens, la médecine était d'abord religieuse, puisqu'elle avait pour but de relier le corps physique et le corps spirituel pour reconstituer l'homme dans sa globalité unitaire (Biggs 2005). Malgré l'importance avérée de ces textes, c'est à l'Égypte ancienne que l'on doit les premières descriptions anatomiques médicales — sous la forme de papyrus (papyrus Edwin Smith et Ebers - 1550 AEC) — et les premières représentations graphiques du corps interne (Ziskind et Halioua 2004).

À la lumière de ces informations, l'art de soigner semble avoir existé dans toutes les sociétés et c'est peut-être dans le contexte intérieur de la caverne qu'émergent les premières représentations du corps intérieur (peintures rupestres, pétroglyphes) et les premières réflexions sur l'esprit. Malgré tout, il est important de noter que l'absence de preuves n'est pas preuve d'absence. Après les gestes précis des peintres du Paléolithique et des premiers embaumeurs égyptiens viendra la précision scientifique de la balance et des schémas des médecins d'Alexandrie.

Les « esprits animaux »

« Les esprits animaux! Que peut signifier cette expression singulière? Il ne s'agit pas ici de ce que l'on pourrait appeler l'esprit animal, ou l'esprit de l'animal, ou encore l'instinct. Comme nous le dirons plus au long, nous n'avons pas affaire à une force quelconque de l'âme, à une puissance ou une qualité abstraite; mais bien à un bataillon de petits êtres, très ténus, très subtils, toujours en mouvement, constituant la vie animale. » (Goffart 1900, p. 153).

Les premières représentations du cerveau sont intimement liées à l'ancienne théorie des *esprits animaux*. D'abord proposée par les médecins d'Alexandrie au troisième siècle avant notre ère, puis popularisée par le grand anatomiste romain, Galien de Pergame (v. 129-216), elle domina la réflexion sur le système nerveux pour plus de 1500 ans. Sur le continent européen, la médecine du Moyen-âge, limitée par un interdit religieux sur l'autopsie humaine, devra s'en remettre à l'étude des dessins de Galien. Ceux-ci, perdus lors d'un incendie, seront remédiés par les yeux et l'esprit de ses disciples et serviront de base à la connaissance anatomique (européenne) pour plus de mille ans. Pour plusieurs siècles, l'étude de l'anatomie du cerveau fut limitée à la copie de ces dessins et fit perdurer plusieurs théories erronées.

Comme le souligne l'historien des neurosciences Stanley Finger (Finger 1994), l'une des croyances les plus importantes de Galien était que les esprits vitaux, produits dans le ventricule gauche du cœur, étaient transportés vers le cerveau par les artères carotides. Ils étaient ensuite transformés en esprits supérieurs, les *esprits animaux*, dans le *rete mirabile* (« réseau merveilleux » ou « wonderful net » en anglais), un plexus vasculaire à la base du cerveau ou dans les ventricules eux-mêmes. Dans *De usu partium*, Galien écrit:

«The plexus called retiform by anatomists is the most wonderful of the bodies located in this region. It circles the gland (pituitary) itself and (...) it is not a simple network but (looks) as if you had taken several fishermen's nets and superimposed them (...) [Y]ou could not compare this network to any man-made nets, nor has it been formed from any material. Nature appropriated the material for this wonderful network ... (Galen 1968, traduction, p.430)».

Une fois sollicités, les *esprits animaux*, stockés dans les ventricules jusqu'à leur utilisation, passaient à travers les nerfs creux pour forcer les muscles à agir ou pour transmettre les

sensations. Galien a maintenu que, bien que les *esprits animaux* formaient « l'instrument de l'âme », le siège de celle-ci et de l'intellect se devaient d'être le cerveau lui-même.

Pour le philosophe Goffart, les *esprits animaux* sont des êtres imaginaires, créés par les anciens pour expliquer des phénomènes dont ils ignoraient les causes.

« Aux corps qu'on voyait se volatiliser très vite, on attribuait beaucoup d'esprits ; ceux, au contraire, qui présentaient une plus grande fixité avaient peu d'esprits ou des esprits très faibles » (Goffart 1900, p. 157).

Cette théorie, qui supposait quatre humeurs (le sang, le flegme et la bile jaune et noire), fut popularisée par Hippocrate et sera plus tard développée, entre autres, par François Bacon, René Descartes et Thomas d'Aquin. Bien que cette théorie perdurera jusqu'au siècle des Lumières, en amont, le travail de Ibn al-Haytham (965-1040)⁶, schématisant l'esprit au travail, amenuisait déjà le vitalisme du bataillon des *esprits animaux*.

Ibn al-Haytham

On doit à ce mathématicien, philosophe et physicien d'origine perse, la plus ancienne représentation connue du système nerveux (figure 3).

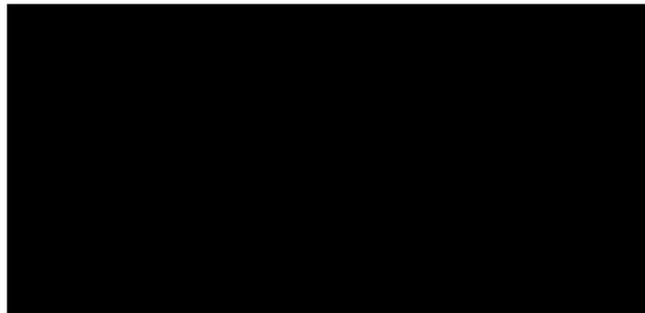


Figure 3 - Reproduction de la page 22 du livre *Portraits of the Mind: Visualizing the Brain from Antiquity to the 21st century*. Vers 1027.

⁶ <https://www.britannica.com/biography/Ibn-al-Haytham>

Ce dessin, réalisé au début du premier millénaire, est partiellement fondé sur l'enseignement de Galien de Pergame, mort huit siècles avant lui. Comme le mentionne Carl Schoonover — dans son livre *Portraits of the Mind* — ce diagramme expose l'hypothèse, aujourd'hui triviale, que, dans le cerveau, l'information circule :

« The oldest known depiction of the nervous system seems reassuringly well ordered: a large nose at the bottom, eyes on either side, and, owing out of each eye, a hollow optic nerve that meets the other for a moment before parting ways and continuing on to the brain (...) From here we go on to formulate the more exciting—and more explicit—hypothesis: At each stop in its path, signals from the world outside are somehow processed, interpreted, or put to use » (Scoonover 2010, p. 19).

Ibn al-Haytham, souvent décrit comme le premier véritable scientifique, écrit plusieurs ouvrages sur la physique optique, dont le *Traité d'optique*⁷, classé, aux côtés du *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* d'Isaac Newton, comme l'un des livres les plus importants de l'histoire de la physique (Salih, Al-Amri et El Gomati 2005).

Il a introduit ce que l'on nomme aujourd'hui la *méthode scientifique expérimentale*⁸. On lui doit plusieurs explications sur le pouvoir grossissant des lentilles. Cette physique expérimentale sera déterminante pour le développement de technologies telles que le microscope, l'IRM et la génétique (CRISPR)⁹. Au début du dernier millénaire, l'élargissement des itinéraires commerciaux européens permet la circulation de ces nouvelles connaissances. Les répressions sur les autopsies humaines sont progressivement levées par l'Église catholique et les travaux d'Ibn al-Haytham sont confrontés aux nouvelles observations anatomiques de la Renaissance. Nous pourrions penser qu'une fois le corps ouvert, notre regard devient objectif, mais, comme le souligne Foucault, il s'agirait plutôt d'un changement de paradigme lié à « l'espace discursif du cadavre »:

⁷ La version latine du *Traité d'optique* d'Ibn al-Haytham a été traduite en anglais, en deux volumes, par A. Mark Smith Alhazen (Alhazen 2001).

⁸ Les méthodes expérimentales scientifiques consistent à tester la validité d'une hypothèse, en reproduisant un phénomène et en faisant varier un paramètre.

⁹ CRISPR désigne un ensemble de molécules qui permettent de modifier l'ADN de plantes et d'animaux avec une grande précision. (<https://www.futura-sciences.com/sante/definitions/genetique-crispr-14962/>)

« Ce qui était fondamentalement invisible s’offre soudain à la clarté du regard, dans un mouvement d’apparence si simple, si immédiate qu’il semble la récompense naturelle d’une expérience mieux faite. On a l’impression que, pour la première fois depuis des millénaires, les médecins, libres enfin de théories et de chimères, ont consenti à aborder pour lui-même et dans la pureté d’un regard non prévenu l’objet de leur expérience. Mais il faut retourner l’analyse : ce sont les formes de visibilité qui ont changé (...) Et ce dévoilement impliquait à son tour comme champ d’origine et de manifestation de la vérité l’espace discursif du cadavre : l’intérieur dévoilé » (Foucault 1963, conclusion).

Renaissance en anatomie

Après un millénaire de dogme galéniste, le traité d’Andreas Vesalius sur la structure du corps humain, *De Humani Corporis Fabrica* (figure 4), fait entrer l’anatomie dans la modernité.

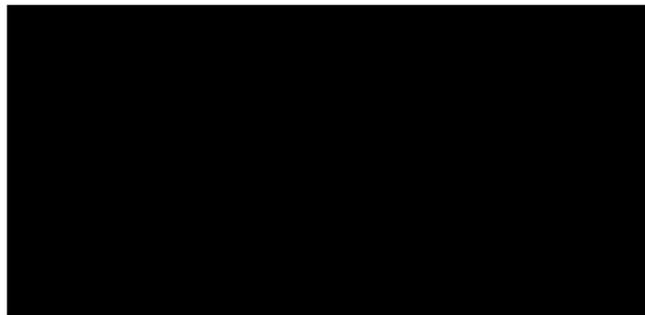


Figure 4 - Couverture du traité d’Andreas Vesalius, *De Humani Corporis Fabrica*. 1543.

Malgré la levée des interdits stricts sur les autopsies, avant lui aucune étude n’avait été entreprise pour actualiser les travaux de Galien. Après avoir obtenu, en 1539, du juge Mercantonio le droit d’opérer des dissections sur des cadavres de condamnés, il constate de nombreuses erreurs dans les descriptions de Galien. La prohibition avait forcé Galien à transposer directement des découvertes anatomiques issues de dissections effectuées sur des singes magots sur l’anatomie

humaine. La découverte de ces erreurs par Vesalius allait permettre de réfuter la théorie, toujours populaire, des *esprits animaux*. Comme nous l'avons vu, pour Galien, les *esprits animaux* étaient situés dans le *rete mirabile*, un réseau de vaisseaux sanguins situés à la base du cerveau, présent chez le bœuf et le porc, mais inexistant chez l'homme... (Scoonover 2010).

La glande pinéale : siège de l'âme

Une version radicalement différente de la théorie des *esprits animaux* sera développée par le mathématicien, physicien et philosophe français René Descartes. Avant lui, plusieurs physiciens des 16^e et 15^e siècles avaient remis cette théorie à l'honneur. Elle fut également développée, entre autres, à la croisée des chemins entre Renaissance et modernité, par le philosophe anglais Francis Bacon. Pour ce dernier, tous les *esprits animaux* sont d'une seule et même substance matérielle.

« À les considérer dans leur constitution matérielle, les esprits animaux ne pourraient guère être séparés des esprits vitaux, si ce n'est que les esprits animaux ont un siège particulier, qui est le cerveau, et exercent des fonctions spéciales : ils impriment le mouvement, reçoivent les impressions du dehors, etc. » (Goffart 1900, p. 160).

Descartes propose une version radicalement différente où le corps vivant est composé de deux substances : l'une animée et l'autre inanimée.

« L'homme lui-même apparaît comme un composé d'un corps-machine et d'une âme-conscience. Toutes les fonctions du corps se font automatiquement ; l'âme reléguée dans la *glande pinéale* est en communication avec les organes au moyen des esprits animaux, qui lui fournit l'occasion de percevoir les diverses sensations. » (Descartes, *De Homine*, cité par Goffart 1900, p. 163). (figure 5)

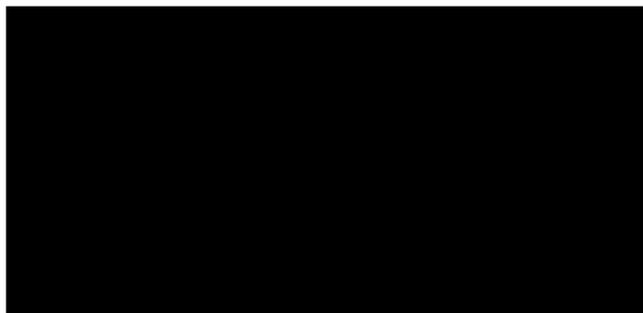


Figure 5 - Reproduction de la page 30 du livre de Carl Scoolover : *Portraits of the Mind: Visualizing the Brain from Antiquity to the 21st century*. « Glande pinéale » René Descartes, 1664.

Descartes se différencie de Bacon dans la mesure où il ne considère plus les *esprits animaux* comme de simples agents autonomes de la mécanique du corps, mais comme des médiateurs d'une âme immatérielle influant sur le corps (dualisme cartésien). Inspiré par les statues animées (par des systèmes hydrauliques) du palais de Saint-Germain, il se penche sur le problème de *l'esprit* et se demande comment il met le corps en mouvement.

« Dans les fontaines qui ornent les parcs de nos rois, l'eau met en mouvement diverses machines, par la seule force qu'elle possède en jaillissant de sa source » (Descartes, *De Homine*, cité par Goffart 1900, p. 166).

Il établit ainsi des parallèles entre les nerfs du corps et les tuyaux des fontaines de Saint-Germain, les *esprits animaux* et le pouvoir mécanique de l'eau. La contraction des muscles est ainsi associée aux nombres d'esprits présents à l'intérieur de ceux-ci. L'âme située au centre du cerveau (la glande pinéale) et physiquement au centre d'un vaste réseau de canaux (l'aqueduc de Sylvius) contrôle le corps humain considéré comme une machine. Selon Foucault, cette mécanique de l'invisible confond vision et perception:

« Pour Descartes et Malebranche, voir, c'était percevoir (et jusque sous les espèces les plus concrètes de l'expérience : pratique de l'anatomie chez

Descartes, observations microscopiques chez Malebranche); mais il s'agissait, sans dépouiller la perception de son corps sensible, de la rendre transparente pour l'exercice de l'esprit : la lumière, antérieure à tout regard, était l'élément de l'idéalité, l'inassignable lieu d'origine où les choses étaient adéquates à leur essence et la forme selon laquelle elles la rejoignaient à travers la géométrie des corps ; parvenu à sa perfection, l'acte de voir se résorbait dans la figure sans courbe ni durée de la lumière » (Foucault, p. xvii).

Ainsi, il est possible de dire que, pour Descartes, l'acte de voir (percevoir, avoir conscience d'une sensation) est soumis à des formes a priori platoniciennes. Cette posture rationaliste implique que l'expérience issue de nos sens ne peut produire de connaissance véritable. En ce sens, l'allégorie de la caverne, proposée par Platon, dénonce le caractère fluctuant et relatif de la perception, et la première *Méditation* de Descartes y expose son caractère trompeur :

« Tout ce que j'ai reçu jusqu'à présent pour le plus vrai et assuré, je l'ai appris des sens ou par les sens : or j'ai quelquefois éprouvé que ces sens étaient trompeurs, et il est de la prudence de ne se fier jamais entièrement à ceux qui nous ont une fois trompés. » (Descartes, *Méditation métaphysique*, édition électronique, p.18)

C'est précisément cette conception rationnelle du regard qui semble changer à la fin du 19^e siècle pour faire place aux données empiriques de l'expérience comme source première de la connaissance.

Théorie réticulaire et théorie du neurone

« A good drawing, like a good microscope preparation, is a fragment of reality, a scientific documents that indefinitely maintain their value and whose study will always be useful, whatever interpretation they might inspire » (Cajal 1909-11 (1904), cité par DeFelipe, p. xiv).

Comme le mentionne DeFelipe dans son livre *Cajal's Butterflies of the Soul: Science and Art*, au 19^e siècle, « les scientifiques étudiant les mondes microscopiques du système nerveux devaient être de vrais artistes afin de communiquer leurs observations. » (DeFelipe, xiii). La microphotographie n'étant pas encore bien développée, la plupart des scientifiques devaient passer par le dessin pour documenter et présenter leurs résultats. Pour Santiago Ramón

y Cajal, père de la neurologie moderne, et certains de ses collègues, cette condition leur fournissait un prétexte pour exprimer et développer leurs talents artistiques. D'un point de vue strictement scientifique, l'échange d'information n'était pas des plus simples. Il pouvait être ardu de faire la part des choses entre interprétation artistique et transcription exacte des préparations histologiques. De plus, devant la piètre qualité des optiques de l'époque, les scientifiques devaient discerner entre les éléments réels et les artefacts liés à l'appareil¹⁰. En général, les dessins étaient réalisés à la main levée sur différents types de papier ou de carton à l'aide d'un dispositif de type *camera lucida*¹¹ permettant à l'observateur de tracer l'image vue à travers le microscope et directement projetée sur une table à dessin. L'observateur pouvait ainsi voir le papier et la préparation histologique en même temps (figure 6).

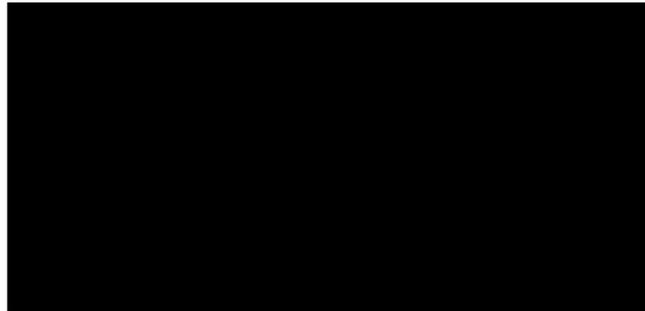


Figure 6 - Caméra lucida

En neurologie, le développement de techniques d'observation peut se décrire en trois périodes distinctes : la période dite *bénédictine*, la période *noire* et la période *couleur*. La *période bénédicte* commence avec le développement des premiers microscopes. Ceux-ci ont permis

¹⁰ Dans ce contexte, il faut voir ces artefacts, rencontrés lors de l'observation du système nerveux, comme des anomalies liées à la mauvaise qualité des optiques. Il s'agit de phénomènes artificiels ou accidentels.

¹¹ Ce dispositif optique, aussi appelé chambre claire (*camera lucida*), est breveté en 1806 par William Hyde Wollaston.

de décrire des éléments tels que les *glandes* corticales découvertes par Marcello Malpighi (1628-1694) et les *globules* identifiés par Antonio Van Leeuwenhoek (1632-1723). Ces observations ont également mené à des théories réductionnistes comme la théorie du globule qui considère que tous les tissus des animaux sont composés de minuscules globules. Malgré ces découvertes, l'analyse détaillée du système nerveux attendra la *période noire* (*Reazione negra*) qui débute avec le 19^e siècle. C'est en 1873 que Camillo Golgi fait la découverte d'un nouveau procédé chimique (la méthode Golgi) qui dévoile certaines structures cérébrales invisibles jusqu'à présent (figure 7).



Figure 7 - Reproduction de la page 55 du livre de Javier DeFelipe. *Cajal's Butterflies of the soul: science and art*. New York. Musée Cajal à Madrid. Santiago Ramón y Cajal. 1896

Suite à ce procédé, certaines structures neuronales apparaissaient en noir, sous l'optique des microscopes. C'est cette méthode tombée dans l'oubli pour plusieurs années qui, une fois réactualisée, mènera à la théorie du neurone établie par Santiago Ramón y Cajal s'opposant à la théorie réticulaire de Camillo Golgi¹².

« As opposed to the reticular theory, the theory that cellular processes could develop free arborizations seems not only the most likely, but also the most encouraging. A continuous pre-established net – like a lattice of telegraphic

¹² Définition de réticulaire : qui forme un réseau. En opposition à la théorie du neurone qui propose des unités discrètes (neurones) interconnectées.

wires in which no new stations or new lines can be created – somehow rigid, immutable, incapable of being modified, goes against the concept that holds of the organ of thought, which within certain limits, is malleable and capable of being perfected by means of well-directed mental gymnastic. » (Cajal 1909-11 (1904), cité par DeFelipe 2010, p. 9).

Malgré cette polémique, ces deux scientifiques recevront conjointement le prix Nobel de médecine en 1906. Par la suite, la période *couleur*, qui dans un premier temps se développe autour de la méthode *Golgi* (Finger 1994, p. 45, Finger 1994), permettra de distinguer différents types de neurones avec l'aide de la polychromie. De cette manière, la découverte de protéines responsables de la bioluminescence de la méduse amorcera une nouvelle révolution en imagerie médicale. C'est en 1990 que le chercheur Douglas Praher arrive à déterminer la séquence d'ADN codant cette bioluminescence (GFP) (Douglas C., et al. 1987). Lorsque le gène a muté, un processus se met en route : l'ADN fabrique l'ARN (expression du génome) et l'ARN produit la protéine qui, en s'exprimant, devient bioluminescente. Depuis, le neurologue Jean Livet (avec son équipe) a découvert une multitude de protéines bioluminescentes auxquelles il a donné le nom évocateur de *Brainbow* (Livet, et al. 2007) (figure 8).

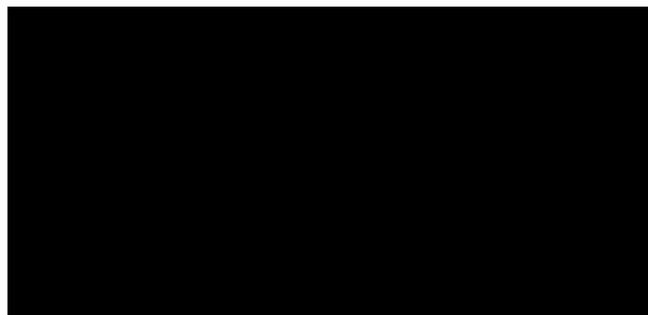


Figure 8 - Jean Livet. Protéines bioluminescentes (Brainbow).

Ces molécules d'ADN modifiés codent ensuite automatiquement des protéines fluorescentes, rouges, bleues et vertes, qui une fois reliées entre elles, permettent une combinaison infinie de couleurs (RGB). Bien que cette technique de coloration soit aléatoire et ne permet pas d'associer une couleur spécifique à un type de neurone en particulier, elle permet une différenciation générale de ceux-ci. Ainsi, ce nouvel outil de visualisation change notre compréhension de la communication neuronale et donc le discours de la médecine sur la pensée au travail.

IRM, connectome

L'imagerie par résonance magnétique (IRM)¹³ est un outil aujourd'hui très répandu en recherche expérimentale comme en clinique. Bien qu'elle n'offre pas la même résolution que le microscope, elle a l'avantage d'être non invasive et sans danger. L'appareil IRM est essentiellement un gigantesque aimant. Le sujet est placé à l'intérieur d'un champ magnétique qui aligne, à la manière d'un compas, les protons d'hydrogène présents à l'intérieur des molécules d'eau du corps. Le mécanisme émet ensuite de courtes impulsions d'ondes radio qui perturbent momentanément l'alignement des protons. La vitesse de retour (à leur position d'origine) est ensuite calculée, ce qui permet d'identifier, indirectement, les différentes composantes du cerveau (axone, dendrite, etc.). Ce dispositif tire profit des différentes propriétés magnétiques du fer contenu dans l'hémoglobine du sang. Malgré la différence de résolution temporelle entre le changement sanguin, se calculant en secondes, et l'activité neuronale, qui se mesure en millisecondes, nous arrivons aujourd'hui — par calcul différentiel (changement du niveau sanguin) — à visualiser les chemins de la pensée en direct. Aujourd'hui, l'IRM par diffusion, couplée à la modélisation 3D des connexions neuronales, permet le développement de techniques de *tractographie*, qui représentent non pas des objets, mais les trajets de l'information cérébrale.

Tout comme la génomique, qui a permis de dresser la liste complète des gènes de l'homme, la *connectomique* cherche à compiler tous les diagrammes et circuits du système nerveux du

¹³ Les informations sur le fonctionnement de l'IRM proviennent du livre : *Le cerveau de cristal* de Denis Le Bihan.

cerveau humain. Malgré d'importantes lacunes dans notre compréhension fondamentale du cerveau, des consortiums de premier plan tels que le *Human Brain Project*¹⁴, soutenu par la Commission européenne à la hauteur de 1,5 milliard d'euros, s'engagent dans cette voie. Le pouvoir computationnel de simulation, essentiel au projet, stimule ainsi le développement de nouveaux super-ordinateurs « neuro-morphiques » utilisant moins d'énergie et offrant ultimement plus de stabilité. Imitant certaines structures du cerveau, imprimé directement sur le matériel informatique (en silicone), le *Human Brain Project* laisse entrevoir un avenir où ce réseau, à la manière du cerveau humain, pourra s'autoconfigurer et se passer de la mise à jour (humaine) de programmes opérationnels (logiciels).

Comme l'a souligné le théoricien Mel Bartlett, « In the brain the model is the goal » (Bartlett 2000). En science, le modèle est effectivement précieux, car il permet de réduire une quantité ingérable d'informations à un ensemble simplifié de principes qui capte l'essence du système et qui permet de donner un aperçu de la façon dont il se comporte. Pour Bartlett, une vraie compréhension du cerveau implique que nous soyons capables d'en produire une réplique sur un médium (en silicone) qui puisse incorporer les mêmes principes opérationnels (ADN, ARN, etc.). Dans les dernières années, ces expériences de simulation poussent les scientifiques, de diverses disciplines, vers de nouvelles collaborations pour trouver des moyens de rendre intelligibles les données (titanesques) enregistrées lors de ces simulations. Malgré ce changement de paradigme entre recherche empirique et recherche computationnelle, celui-ci ne nous permet pas de faire l'économie des systèmes de visualisations. Ceux-ci, révélant de nouvelles structures par l'image, participent pleinement à la construction de nouvelles connaissances.

Briser la barrière de diffraction

Le système nerveux (la structure connue la plus complexe de l'univers) est sans doute le principal défi des nouvelles technologies d'imagerie médicale. Comme le souligne Bernard

¹⁴ Le *Human Brain Project* est un projet scientifique visant, d'ici 2024, à simuler le fonctionnement du cerveau humain. <https://www.humanbrainproject.eu/>

Doyon, directeur de recherche à l'INSERM (Institut National de la Santé et de la Recherche médicale) à Toulouse : « Avec un million de milliards de points de connexions (synapses), le cerveau humain se présente comme un ensemble de possibilités défiant l'imagination ». Ainsi, nos capacités techniques à visualiser ces structures nanométriques font face à un problème fondamental lié à la physique des ondes : *la barrière de diffraction*. Formulée en 1874 par le physicien allemand Ernst Karl Abbe, la notion fondamentale de barrière de diffraction définit la plus petite résolution d'un objet par la distance entre deux longueurs d'onde du photon. Tout objet inférieur à cette courbe restera invisible à l'œil humain. Pourtant, depuis le début du 20^e siècle plusieurs stratégies de contournement se sont rapidement développées. C'est vers la fin du 20^e et début 21^e siècle, que la microscopie devient *super-résolue*¹⁵ ce qui permet ensuite d'observer des objets compris dans des dimensions de sub-longueur¹⁶ d'onde. Le *microscope électronique* est un bon exemple de contournement de la barrière de diffraction de la lumière. En abandonnant la lumière (photonique) pour les faisceaux d'électrons, les images produites sont d'une résolution mille fois plus précise. Cette amélioration est due à la longueur d'onde de l'électron, beaucoup plus petite que celle de la lumière.

Pour conclure ce bref retour historique sur l'imagerie médicale du cerveau, nous avons vu que les premières réflexions identitaires sur le *soi* émergent dans un premier temps des premières sépultures de la préhistoire, des actes de trépanation et de l'évocation du sommeil paradoxal dans l'art pariétal. Ainsi, les peintures rupestres, en représentant de manière symbolique l'esprit qui prend son envol, abordent pour la première fois la question de la localisation de l'esprit. En ce sens, cette dissociation du corps éveillé et du corps rêvé peut être vue comme une forme embryonnaire de la pensée dualiste. Ainsi, nous pouvons dire que l'acte de sépulture, vu comme un rituel de passage, participe à la résolution d'une certaine angoisse existentielle liée à la finitude du corps physique par le corps rêvé qui, de par sa logique propre,

¹⁵ Ces méthodes d'imagerie pointillistes permettent d'imager des structures plus petites que la limite de diffraction (200-300 nm). Elles utilisent les propriétés de clignotement (blinking), de changement de longueur d'onde d'émission (switching) ou de photo-activation de molécules fluorescentes. (Imagerie super-résolue s.d.)

¹⁶ Sub-longueur d'onde optique est l'étude de la lumière sur une échelle spatiale plus petite que sa longueur d'onde. Conventionnellement, la longueur minimum de l'échelle sur laquelle un faisceau de lumière peut fonctionner est égale à la moitié de sa longueur d'onde. Cependant, par le couplage de la lumière à la matière, la photonique, les effets peuvent être réalisés sur une beaucoup plus petite échelle spatiale. (Sub-longueur d'onde optique s.d.)

poursuit son chemin par delà la mort. Nous avons également vu que cette vision dualiste est présente dans les premiers textes sumériens où l'acte médical se doit d'obéir à deux principes : l'exorcisme avec les *âshipou* — où l'on devait intervenir lorsque la cause du mal semblait surnaturelle — et la médecine « physique » avec les *asoû*.

Dans un deuxième temps, nous avons remarqué que le développement des connaissances anatomiques, bien que retardé par les interdits religieux du Moyen Âge, a permis, sur la base de la théorie des *esprits animaux* proposée par les médecins d'Alexandrie, le développement d'une mécanique de l'esprit où les organes du corps (réseaux sanguins et glandes) jouent un rôle central. Que ce soit à travers le *rete mirabile* de l'anatomiste romain Galien de Pergame ou la *glande pinéale* de Descartes, ces *esprits animaux*, selon leur modalité propre, contribuent aux mouvements du corps. Nous pouvons également voir l'arrivée de la neurologie, rendue possible par les développements du microscope, comme la suite logique de cette pensée mécaniste.

Finalement, après avoir réalisé que ces dispositifs de visualisation microscopique sont ultimement limités par la nature duale de la matière, le modèle probabiliste s'impose à toute production nouvelle de connaissance. Ainsi, de ce désir de visualisation du cerveau, un processus profondément identitaire est enclenché et semble évoquer en filigrane une classe toute particulière de pensée : la *pensée-image*. Cette idée n'est pas nouvelle et engage un débat animé depuis l'Antiquité.

Chapitre 2 – La pensée-image

Guidé par le travail liminaire du philosophe britannique Michael Tye, *The Imagery Debate*, nous commencerons par tracer un portrait des théories picturales (*picture theory*) de l'esprit puis nous définirons les notions d'internalisme et d'externalisme et les principaux modèles défendus par les sciences cognitives : cognitivisme, connexionnisme, esprit incarné, esprit étendu. La question de la conscience sera également abordée à travers sa catégorisation par le philosophe de l'esprit David Chalmers. Nous explorerons certaines problématiques telles que : l'imprécision ou l'indétermination des images mentales et le problème des boucles infinies de l'œil qui se regarde lui-même et démontreront comment notre positionnement dans cet ensemble influence notre conception du *soi*.

La pensée-image : avant le 20^e siècle

Comme le souligne Michael Tye, avant le 20^e siècle, les philosophes ont généralement soutenu que les images mentales étaient *picturales* et donc similaires à la perception. Soulignons d'abord que cette position implique, généralement, qu'une copie des percepts visuels soit reproduite dans l'espace privé de l'observateur où des *états mentaux*¹⁷ établissent une corrélation entre l'objet réel et l'objet représenté mentalement. On dit alors qu'il s'agit d'une position *internaliste* (intérieure) et *représentationniste*. Selon Tye, les deux théories les plus populaires étaient alors la *théorie de l'image* (*picture theory*)— stipulant que les images mentales ressemblent beaucoup aux objets dans le monde — et la *théorie du percept faible* (*weak percept theory*)—affirmant que les impressions faites en mémoire, à partir des données fournies par les sens, s'affaiblissent avec le temps de stockage. On trouve des traces de ces

¹⁷ Il n'existe pas de consensus sur la définition des états mentaux et leur existence est parfois contestée. Ils sont considérés, entre autres, comme des événements physiques par Davidson (1980) et des entités théoriques par Dennett (1987).

théories complémentaires depuis Aristote qui, en concevant la persistance des images mentales comme l'égal de notre mémoire, fait de l'introspection un instrument crucial pour la pensée.

(. . .) we can call up a picture, as in the practice of mnemonics, by the use of mental images (. . .) (Aristotle, *The Soul*, cité par Tye 1991, p. 2)

The nature of memory and its process has now been explained as the persistent possession of an image, in the sense of a copy of the thing to which the image refers, and it has been further explained to what faculty in us this belongs, to the primary power of sensation (. . .) (Aristotle, *Memory and Recollection*, cité par Tye 1991, p. 2).

L'idée que les images mentales (percepts) soient des copies à l'identique des objets qu'il représente change avec Descartes. Ainsi, elles deviennent quelque chose de *quasi-perceptuel*, où la copie n'est plus identique. Cette conception implique une mise en doute de nos sens, selon laquelle la vérité se situe au-delà de ceux-ci. Le dictionnaire de philosophie de Stanford en donne un exemple probant :

« His perceptual and imaginative grasp of the nature of a piece of wax, he tells us, can never match the clarity and distinctness of the idea of the wax that can potentially be attained by purely mental scrutiny » (Stanford Encyclopedia of Philosophy s.d.).

Pour le philosophe anglais Thomas Hobbes, les images mentales prennent, encore une fois, une forme différente, car elles sont ni l'égal de la mémoire, ni quasi-perceptuelles. Elles sont une combinaison de percepts enregistrés dans la mémoire. Contrairement à Descartes, Hobbes situe le lieu de représentation dans le cerveau et non à l'extérieur de la physique.

« Again, imagination being only of those things which have been formerly perceived by sense, either all at once or by parts at several times, the former, which is the imagining the whole object as it was presented to the sense, is simple imagination, as when one imagines a man or horse which he has seen before. The other is compounded, as when, from the sight of a man at one time and of a horse at another, we conceive in our mind a centaur » (Hobbes, cité par Tye 1991, p. 5).

Après la pensée combinatoire de Hobbes, avec John Locke, George Berkeley et David Hume, la pensée devient empiriste et constructiviste. Contre la *théorie de l'image*, Locke défend la

doctrine des idées abstraites où les idées sont construites dans un traitement ascendant, partant d'idées isolées vers une idée d'ensemble. Pour Locke, c'est précisément ce processus qui rend compte de l'imprécision ou de l'indétermination des images mentales.

« To discover the nature of our ideas the better, and to discourse of them intelligibly, it will be convenient to distinguish them as they are ideas or perceptions in our minds, and as they are modifications of matter in the bodies that cause such perception in us: that so we may not think (as perhaps is usually done) that they are exactly the images and resemblances of something inherent in the subject; most of those of sensation being in the mind no more the likeness of something existing without us, than the names that stand for them are the likeness of our ideas, which yet upon hearing they are apt to excite in us » (Locke, cité par Tye 1991, p. 6).

Berkeley et Hume, selon leurs modalités propres, réfutent la doctrine des idées abstraites de Locke, car pour eux les idées sont des images précises. Comme le souligne Tye, pour Hume, qui pousse cette vision à l'extrême, le *soi* devient ni plus ni moins qu'un faisceau de perception.

« . . . when I enter most intimately into what I call *myself* I always stumble on some particular perception or other, of heat or cold, light or shade, love or hatred, pain or pleasure. I never can catch *myself* at any time without a perception, and never can observe anything but the perception » (Hume, cité par Tye 1991, p. 10).

En résumé, en soutenant que les images mentales sont *picturales* et similaires à la perception, ces philosophes accordent une valeur objective à l'introspection— « la capacité d'observation systématique de la conscience d'un sujet par lui-même » (Tye 1991, p. 10). Avant d'explorer la pensée-image après le 20^e siècle, nous allons définir les notions d'internalisme et d'externalisme et leurs conséquences sur l'imagerie mentale.

Internalisme — externalisme

La position internaliste, fortement liée à la tradition phénoménologique et aux sciences cognitives, suppose une indépendance de la sphère mentale à l'égard de l'environnement. Elle implique une forme de dualisme où les qualités (*qualia*) des objets perçus dépendent d'un

processus réflexif privé et interne. Les images mentales sont ainsi indirectement représentées par nos *états mentaux*. Il stipule également que le contenu de nos croyances dépend ces états. Ainsi, le seul examen réflexif de nos croyances assure le bien-fondé de nos connaissances épistémiques sur le monde. C'est contre ce postulat internaliste que Ludwig Wittgenstein (1889-1951) formule un premier argument externaliste, contre la possibilité d'un langage privé : *le problème de suivre les règles*. Le raisonnement soutient que nous serions dans l'impossibilité d'identifier et de justifier nos croyances en autarcie avec nous-mêmes. Sans règles extérieures et publiques, aucune représentation mentale ne pourrait déterminer la manière correcte d'appliquer un concept. Bien qu'il existe plusieurs interprétations relatives à cette position¹⁸, ce sont ces règles qui permettent la relation causale nécessaire à la justification de nos croyances. Dans son article « L'argument sémantique pour la dépendance corporelle de la pensée », Michael Esfeld, résume en deux points l'importance du corps et de l'environnement dans la posture externaliste.

« (1) La possession d'un concept présuppose d'avoir à sa disposition un critère de distinction entre ce que la personne elle-même regarde comme une application correcte du concept en question et ce qui est une application incorrecte. (2) Seule l'interaction sociale avec d'autres personnes peut établir un tel critère. Pour une personne prise isolément, il n'y a pas de tel critère : tout ce qui lui semble être correct est correct pour elle; elle ne peut donc pas suivre des règles » (Esfeld 2003, p. 122).

Ainsi, cette position donne à la pensée un visage objectif, car elle est issue d'un échange entre nous et le monde et non d'une représentation de celui-ci en nous. Un autre argument célèbre pour l'externalisme sémantique est l'expérience de pensée dite de la Terre-jumelle proposée par Hilary Putnam en 1975 dans un article intitulé « Les significations ne sont tout simplement pas dans la tête » (Putnam 1995). Cette expérience de pensée veut démontrer que la signification des termes d'espèce naturelle (eau, tigre, or, etc.) n'est pas déterminée par nos états mentaux (interne). Sommairement, l'argument va comme suit : imaginer une terre jumelle à notre terre

¹⁸ L'interprétation « communautaire » présuppose l'appartenance à une communauté d'individus partageant une règle modulant leurs comportements par son apprentissage, sa critique ou son approbation. Cette interprétation est défendue par N. Malcolm, R. Fogelin et S. Kripke. L'interprétation « individualiste » permet de concevoir qu'une règle peut être suivie par une seule personne en dehors de toute communauté (si celle-ci peut être partagée par d'autres individus). Cette interprétation est défendue par G.P. Baker et P.M.S. Hacker (Sauvé 1990).

dans une région éloignée de l'univers. Celle-ci est exactement comme notre terre à la différence près que, sur terre jumelle, ce qui est nommé « eau » a une structure moléculaire différente. Sa composition n'est pas H_2O , mais une formule complexe nommée XYZ. Malgré cette différence, l'eau a la même apparence (visuelle, tactile, etc.) sur les deux planètes. Sur la terre jumelle, nous pourrions croire que l'utilisation du terme *eau* signifie la même chose que sur notre terre. Par contre, Putnam nous dit que si nous sommes amenés à découvrir que le terme eau renvoie à XYZ et non pas H_2O , nous réviserions nos croyances. Il mentionne également que si nous pouvions remonter à une époque antérieure à la découverte de la structure moléculaire de l'eau, sur la terre et sur la terre jumelle, les habitants de ces planètes, malgré qu'ils n'aient aucune croyance sur la composition chimique de l'eau, se réfèrent déjà à deux choses complètement différentes, car l'extension du terme eau n'est pas la même. Putnam en déduit que, même si nous supposons que ces habitants se trouvent dans le même état mental en se référant à l'eau, ils n'entendent pas la même chose par *eau*, car ils ne se réfèrent pas à la même chose.

Ainsi, la signification d'un mot ne se trouverait pas dans nos têtes et ne serait pas entièrement déterminée par nos états mentaux. Cet argument sémantique souligne que nos états mentaux ne déterminent pas, à eux seuls leur référence, ou plus généralement, l'extension des mots que nous employons.

En philosophie de l'esprit, il existe deux modèles externaliste. Le premier, *l'externalisme standard passif* défend l'idée que bien que l'esprit émane directement de la possession d'un corps, il n'entretient pas de rôle causal direct face à son environnement. L'exemple classique de ce modèle est l'expérience de pensée *du cerveau dans une cuve*, reformulé par Putnam en 1981 (Putnam 1981) depuis les travaux du philosophe américain Gilbert Harman (Harman 1973) et de l'hypothèse du malin génie¹⁹ de Descartes. L'expérience de pensée est la suivante : imaginons que les êtres humains soient des cerveaux immergés dans une cuve, remplie d'éléments nutritifs, qu'un savant aurait interconnectés à un super ordinateur donnant aux cerveaux l'illusion que la réalité est la même qu'avant la transplantation. Le problème est de

¹⁹ L'hypothèse du malin génie suggère que tout ce que nous croyons être la réalité pourrait n'être qu'une illusion produite par un esprit malin, car les informations transmises par nos sens sont trompeuses.

savoir s'il est possible de reconnaître cet état de fait. Il s'agit d'une posture sceptique sur les fondements de nos croyances et connaissances. Cet argument s'apparente à d'autres expériences de pensée comme l'allégorie de la caverne de Platon ou plus récemment celle du zombie philosophique de Dennett²⁰. Putnam, critique cette assomption et démontre que cette hypothèse est autoréfutante :

« Même si les gens dans ce monde possible peuvent penser et « dire » tout ce que nous, nous pouvons penser et dire, je prétends qu'ils ne peuvent pas faire référence à ce à quoi nous, nous pouvons faire référence. Plus précisément, ils ne peuvent pas penser ou dire qu'ils sont des cerveaux dans une cuve (même en pensant la phrase : « nous sommes des cerveaux dans une cuve ») (Putnam 1981, p.18).

Comme nous l'avons vu avec l'expérience de pensée de la terre jumelle, il ne suffit pas que deux personnes soient dans le même état mental ou aient le même « concept » pour qu'ils puissent faire référence à la même chose : « L'état mental ne détermine pas la référence » (Putnam 1981, p.36). Le deuxième modèle, *l'externalisme actif*, défendu entre autres par les philosophes Andy Clark et Alva Noë, affirme le rôle causal et constitutif de l'environnement sur l'esprit. Dans ce modèle, la cognition est distribuée dans le système. L'esprit s'y voit délocalisé, voire « débiologisé ».

« Rien ici ne requiert un corps unique persistant dans l'espace tridimensionnel ordinaire. Au lieu de cela, il pourrait y avoir des formes authentiques, mais dispersées d'incorporation, incorporation dans des réalités virtuelles ou mixtes, et de multiples incorporations pour une intelligence unique » (A. Clark 2008, p. 59, cité par Gillot et Guillaume 2012, p. 9).

Pour bien apprécier ces distinctions, cela demande quelques explications complémentaires que la description des principaux modèles de la pensée issus des sciences cognitives peut nous offrir.

²⁰ « Les philosophes utilisent le terme zombie pour désigner une catégorie différente d'êtres humains imaginaires. Ils s'accordent pour dire qu'un zombie est ou serait un être humain qui manifesterait un comportement parfaitement naturel, alerte, loquace et vif, mais qui ne serait en fait pas conscient : c'est une sorte d'automate. » (Dennett 1991, p. 99)

Sciences cognitives : les principaux modèles de la pensée

Depuis l'arrivée des sciences cognitives, la notion d'esprit s'est considérablement enrichie et bonifiée. Pour en témoigner, je m'appuierai ici sur le texte de Jean-François Dortier, *Balade parmi les théories de l'esprit*, ainsi que sur plusieurs ouvrages de référence comme *Philosophy of Mind : A Contemporary Introduction*, de John Heil. Une fois ce portrait effectué, nous reviendrons plus directement sur l'imagerie mentale. Pour l'heure, voyons ce que nous disent les principaux modèles des sciences cognitives : le *cognitivism*, le *connexionnisme*, la *pensée incarnée* et la *pensée distribuée* et comment nous pouvons les associer aux concepts d'*internalisme*, d'*externalisme*, de *représentationnisme* et d'*anti-représentationnisme*.

Commençons par le modèle fondateur des sciences cognitives, le *cognitivism*. Celui-ci considère la pensée comme une sorte de programme informatique qui, en calculant et manipulant des symboles abstraits, représentent les objets du monde par des signes. Ce modèle computationnel (représentationniste) fait de la pensée « une sorte d'algèbre mentale » (Dortier, p. 5) où les opérations sont linéaires. Les recherches du neuropsychologue Stanislas Dehaene semblent appuyer empiriquement le caractère sériel de ce modèle. Pour Dehaene, le *multitasking* — opérations simultanées en parallèle de la pensée — serait une illusion. Lorsque le niveau d'attention est sondé et analysé en laboratoire, les résultats, issus de l'imagerie par résonance magnétique IRMf et de l'électroencéphalographie EEG, montrent un ralentissement du temps d'accès à la conscience proportionnelle au nombre d'actions réalisées simultanément (Dehaene 2014, p. 56). Ce ralentissement cognitif, dit « période réfractaire psychologique », peut même aller jusqu'à la *cécité attentionnelle* comme le démontre l'expérience de Simon et Chabris (Simons et Chabris 1999). Les chercheurs demandent à des étudiants de regarder attentivement une vidéo : « Vous verrez deux équipes de basket, l'une au maillot noir, l'autre au maillot blanc (...). Concentrez-vous sur les joueurs en blanc et comptez toutes leurs passes ». Concentrés sur cette tâche, 50% des étudiants ne voient pas l'homme déguisé en gorille qui traverse le terrain au milieu du film... (Cerveau et Psycho s.d.).

Le *connexionnisme* quant à lui est un modèle *anti-représentationniste* qui considère les neurones du cerveau comme « une multitude de petits robots stupides interconnectés » (Dortier 2013,

p. 3). On peut dire de ce modèle qu'il est « éliminativiste », car il postule qu'il n'y a aucune représentation mentale. Contrairement au *cognitivism*e, le connexionnisme ne considère pas le cerveau comme une machine à calculer, mais plutôt comme une termitière où les termites, sans représentation commune, construisent ensemble leur cathédrale (Dennett 2017). Le cerveau traite ainsi l'information en parallèle. Daniel Dennett, dans son dernier livre : *The Evolution of Mind : From Bacteria to Bach and Back*, donne un exemple similaire :

« The termite castle and Gaudí's La Sagrada Familia are very similar in shape but utterly different in genesis and construction. *There are reasons* for the structures and shapes of the termite castle, but they are *not represented* by any of the termites who constructed it. There is no Architect Termite who planned the structure, nor do any individual termites have the slightest clue about why they build the way they do » (Dennett 2017, p. 432).

Le modèle de l'esprit que construit Dennett, « the Multiple Drafts model », rejette la conception représentationniste de Descartes. Il la tourne même en dérision en forgeant la métaphore du *théâtre cartésien*. Dennett nous dit que sans théâtre, il n'y a pas d'écran et donc aucune raison de re-présenter, à nouveau, les données analysées.

« ... the Multiple Drafts model goes on to claim that the brain does not bother “constructing” any representations that go to the trouble of “filling in” the blanks. That would be a waste of time and (shall we say?) paint. The judgment is already in so we can get on with other tasks! » (Dennett 1991, P.8).

Poursuivons avec le modèle de la *cognition incarnée* forgée par Francisco Varela en 1988 (Varela (1988) 1996). Cette conception de la cognition, qui situe la pensée dans l'ensemble du vivant, réfute le *cognitivism*e et le *connexionnisme* et est en plein essor depuis les années 2000. C'est un modèle autopoïétique, d'inspiration cybernétique²¹, affirmant la propriété d'autocréation du corps-pensé (système) qui, bien que séparé de son environnement par une barrière physique (peau), se régénère et se régule par les interactions avec celui-ci.

²¹ Le terme cybernétique, d'abord utilisé par le fondateur de la thermodynamique André-Marie Ampère, prend un sens nouveau en 1947 lorsque le mathématicien Norbert Wiener l'applique au domaine naissant de l'automatisme, de l'électronique et de la théorie mathématique de l'information. Ainsi, un ensemble de recherches se déploiera autour du concept de rétroaction développée, entre autres, par les théories biologiques de l'auto-organisation dont l'autopoïétique fait partie.

« Un système autopoïétique est organisé comme un réseau de processus de production de composants qui (a) régénèrent continuellement par leurs transformations et leurs interactions le réseau qui les a produits, et qui (b) constituent le système en tant qu'unité concrète dans l'espace où il existe, en spécifiant le domaine topologique où il se réalise comme réseau. Il s'ensuit qu'une machine autopoïétique engendre et spécifie continuellement sa propre organisation. Elle accomplit ce processus incessant de remplacement de ses composants, parce qu'elle est continuellement soumise à des perturbations externes, et constamment forcée de compenser ces perturbations. Ainsi, une machine autopoïétique est un système à relations stables dont l'invariant fondamental est sa propre organisation » (Varela 1989, p. 45).

En ce sens, comme le souligne Dehaene, nous disposons d'une autonomie interne relative : « Notre cerveau ne s'abandonne jamais passivement à son environnement, mais il engendre en permanence ses propres configurations d'activité (...). Notre conscience n'est donc pas soumise à son environnement : elle lui impose un sens, un contexte, un but. L'origine de cette faculté réside dans la capacité des cellules nerveuses à s'auto-exciter » (Dehaene 2014, p. 261).

Pour terminer, le modèle de la *cognition distribuée*, quant à lui, distribue l'esprit dans le système (l'environnement) et fait de la cognition un phénomène collectif. Contrairement à la *cognition incarnée*, situant l'esprit dans le corps, celui-ci devient la somme de ses parties distribuées dans l'environnement. Cet *externalisme actif* est exemplifié ici par Dortier.

« Regardez un avion. Qui le fait voler ? Le pilote bien sûr. Mais que pourrait-il faire sans tous les appareils de pilotage qui l'informent et même prennent les commandes (pilotage automatique). Il est aussi assisté d'un copilote, et tous deux sont en lien avec les tours de contrôle qui donnent aussi des instructions. Le pilotage d'un avion, acte intelligent s'il en est, se trouve donc formé d'un système représenté par le pilote, son copilote et les ordinateurs de bord. L'esprit n'est pas seulement dans la tête du pilote, il est distribué dans ce système. Voilà l'idée de la « cognition distribuée ». On l'appelle aussi « cognition située », car le pilotage est par nature une adaptation permanente à un contexte : un vol et un environnement donné » (Dortier 2013, p. 4).

Nous avons vu comment ces quatre modèles, réfutant a priori le dualisme cartésien, localisent la pensée soit à l'intérieur d'un corps, soit à l'extérieur de celui-ci en la distribuant dans l'environnement. Par contre, comme le souligne Pascale Gillot et Guillaume Garreta après avoir survolé ces modèles dans leur dossier *Les lieux de l'esprit*, nous pouvons nous demander si la métaphore de la localisation statique et spatiale de l'esprit est bien adéquate. Celle-ci « ne

reconduit-elle pas subrepticement une conception de l'esprit fondée sur le paradigme contenant-contenu, dont il s'agit précisément de se libérer ? » (Gillot et Guillaume 2012, p. 12). Pour ces philosophes, il serait impossible pour une philosophie de l'esprit d'être bien comprise si elle ne devient pas, du même coup, une philosophie de l'action. En ce sens, ils exposent la pensée du philosophe américain John Dewey (1859-1952) en soulignant le caractère sériel (non simultané) des relations unissant l'être humain à son environnement. Ainsi, l'esprit n'est plus un nom (une entité), mais un verbe (une action).

« La notion d'esprit proposée par Dewey (qu'il est possible de rapprocher des tentatives plus récentes de G. Ryle et W. Sellars) : l'esprit n'est pas une chose ni une entité, il n'est donc pas un nom, mais il est de l'ordre du verbe, dénotant, qualifiant et décrivant des pratiques plus ou moins intelligentes, des styles de conduites situées. Par-là se révèle à nouveau l'inadéquation de la question classique du lieu de l'esprit, dans la mesure où elle suppose une conception statique et spatiale, plutôt que dynamique et temporelle, des phénomènes mentaux » (Gillot et Guillaume 2012, p. 14).

Voilà qui termine ce survol des principaux modèles de l'esprit que nous allons poursuivre sous l'angle de la conscience.

David Chalmers : le problème facile et le problème difficile

Un angle nouveau de réflexion sur la conscience, en philosophie de l'esprit, est établi par David Chalmers en 1995, dans son livre *The Conscious Mind* (Chalmers 1996). Il y définit deux problèmes fondamentaux soit le *problème facile* (l'explication des mécaniques permettant la réalisation des différentes fonctions de la conscience) et le *problème difficile* (vu comme celui qui persiste une fois que l'ensemble des fonctions en question sont expliquées : la dimension subjective de l'expérience (souvent nommé qualia)). Cette catégorisation a l'avantage de clarifier deux approches distinctes sur la conscience. Nous verrons que celles-ci font écho aux notions vues précédemment.

Pour le premier groupe, les *fonctionnalistes*, si vous arrivez à expliquer les fonctions objectives de la conscience—l'intégration de l'information, le contrôle comportemental, etc.—

, vous avez tout expliqué et le *problème difficile* n'existe donc pas. Nous pouvons inclure dans ce groupe Marvin Minsky (1952-2016), leader en intelligence artificielle, pour qui un modèle informatique du cerveau pourrait un jour être conscient (position dite forte sur l'intelligence artificielle). Opposé au concept dualiste des qualia, Minsky identifie la conscience à une pensée abstraite de haut niveau et croit qu'en principe, les machines peuvent faire tout ce qu'un être humain conscient peut faire. Il résume sa position dans un entretien avec le magazine *Edge*.

« We use those words as suitcases in which to contain all sorts of mysteries that we can't yet explain. This in turn leads us to regard these as though they were "things" with no structures to analyze. I think this is what leads so many of us to the dogma of dualism—the idea that "subjective" matters lie in a realm that experimental science can never reach. Many philosophers, even today, hold the strange idea that there could be a machine that works and behaves just like a brain, yet does not experience consciousness. If that were the case, then this would imply that subjective feelings do not result from the processes that occur inside brains. Therefore (so the argument goes) a feeling must be a nonphysical thing that has no causes or consequences. Surely, no such thing could ever be explained! » (Edge s.d.).

Le philosophe John Searle s'oppose à cette position forte de l'intelligence artificielle dans une expérience de pensée nommée la chambre chinoise. En voilà, de manière succincte, l'essence : imaginez une personne sans aucune compréhension du chinois enfermée dans une chambre. Dans cette chambre, elle dispose d'un inventaire de règles sur la syntaxe des phrases en chinois. L'argument souligne qu'en appliquant ces règles, cette personne arrivera à produire d'autres phrases en chinois et que du point de vue du locuteur qui pose les questions depuis l'extérieur, la personne enfermée dans la chambre se comporte comme un individu parlant vraiment chinois. Malgré tout, en ne suivant que les règles prédéterminées, cette dernière n'aura aucune compréhension du sens des phrases qu'elle transforme. Pour ce faire, un usage maîtrisé du langage doit se doubler d'une conscience de la signification de ce qui est énoncé. La reproduction artificielle, même parfaite, d'un comportement linguistique ne suffit pas à produire un tel état. Ainsi, pour Searle, simuler une conscience n'équivaut pas à posséder des états mentaux.

« In defense of this dualism the hope is often expressed that the brain is a digital computer (early computers, by the way, were often called "electronic brains"). But that is no help. Of course the brain is a digital computer. Since

everything is a digital computer, brains are too. The point is that the brain's causal capacity to produce intentionality cannot consist in its instantiating a computer program, since for any program you like it is possible for something to instantiate that program and still not have any mental states. Whatever it is that the brain does to produce intentionality, it cannot consist in instantiating a program since no program, by itself, is sufficient for intentionality » (Searle 1980, p. 27).

Pour Chalmers, également opposé à la position A.I. forte, résoudre le *problème facile* ne nous permet pas de comprendre pourquoi les fonctions objectives sont accompagnées d'une expérience subjective (*le problème difficile*).

Poursuivons en traçant un portrait contemporain des principaux modèles en philosophie de la pensée. Pour ce faire, je m'appuierai sur la conférence « Toward a Science of Consciousness » (Chalmers 2014) où David Chalmers fait un exercice de catégorisation entre monisme (problème facile) et dualisme (problème difficile). Il commence en définissant trois types de monisme (A-B-C). Pour lui, le *type A* est la position *physicaliste réductionniste* où la conscience se réduit à la physique. Pour Dennett, soutenant cette position, le mysticisme de la conscience est vu comme un vestige du créationnisme. Le *type B* stipule que la conscience est un problème épistémologique. Il s'agirait, non pas d'un écart ontologique, mais d'un écart de nature entre le concept du physique et le concept de la conscience. L'exemple classique est émis en 1714 par le philosophe allemand Gottfried W. Leibniz dans un passage de la *Monadologie*. L'argument stipule que la conscience perceptuelle ne peut être totalement comprise en des termes mécaniques.

« Moreover, it must be confessed that perception and that which depends upon it are inexplicable on mechanical grounds, that is to say, by means of figures and motions. And supposing there were a machine, so constructed as to think, feel, and have perception, it might be conceived as increased in size, while keeping the same proportions, so that one might go into it as into a mill. That being so, we should, on examining its interior, find only parts which work one upon another, and never anything by which to explain a perception. Thus it is in a simple substance, and not in a compound or in a machine, that perception must be sought for » (La monadologie (17), Strickland 2014).

Le *type C* est une position *non réductionniste* qui propose d'étendre notre conception du monde physique et de considérer la conscience comme un constituant fondamental du monde

(panpsychisme). Selon la Stanford Encyclopedia of Philosophy, cette vue, après « ... une longue et vénérable histoire dans les traditions philosophiques de l'est et de l'ouest, a récemment connu un renouveau dans la philosophie analytique » (Stanford Encyclopedia of Philosophy). Pour ses partisans, ce modèle offre une voie médiane attrayante entre le physicalisme (d'une part) et le dualisme (de l'autre). « Le panpsychisme, aussi étrange que cela puisse paraître au premier abord, permet un récit satisfaisant de l'esprit humain dans une conception unifiée de la nature. » (Stanford Encyclopedia of Philosophy). Toujours selon Chalmers, pour Bertrand Russell, défenseur de cette vue, « consciousness serve as intrinsic nature that underlies physical structure and it's that causal basis for my physical action. » (Chalmers, 20th Anniversary Conference. Toward a Science of Consciousness 2014). La conscience est donc là à l'intérieur de la physique. Cette position est également défendue par les philosophes, Greg Rosenberg, Bill Sieger et ainsi que par les scientifiques, Julio Tononi, Stuard Hameroff et Roger Penrose.

Chalmers, problématise ses catégorisations en identifiant le monisme à un *système fermé* et le dualisme à un *système ouvert*. Pour lui, la vue dualiste de la conscience, qui oppose au réseau physique une propriété non physique de la conscience, pose le problème de l'interaction (causalité) entre ces deux entités. Dans un *système ouvert*, la conscience étant à l'extérieur du réseau et ne jouant aucun rôle causal sur la physique, peut alors être vu comme un épiphénomène. Nous pouvons alors dire qu'elle devient alors un artéfact, simplement là, sans but, « ressemblant aux lumières d'un ordinateur clignotant lors de ces computations » (Tye 1991, p. 62)²². Pour éviter cet écueil, Chalmers cherche, dans un *système clos* n'offrant aucune place pour une conscience non physique, à identifier un principe (causal) permettant de l'unir à un processus physique. Il postule deux possibilités. La première est liée à la nature duale des particules (onde-particule) où, dans le modèle standard, leurs positions peuvent être représentées que de manière probabiliste. Ce n'est qu'après leur observation (*mesure*) que cet état dual est réduit en une onde ou une particule. On nomme ce phénomène la *réduction du paquet d'ondes* (*collapsing wave function*). L'observation serait ici le premier principe (causal) liant la

²² Critique de Kosslyn sur les structures descriptives: « Sur cette vue. . . les représentations de l'image sont simplement «le long de la route», et elles-mêmes ne jouent aucun rôle dans le traitement cognitif. Que nous fassions ou non l'expérience d'images est alors hors de propos. Les images peuvent être analogues aux lumières qui clignotent à l'extérieur d'un ordinateur. » (Tye, P.62)

conscience au processus physique. L'hypothèse du philosophe de l'information Henry Snapp postule que celle-ci serait justement l'interaction avec la conscience.

« ... the quantum mechanical process of posing questions and receiving responses is not like the classical mechanical process, in which our observations have no physical effects. In QM (Quantum mechanics), the *observer's free choice* of which question to ask plays a critical role in determining which potential material property will become actualized » (Snapp, Henry s.d.).

Toujours dans un *système clos*, la deuxième possibilité est l'*idéalisme métaphysique* indiquant tout simplement que seul l'esprit existe. Il s'agit d'une *vue représentationniste* menant naturellement à un scepticisme à l'égard du monde physique.

Nous avons dressé ce portrait du problème facile et du problème difficile afin de cartographier leurs contours et ainsi montrer comment notre positionnement dans cet ensemble influence notre conception du *soi*.

La pensée-image depuis le 20^e siècle

En introduction, nous avons vu qu'un des problèmes des images mentales est leur caractère imprécis et indéterminé. Avant le 20^e siècle, *la théorie de l'image* couplée à la *théorie du percept faible* — spécifiant que l'impression des images mentales s'estompe avec le temps — était la réponse commune à cette question. Avec l'arrivée des sciences cognitives au siècle dernier et les nouvelles données empiriques sur le cerveau, l'imagerie mentale a pris un nouveau visage. Dans son ouvrage de référence *Philosophy of Mind : A Contemporary Introduction*, John Heil souligne :

« À l'aube du 20^e siècle, les psychologues se sont engagés dans un débat animé sur la possibilité d'une pensée sans image. À l'époque, les radicaux étaient ceux qui soutenaient que la pensée n'était pas toujours imagiste. Aujourd'hui les radicaux sont ceux qui sont sceptiques sur le fait que la pensée pourrait être totalement non picturale » (Heil 2013, p. 246).

Toujours en phase avec le travail de Michael Tye, *The Imagery Debate*, nous définirons, de façon succincte, l'évolution des théories de l'imagerie mentale au 20^e siècle et aujourd'hui. Notre chemin traversera les théories suivantes : les *données des sens*²³, *Behaviorisme*, *Descriptionnalisme*, *Eliminativisme*, les quasi-images et les *tableaux de symboles* (*Symbol filled array*).

Les *données des sens* constituent une théorie « picturale » (*picture theory*) de l'imagerie mentale. Moins populaire aujourd'hui, elle a tout de même certains défenseurs comme G.E. Moore et l'idéaliste Bertrand Russell. Cette théorie soutient que voir le monde extérieur implique l'appréhension d'impressions intérieures semblables à des images ou à des données sensorielles. Pour Tye, cette théorie ne permet pas d'expliquer l'imprécision ou l'indétermination des images mentales et donne l'exemple suivant : « Si l'on demande à un individu d'imaginer un tigre, si la théorie *picturale* des *données des sens* est exacte, il devrait être en mesure de spécifier le nombre de rayures qu'arbore le pelage du tigre imaginé. Cela n'est jamais le cas. » (Tye 1991, p. 8). Une autre critique soulevée par Tye est le problème des boucles infinies : « Si, comme le supposent généralement les adeptes de la théorie de l'image, voir le monde extérieur, tout comme l'imagination, implique un *œil* intérieur voyant une *image* intérieure, alors ce dernier ne se verra-t-il pas requérir une *image* intérieure supplémentaire? Un autre *œil* qui le voit, et ainsi de suite ad infinitum ? » (Tye 1991, p. 20). Malgré cette mise en garde de Tye, la peur des boucles semble être, en partie, culturelle—comme le souligne le cognitiviste Douglas Hofstadter dans son livre *Je suis une boucle étrange*,:

« Nous savons tous que certaines tribus craignent les miroirs, que de nombreuses sociétés se méfient des caméras, que certaines religions interdisent la représentation humaine, etc. Se représenter soi-même est mal vu. C'est bizarre, voire fatal. La crainte des boucles semble faire partie de notre humaine étoffe » (Hofstadter 2007, p. 71).

Pour Hofstadter, elles seraient tout de même constitutives du *soi* ou plus précisément la « Je »-nesse du *soi*. « La faculté de percevoir certains aspects de l'environnement permet en retour de ressentir certains aspects de soi-même » (Hofstadter 2007, p. 87).

²³ Traduction du terme anglais Sense-data.

Après les *données des sens*, le *behaviorisme*, le *descriptivisme* et l'*éliminativisme* sont trois alternatives à la théorie de l'image. Le *behaviorisme* débute dans le champ de la psychologie à la fin du 19^e siècle avec J.B. Watson qui le définit ainsi : « Le behaviorisme prétend que le domaine de la psychologie humaine est le comportement humain. Il estime que la conscience n'est un concept ni défini ni utilisable ». Watson défend ainsi l'idée qu'il est possible d'expliquer et de comprendre les comportements humains en excluant toute donnée liée à l'introspection et à la conscience, qui sont considérées comme invérifiables et non scientifiques. Il souhaitait faire de la psychologie une science objective où l'environnement, à l'instar des processus internes, détermine les comportements. Ainsi, les images mentales ne peuvent être comprises que depuis une description externe. Celles-ci sont vues comme un discours silencieux (subvocalisation) adressé au sujet lui-même ou à une autre personne à propos d'objets ou d'événements passés ou futurs. En écartant ainsi toute référence à l'introspection, le behaviorisme est une première alternative à la théorie de l'image.

Pour le *descriptivisme*, les images mentales représentent les objets à la manière d'une description linguistique sous la forme d'un code neuronal. Cette position situe l'imagination du côté de l'expérience plus que du côté de la vision. Ainsi, cette deuxième alternative, bien qu'elle prenne en compte l'imprécision ou l'indétermination des images mentales à travers le caractère subjectif de l'expérience, fait ressurgir le problème des boucles infinies, car « lire » le code implique un « œil intérieur » qui en implique un autre...

La troisième alternative, l'*éliminativisme*, postule simplement que les images mentales, comme la plupart des états mentaux, n'existent pas réellement. Cette position, populaire aujourd'hui, est défendue, entre autres, par Tye. Malgré tout, comme le souligne William Ramsey dans un article de l'encyclopédie de Stanford (Stanford Encyclopedia of Philosophy s.d.), de nombreux auteurs ont soutenu que la théorie de l'*éliminativisme* est contradictoire, car elle est en quelque sorte une réfutation du *soi*. Pour Ramsey, faire une telle assertion présuppose l'existence de croyances et que c'est précisément en raison de l'existence de celles-ci que la théorie se réfute elle-même.

Une version contemporaine de la théorie de l'image vient du concept de *quasi-image* construit par Stephen Kosslyn (Kosslyn 1980). Pour lui, les images mentales ne sont pas totalement des images, elles sont matricielles. Elles sont la résultante d'un assemblage composé de parties

d'image (quasi-images). Celui-ci, à la manière d'une carte, entretient un rapport de correspondance (matrice) avec le réel. Cette théorie postule ainsi l'existence d'un substrat à l'imagerie mentale. Il nomme cette structure²⁴ la *mémoire tampon (visual buffer)*. Il appuie sa théorie sur deux expériences visant à calculer la vitesse d'introspection pendant que les images mentales sont spatialement parcourues. En voici une : on montre d'abord aux participants de l'expérience une carte d'une île fictive comprenant sept détails significatifs : un refuge, un puits, une plage, etc. Dans un deuxième temps, les sujets, individuellement, doivent mémoriser la carte et les sept détails. Ensuite, l'expérimentateur supprime la carte de la vue du sujet et lui demande de se représenter mentalement un des sept détails qu'il nomme. Une fois l'image mentale produite le sujet arrête un chronomètre et le temps de construction de celle-ci est noté. Cette requête est répétée pour tous les détails. Cette expérience a révélé que, plus l'objet mémorisé se trouve éloigné de la localisation géographique de l'image mentale précédente, plus il faut de temps au sujet pour imaginer ce nouvel objet. Comme le souligne Tye, déplacer l'attention de la *partie lac* de l'image vers la *partie refuge* a pris plus de temps que de déplacer l'attention de la *partie puits* vers la *partie refuge* (figure 9).

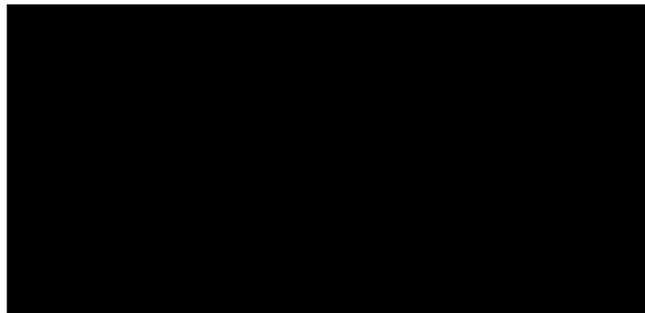


Figure 9 - Carte mentale de Stephen Kosslyn

Cette expérience, en faveur de l'inscription d'une « métrique » au sein de l'imagerie mentale, veut démontrer que l'imagination opère par des représentations mentales (carte) et que les

²⁴ La mémoire tampon occupe une place déterminante dans la théorie de Kosslyn. Elle est vue le comme une structure « qui traite les informations en provenance de la rétine tout en servant de support aux représentations imagées » (Bideaud et Courbois 1998, p.159-160)

relations de distance de ces éléments (quasi-images) sont proportionnelles. Aucune représentation n'est explicite, car les quasi-images ne sont que des parties d'images. La théorie de Kosslyn est une des théories les plus détaillées et complètes sur l'imagerie mentale.

Nous terminerons ce portrait avec le concept phare de Michael Tye, les *tableaux symboliques* (symbol-filled arrays). Pour lui, tout comme Kosslyn, les images mentales partagent le même support (de type cartographique) que la vision. Il appuie sa théorie sur le cadre représentationnel de la vision du neuroscientifique David Marr (Marr 2010 (1982)) ainsi que sur le concept du *tampon visuel* de Kosslyn. Marr, quant à lui, identifie quatre processus computationnels menant à la vision consciente. Premièrement, les changements d'intensités lumineuses sur la surface des objets, captés par la rétine, sont perçus. Ensuite, une première esquisse définit le bord des objets sous la forme d'un tableau de *symboles*. Subséquemment, une seconde esquisse 2 ½-D (sketch 2 ½-D), discerne la disparité binoculaire des objets : profondeur de champ, l'orientation des surfaces, etc. Le nombre 2 ½ ne doit pas être pris à la lettre et ne réfère aucunement à une réelle ½ dimension. Ce nombre exprime simplement le fait qu'en réalité nous ne voyons pas tout ce qui nous entoure. Pour ces trois premiers niveaux, il s'agit d'un traitement de l'information ascendant (*bottom-up*), centré sur l'observateur et non objectif. C'est n'est qu'ensuite qu'un modèle 3D subjectif est créé où le monde, dans un traitement de l'information descendant (*top-down*), est représenté. Ce modèle fait de la vision 3D un mode d'accès indirect au monde permettant de passer d'une représentation locale à une représentation globale de l'image. Ainsi, nous ne verrions pas réellement le monde en 3D, mais depuis un modèle 2 ½-D, la seconde demie étant complétée symboliquement dans notre esprit. Relativement à ce modèle représentationniste, Alva Noë, dans son livre *Varieties of Presences*, introduit la nuance suivante relativement à la notion de modèle :

« The model is not, in this sense, a representation of the building of which it is the model. Rather—and this is critical—the model is a substitute, or proxy, or stand-in, for the building. It is not a representation of it; rather, its representative. (...) We don't need to suppose that a model produces a mental representation or a mental model in order to depict. A model is something we use to stand in for something else » (Noë 2012, p. 98).

Le modèle des *tableaux de symboles* de Tye est très semblable au sketch 2 ½-D de Marr où les cellules du tableau sont contraintes de représenter les localisations des objets extérieurs en 2D.

Pour lui, la vision 3D est également représentée symboliquement. En ce sens, contrairement aux *quasi-images* de Kosslyn, les cellules du tableau, en elles-mêmes, ne sont pas des images, et pour cela elles doivent contenir des symboles. Par exemple, un tableau représentant une apparence de cheval devient l'image d'un cheval à travers le contenu symbolique de celui-ci et celui-ci est défini par un lien référentiel avec son environnement. Cette vision fait également des images mentales une représentation composite délocalisée. En ce sens, Tye souligne que l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle MRI^f montre que certains processus neuronaux, liés à la vision, sont plus actifs dans l'hémisphère gauche et d'autres dans le droit. Sur cette base, nous pouvons déduire que la génération d'images mentales est un processus délocalisé qui n'est pas corrélé dans une seule région neuronale ni dans seul hémisphère. Un bon exemple de cette métacognition perceptuelle nous vient des expériences sur la rivalité binoculaire à l'origine du stéréoscope.

« En 1838 Charles Wheatstone se demande ce qui se passerait si chaque œil recevait une image complètement différente ? (...) La rivalité binoculaire indique ainsi que ce qui compte pour l'accès à la conscience, ce n'est pas le traitement visuel initial (où les images sont toutes deux traitées en parallèle), mais une étape ultérieure d'où émerge une seule image gagnante » (Dehaene 2014, p. 54).

Être conscient d'une image mentale ne serait donc pas voir une image objective, comme le voudrait la *théorie de l'image*, mais plutôt avoir une *expérience imagistique* construite et non objective. Comme le souligne Tye, en se remémorant, par exemple, un moment de contemplation devant l'océan bleu, c'est le contenu symbolique de l'expérience qui est consciemment accessible. Il s'agit d'une expérience analogue à l'expérience de la mer qui n'est pas, en l'occurrence, une image. Nous pourrions également dire que la singularité de ces expériences est un marqueur temporel constitutif de notre propre individuation.

« In contrast with such experience, we have *an* experience when the material experienced runs its course to fulfillment. Then and then only is it integrated within and demarcated in the general stream of experience from other experiences. A piece of work is finished in a way that is satisfactory; a problem receives its solution; a game is played through; a situation, whether that of eating a meal, playing a game of chess, carrying on a conversation, writing a book, or taking part in a political campaign, is so rounded out that its close is a consummation and not a cessation. Such an experience is a whole

and carries with it its own individualizing quality and self-sufficiency. It is *an* experience » (Dewey 1939, p. 35).

Pour conclure ce chapitre, pour rendre compte de l'imprécision ou de l'indétermination des images mentales et du problème des boucles infinies, nous avons commencé par définir les principaux modèles de l'esprit en sciences cognitives offrant une alternative à la *théorie de l'image*. Ainsi, une image mentale ne serait pas, au sens littéral, une image dans notre tête, mais une expérience imagistique analogue à celle-ci. Nous avons également problématisé la question de la localisation de la conscience avec les notions d'internalisme et d'externalisme et soutenu que cette topologie de l'imagerie mentale pouvait être également constitutive du *soi*. D'autre part, nous pouvons constater que les sciences cognitives, tout comme la philosophie et la physique, cherchent toujours une théorie du tout unifiée. D'un côté, il s'agit du problème corps-esprit, de l'autre, la physique quantique des particules.

Malgré la limite de nos connaissances, l'investigation de l'esprit au travail permet aujourd'hui la création d'interfaces cerveau-machine qui rend possible le contrôle cinétique par la pensée de nombreuses applications médicales et artistiques.

Chapitre 3 – *Télékinésium* : une interface cerveau-machine

Ce chapitre veut, à travers l'examen des modalités de création d'une interface ICM (BCI) (*Interface cerveau machine – Brain computer interface*), faire la somme, de manière théorique et pratique, de deux aspects traités antérieurement dans ce mémoire soit : les outils de visualisation du cerveau (chapitre 1) et les théories sur la pensée et l'imagination (chapitre 2). Pour ce faire, nous nous appuyerons, d'une part, sur un riche recueil d'articles scientifiques dirigé par les chercheurs Chang S. Nam, Anton Nijholt et Fabien Lotte : *Brain-Computer Interfaces Handbook : Technological and Theoretical Advances* (2017) et d'autre part, sur les chemins qui mèneront à la création d'une œuvre interactive ICM nommée *Télékinésium*. Cette dernière propose une expérience de télékinésie où des objets sont manipulés par la pensée. Pour ce faire, une commande mentale est calibrée sur deux états cognitifs captés grâce à un casque EEG (électroencéphalographie).

L'émergence des interfaces cerveau-machine : un certain fantasme électrique

J'aimerais ici faire valoir que l'examen des conditions propices à l'émergence des premières interfaces cerveau-machine m'apparaît intimement associé à un certain fantasme électrique qui prend racine dans l'évaluation de phénomène magnétique, a priori mystérieux, exerçant une force invisible sur la matière. Les premiers exemples historiques sont les étonnantes propriétés de l'ambre jaune, nommé dans la Grèce antique « *ēlektron* » (ἤλεκτρον) et des pierres de magnétite « *magnētis* ». Dans sa thèse de doctorat, le chercheur Thomas Cauchy souligne que la première trace écrite, décrivant les propriétés spectaculaires des pierres de magnétite, est attribuée au philosophe Thalès de Milet (624 av. J.-C. - 547 av. J.-C.). Cauchy note qu'à cette époque, deux explications sont proposées. La première, défendu par Thalès, est d'allégeance *animiste* et attribue l'origine du mouvement de ces pierres à leur *anima*, « l'âme des pierres ». Voici un extrait, tiré du dialogue *Ion* de Platon, illustrant cette position :

« Non, c'est une puissance divine qui te met en mouvement, comme cela se produit dans la pierre qu'Euridipe a nommée Magnétis, et que la plupart des gens appellent Héraclée. Car en réalité, cette pierre n'attire pas seulement les anneaux qui sont eux-mêmes en fer, mais elle fait aussi passer en ces anneaux une force qui leur donne le pouvoir d'exercer à leur tour le même pouvoir que la pierre » (Platon, *Ion*, cité dans Cauchy 2007, p. 10).

La deuxième explication avancée par les philosophes Démocrite, Empédocle et Épicure et Lucrèce est quant à elle *mécanique*. Voici un extrait d'un poème de Lucrèce tiré du livre VI *de Natura Rerum* :

« J'entreprends d'expliquer en vertu de quelle loi naturelle le pouvoir d'attirer le fer est dans cette pierre que les Grecs appellent magnétite du nom de sa patrie, car c'est en Magnésie qu'on la trouve. Cette pierre fait l'admiration des hommes ; car souvent elle forme une chaîne d'anneaux qu'elle tient suspendus les uns aux autres sans autre lien qu'elle-même » (Lucrèce, *de Natura Rerum*, cité dans Cauchy 2007, p. 11).

Comme le souligne Gauchy, « Selon ce poème, l'attraction magnétique est un courant qui disperse l'air autour de l'aimant, ce vide est alors comblé par les anneaux de fer proches ». (Cauchy 2007, p. 11). Ainsi, dans ces premières réflexions sur les interactions invisibles, l'Antiquité porte deux visions : animiste et matérialiste.

Cette conception double du phénomène électrique est réactivée à l'arrivée du siècle des Lumières lorsque le physicien et philosophe italien Luigi Aloisio Galvani (1737-1798) défend une nouvelle sorte d'électricité nommée « électricité animale ». Celui-ci affirme alors que cette énergie est d'origine divine (voir les esprits animaux, chapitre 1). Le 30 octobre 1786, il publie ses recherches dans un livre intitulé *Animali Electricitate* où une série d'expériences, effectuées sur des grenouilles éviscérées, y sont minutieusement rapportées. L'une d'elles indique que ces grenouilles semblent reprendre vie lorsque, après avoir posé un fil métallique sur leurs nerfs mis à vif, leurs pattes se contractent subitement. Il en conclut alors qu'une mystérieuse énergie, « l'électricité animale », est ainsi libérée pour mettre en mouvement les membres des grenouilles (Blondel et Wolff 2011). Un de ces contemporains, le physicien Alessandro Volta (1745-1827), incarnant bien l'esprit des *lumières*, n'acceptera pas cette assertion et se penchera sur le résultat des expériences de Galvani. Il découvrira que la source de l'induction du mouvement n'est pas d'origine *interne* « divine », mais produite à l'extérieur du corps par le contact des métaux

présents dans le fil métallique utilisé par Galvani. Cette découverte le mènera ensuite à l'invention de la pile voltaïque. Suite à la découverte de Volta, réduisant l'énergie vitale des corps à la banalité de la matière, Galvani réagira avec force et considérera ces expériences comme hérétiques. Sous Volta, l'*électricité animale* se révéla être de même nature que la foudre et l'électromagnétisme. Malgré tout, cette liaison entre l'électricité et la contraction musculaire donnera naissance à l'*électrobiologie* qui eut un retentissement rapide auprès du grand public²⁵.

Il faudra attendre les travaux du médecin Richard Caton en 1875 pour qu'une première mesure de l'électricité neuronale, nommée alors « courant électrique de la matière grise », soit effectuée grâce à un galvanomètre placé directement sur le cerveau d'un lapin dont le crâne a été ouvert. Il note alors que les courants captés semblent en corrélation avec les fonctions biologiques de l'animal.²⁶ Il s'agit de la première description de ce qui est appelé aujourd'hui le *potentiel évoqué*. Malgré cette découverte, c'est un demi-siècle plus tard que le terme électroencéphalographie (EEG) sera forgé par le scientifique allemand Hans Berger. Contrairement à Caton qui pose ses électrodes directement sur le cerveau des lapins, Hans enregistre l'activité électrique du cerveau humain à l'aide d'électrodes posées à l'extérieur du crâne, sur le cuir chevelu. Cette procédure lui permettra de différencier, pour la première fois dans l'histoire de la médecine, une activité neuronale typique et atypique permettant de poser un diagnostic d'épilepsie²⁷.

Avec le développement de l'EEG, l'idée que l'activité cérébrale peut être utilisée comme canal de communication fait son chemin (voir Ibn al-Haytham, chapitre 1). Dès 1968, les travaux de Kamiya montrent que les caractéristiques des ondes *alpha*, liées à l'activité de l'EEG, peuvent être modulées volontairement par un sujet après un certain entraînement (Kamiya). Ce tournant

²⁵ Voir, entre autre, les travaux réalisés au 19e siècle par, G. W Stone et J. B. Dods

²⁶ Caton, Richard. 1875. «Electrical currents of the brain.» *British Medical Journal* 2: 278.

²⁷ « By the spring of 1929, Berger had produced hundreds of EEGs from patients with skull defects and employees of the Psychiatric Clinic, as well as dozens of EEGs from his son Klaus and himself. Berger relied on many of the same types of mental tasks employed in his earlier studies of cerebral blood flow, but he also began recording the EEG in patients with epilepsy, dementia, brain tumors, and other neuropsychiatric disorders. He returned to the experimental psychology literature in an attempt to provide a psychological interpretation of these EEG patterns, and suggested that they might represent direct evidence for the “attention waves” reported by Wundt and other experimental psychologists.» Millet pp. 537).

marque le début du *neurofeedback*, un domaine qui permet aux utilisateurs d'autoréguler leur activité cérébrale grâce à un retour en temps réel sur leur activité neuronale. Il faudra tout de même attendre l'article fondateur du chercheur belge Jacques J. Vidal, paru en 1973, « Brain-Computer Interface » pour voir arriver le terme ICM (BCI) dans le champ scientifique. Vidal décrit alors les ICM comme :

« utilizing the brain signals in a man-computer dialogue » and « as a mean of control over external processes such as computers or prosthetic devices » (Vidal, cité dans Nam, Nijholt et Lotte 2017, p. 2).

Vidal envisage également les progrès futurs des ICM et leur implication identitaire.

« mental decisions and reactions can be probed, in a dimension that both transcends and complements overt behaviour » (Vidal, cité dans Nam, Nijholt et Lotte 2017, p. 81).

Aujourd'hui, l'avancée rapide de la capacité computationnelle des ordinateurs, favorisant les développements d'agents intelligents (A.I.), réactualise une nouvelle fois, ce fantasme électrique. Nous n'avons qu'à penser à l'algorithme d'apprentissage machine *AlphaGo* qui, en octobre 2015, a vaincu le champion mondial sud-coréen Lee Sedol au jeu de Go. L'intuition humaine, réputée pour jouer un grand rôle à l'intérieur de ce jeu, fait de cette victoire une étape importante pour la recherche A.I.. Le nombre statistique des coups possibles au jeu de Go, calculé à 10^{600} , rend toute tentative de calcul probabiliste impossible. À titre de comparaison, la physique actuelle estime le nombre d'atomes dans l'univers observable, compris entre 10^{78} et 10^{82} ²⁸. Ce nombre est inférieur aux possibilités de coups au jeu de Go. Sur cette base, il est aisé de voir comment cette nouvelle association électrique, humain-machine, ouvre sur des formes hybrides d'intelligence et de pensée. Pour en attester, voilà la dernière description en titre d'un système ICM :

« a system that measures central nervous system (CNS) activity and converts it into artificial output that replaces, restores, enhances, supplements, or improves natural CNS output and thereby changes the ongoing interactions

²⁸ Elizabeth Howell, « How Many Galaxies Are There? », Space.com, marc 2018

between the CNS and its external internal environment » (Wolpaw et Wolpaw, cité dans Nam, Nijholt et Lotte 2017, p. 4).

***Télékinésium* : les chemins de la création**

Les méandres générés par la réalisation d'une œuvre soulèvent nécessairement une pléthore de questions que le discours scientifique veut contenir. Ici, le champ théorique de la philosophie de l'esprit et des neurosciences relié à la création d'une interface ICM *Télékinésium* définit les frontières du projet. En examinant la nature des outils de visualisation du cerveau (MRI, EGG, etc.) et les différentes théories sur la conscience et l'imagination, nous avons vu dans les chapitres 1 et 2 comment celles-ci s'influencent réciproquement et redéfinissent la notion du *soi*. Nous nous demanderons ici quels nouveaux paradigmes identitaires sont évoqués à travers les interfaces cerveau-machine. Commençons par dire que *Télékinésium* s'inscrit dans une série de courts métrages expérimentaux qui, ayant pour thème central le corps humain, ont été réalisés en amont de ce mémoire. Pour bien rendre compte des chemins qui ont mené à la création du troisième volet de cette série, voilà une brève description des précédents projets.

Le premier de la série, *Corps étrangers* (2013), exploite une technique d'animation novatrice, la peinture de lumière image par image (*video light painting*). Il s'inspire du mythe du « corps transparent », véhiculé par l'imagerie médicale moderne (CT, IRM, cryosection) et procédant d'une certaine objectivité scientifique, pour faire vivre au spectateur le sentiment d'étrangeté que peut parfois lui inspirer son propre corps.

Après les paysages abyssaux de l'*intérieur* du corps, *Squame* (2015) explore son enveloppe sensible, la peau. Ici, l'animation de desquamations éphémères, réalisée grâce à des moulages en sucre, évoque des paysages fragiles s'ouvrant sur des mondes à la limite de l'abstraction. Entre artefacts archéologiques et observations macroscopiques, les frontières friables de ces empreintes humaines semblent se dérober sous notre regard en interrogeant notre intériorité. Le concept topologique du « moi-peau » développé par Didier Anzieu supporte cette description lyrique.

« Par moi-peau, je désigne une figuration dont le moi de l'enfant se sert au cours des phases précoces de son développement pour se représenter lui-même comme moi contenant les contenus psychiques, à partir de son expérience de la surface du corps. Cela correspond au moment où le moi psychique se différencie du moi corporel sur le plan opératif et reste confondu avec lui sur le plan figuratif » (Anzieu 1994, p.29).

Après le corps *interne* et le corps *surface*, le corps *externe*, à travers les notions *d'esprit* et de *conscience*, est maintenant l'objet symbolique de *Télékinésium*. Pour le philosophe Alva Noë, dans une perspective *externaliste*, « la conscience n'est pas quelque chose qui se passe en nous, mais quelque chose que nous faisons » (Noë 2009, préface). De cette façon, les images ne nous apparaissent pas comme des *représentations* dans notre esprit, mais plutôt comme étant disponibles à nous. Cette critique du *modèle mental* fait du phénomène de la conscience perceptuelle un mode de perception profondément *amodale* où tous les systèmes perceptifs du corps sont mis à contribution. Cette posture est, a priori, non orthodoxe pour les neurosciences qui cherchent à établir les contours d'une topologie fonctionnelle du cerveau sur des *modalités* bien précises (zone visuelle, motrice, etc.). Comme le souligne Tye (chapitre 2), l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle MRI_f montre que certains processus neuronaux, liés à la vision, sont plus actifs dans l'hémisphère gauche et d'autres dans le droit. Nous pouvons en conclure que la génération d'images mentales est un processus *délocalisé* qui n'est pas corrélé dans une seule région neuronale ni dans un seul hémisphère (Tye 1991, p. 135).

Suite à la réalisation de *Corps étranger* et *Squame*, faire de l'esprit un objet de contrôle interactif apparaissait approprié. En guise de preuve de concept (prototype), l'objectif fixé pour la réalisation de *Télékinésium* a été la création d'une *commande mentale* permettant à un utilisateur de plier une barre de métal en réalité virtuelle. Pour ce faire, deux états cognitifs, calibrés sur un paradigme de relaxation et d'attention, ont été captés à l'aide d'un casque EEG Muse. Par la suite, l'utilisateur en retournant à l'un ou l'autre de cet état peut activer ou non l'animation de la barre métallique. Développée en collaboration avec *NeurotechX*²⁹, cette première interface ICM a généré plusieurs questions. Après avoir collecté les données et les commentaires des trois

²⁹ La mission de l'organisation est définie ainsi sur leur site web en décembre 2018 : NeuroTechX est une organisation à but non lucratif dont la mission est de faciliter l'avancement de la neurotechnologie en fournissant des ressources clés et des opportunités d'apprentissage et en étant un leaders dans les initiatives technologiques locales et mondiales. Nos trois piliers sont la *communauté*, l'*éducation* et le *développement professionnel*.

personnes ayant participé à l'expérience, il est apparu que malgré le fait que les données EEG semblaient attester d'une bonne corrélation entre la modulation *endogène* de l'activité cérébrale et l'animation (85%), le sentiment d'interagir directement par la pensée sur la barre métallique est rapporté, par les participants, comme faible. Heureusement, ce résultat qui appelle à une période de développement supplémentaire sera rendu possible par l'Office national du film du Canada qui s'est avéré intéressé au projet suite à sa présentation lors de la 6e édition des «Chemins de la création», une rencontre professionnelle sur l'écriture du film d'animation qui a lieu chaque année en France³⁰.

Afin de compléter cet historique, je tiens à mentionner trois étapes de développement (dossiers de production) significatives du projet. Le premier a pour titre *Les papillons de l'esprit* (voir, *Théorie réticulaire et théorie du neurone*, chapitre 1). Cette appellation poétique est donnée par le père de la neurologie moderne, Santiago Ramón y Cajal (1852 –1934), aux neurones du néocortex. Colauréat du prix Nobel de physiologie et de médecine en 1906, Cajal fut également un artiste de l'invisible qui a représenté, par le dessin, ses visualisations microscopiques du cerveau.

Comme le souligne DeFelipe, au XIXe siècle, les scientifiques étudiant les mondes microscopiques du système nerveux devaient posséder de vraies qualités artistiques pour communiquer leurs observations. La microphotographie n'étant pas encore bien développée, la plupart des scientifiques devaient passer par le dessin afin de documenter et présenter leurs résultats. Pour Santiago Ramón y Cajal et certains de ses collègues, cette condition leur fournissait un prétexte pour exprimer et développer leurs talents artistiques. C'est précisément ce détournement technologique qui m'a ici inspiré et à partir duquel j'ai voulu jouer en exploitant, d'un côté, l'arrivée des casques de *réalité virtuelle* et de l'autre, les qualités « microartistiques » de Cajal.

³⁰ Créés en 2012, « Les Chemins de la création » réunissent chaque année pendant deux jours, en octobre à l'Abbaye de Fontevraud (Maine-et-Loire), des professionnels de tous horizons pour échanger points de vue et expérience sur l'écriture du film d'animation (nefanimation.fr).

Le deuxième dossier *Télékinésium* est associé à la récente démocratisation des casques EEG dont le prix abordable permet leur utilisation hors des laboratoires de recherche. Le terme *télékinésie* est forgé en 1919 par Charles Rivet, cofondateur de l'Institut Métapsychique International et lauréat du prix Nobel de physiologie ou médecine en 1913 (Evrard 2016).

« 2° La télékinésie ; c'est-à-dire une action mécanique différente des forces mécaniques connues, qui s'exerce sans contact, à distance, dans des conditions déterminées, sur des objets ou des personnes » (Rivet 1922, avant-propos).

Réactualisant alors le fantasme électrique de l'époque, de nouvelles religions, telles que le *spiritisme* (Allan Kardek), voient le jour et proposent, en quelque sorte, une version moderne de nos vieilles traditions et mythes fondateurs. Ainsi, au 19^e siècle, de nouveaux phénomènes culturels émergents tels que les séances médiumniques des *tables tournantes* dans les salons parisiens. Celles-ci, profitant d'un imaginaire du surnaturel propagé par le développement des technologies de communication à distance telles que le phonographe d'Edison et le téléphone de Bell, introduisent leurs propres instruments de communication avec l'au-delà.

Ainsi, les « trompettes pour l'esprit »³¹(figure 10), prétendent faciliter et amplifier l'apparition de phénomènes surnaturels « via le fluide électrique prétendument généré par le médium » (Baudouin et Berton 2015, p.75).

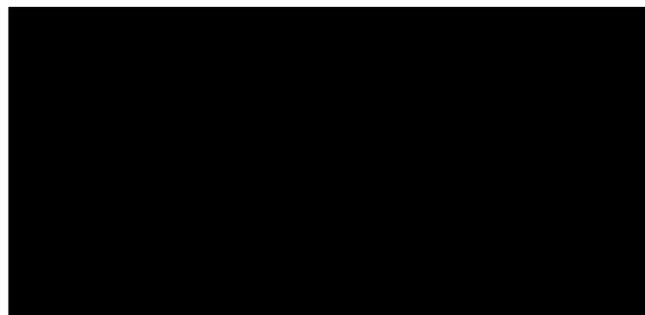


Figure 10 - Spirit trumpet.

³¹ Les trompettes pour l'esprit (spirit trumpets) sont faites de longs cônes d'aluminium tiré du pavillon du phonographe.

Edison, lui-même, probablement influencé par son père, investi dans le champ des sciences psychique³², fait de nombreuses déclarations publiques³³ relatives au développement d'un appareil « nécrophone »³⁴ pouvant « permettre aux défunts de s'exprimer plus clairement que par l'intermédiaire des *tables tournantes*, des *coups frappés* ou de tout autre mode de communication primitif » (Edison 1920, cité dans Baudouin et Berton).

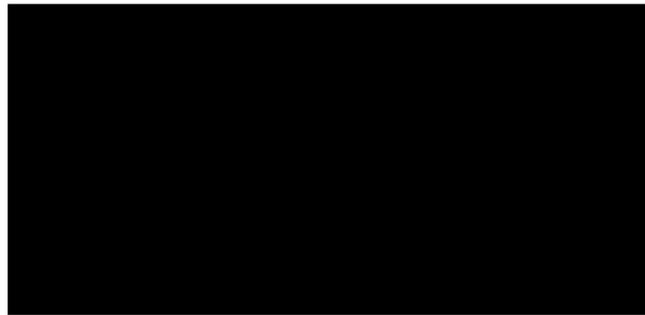


Figure 11 - « Edison's Own Secret Spirit Experiments », *Modern Mechanix*, octobre 1933, p.34-6.

Plus près de nous, l'illusionniste Uri Geller tord des cuillères en métal, par la seule force de son esprit, et berne jusqu'à la CIA (CIA s.d.) (programme *Stargate*)³⁵. C'est donc de cet imaginaire

³² Thomas Edison, *The Papers of Thomas A. Edison*, Reese V. Jenkins et al., vol. 4, « The Wizard of Menlo Park : 1878 », Baltimore/Londres, The John Hopkins University Press, 1998.

³³ « Edison Working on How to Communicate with the Next World », *American Magazine*, 1920 ; « Edison's View on Life After Death », *Scientific American*, oct. 1920.

³⁴ Cet appareil imaginé par Edison n'ayant jamais reçu de dénomination particulière, Baudouin et Berton empruntent le terme *nécrophone* à une nouvelle parue dans *Lecture pour tous*, février 1928, pp. 833-839. « Baudouin, dans son essai « Machines nécrophoniques », emploie le terme de « nécrophone », se référant ainsi au concept de « nécrophonie » forgé par Alexandre Castant dans son ouvrage *Planètes sonores. Radiophonie, Arts, Cinéma* (Paris, Monografik, 2010) pour souligner le caractère « médiumnique » du son enregistré et/ou transmis (phonographe, magnétophone, téléphone, radio). Castant insiste sur ce qui relie le son à la mort, de par l'étrangeté de sa manifestation sous la forme d'une « présence-absence » à celui qui écoute. Phénomène par nature invisible, le son est avant tout perçu sous une forme spectrale, tel un revenant » (Baudouin et Berton, p.72).

³⁵ CIA document release 2000/08/10. Repéré à : <https://www.cia.gov/library/readingroom/docs/CIA-RDP96-00791R000100480003-3.pdf>

que l'idée d'un projet interactif ICM est née. L'idée qu'un objet pouvait être manipulé directement par l'esprit semblait, en elle-même, pouvoir porter ce projet.

La troisième incarnation du projet est née d'une nécessité de recherche conceptuelle et esthétique. Convaincue que l'approche ICM était la voie à prendre, l'investigation du principe de neurofeedback m'a ensuite mené vers le concept de *boucle étrange* développé par le philosophe Douglas R. Hofstadter. Celui-ci explore le sens du *soi* à travers ce qu'il nomme « de petits miracles d'autoréférence ». Son livre *Je suis une boucle étrange* propose ainsi une sorte de révolution escherienne du *soi*. Je visualise alors une expérience immersive interactive et ludique où l'utilisateur, muni qu'un casque EEG, lisant l'activité électrique de son cerveau, entre en résonance avec une série de boucles animées qui s'assemblent pour composer un autoportrait étrange et singulier.

Trois incarnations, *Les papillons de l'esprit* de Cajal, *Télékinésium* et *Je suis une boucle étrange* représente mes tentatives d'imager une certaine symbolique *externaliste* du *soi* comme suite logique de ma série expérimentale. Maintenant, voyons comment l'examen des modalités de création d'une interface ICM fut révélateur des questions identitaires associées au jumelage humain-machine.

Les étapes séquentielles d'un système ICM

Onde cérébrale : potentiel d'action et potentiel évoqué

Pour faire une analogie avec la théorie du *Big Bang* (où le monde commence dans le plus grand des mystères (avec une singularité³⁶) pour ensuite se déployer en un « champ quantique »³⁷ où l'état du système est représenté par une fonction d'onde), nous pouvons penser

³⁶ L'instant 0 de l'univers. Mais cette théorie est contestée par certains modèles tels que le CCC «Conformal Cyclic Cosmology» du physicien Roger Penrose.

³⁷ Le « champ quantique » tire son nom de la combinaison entre la notion classique de champ et les principes de la mécanique quantique. La théorie des quanta ou théorie quantique, stipule que l'énergie rayonnante (photons, etc.) est discontinue. Les quanta sont la quantité minimale, les « grains » composant cette énergie.

le cerveau comme cette première onde : un *potentiel d'action*³⁸. Déclenchée suite à un stimulus, cette onde prend environs 300 millisecondes avant d'être perçue consciemment (voir, *accès à la conscience*, Dehaene, chapitre 1). Sur cette base, une étude de 2009 (Schnakers, et al. 2009) montre que pour 40 % des patients, identifiés comme *végétatifs*, un diagnostic incorrect avait été posé. Ils ont démontré que l'apparition de l'onde *P300*, malgré leur immobilité, attestait de leur état de conscience (*locked-in syndrome*). Dans un autre registre, mais toujours sur cette base temporelle, nous pouvons inférer que la source de nos actions précède toujours la prise de conscience. Cette constatation, semblant remettre en cause notre définition du libre arbitre, est d'une importance considérable pour les interfaces ICM (voir les expériences du chercheur américain Benjamin Libet reprise par le chercheur allemand John-Dylan Haynes)³⁹. Le fait que l'accès à la conscience soit relativement lent ouvre ainsi une large fenêtre temporelle pour les interactions cerveau-machine. Par exemple, la reconnaissance visuelle des systèmes d'apprentissage machine étant largement en dessous des 300 ms, a permis en 2008 au laboratoire Ishikawa Senoo de développer un robot, JanKen, qui, au jeu de roche-papier-ciseaux, gagne systématiquement toutes les parties contre son adversaire humain⁴⁰.

Après cette introduction, revenons aux étapes séquentielles d'un système ICM. Commençons par définir le fonctionnement électrique d'un neurone et établir ce qu'est un *potentiel d'action*⁴¹. Au repos, les neurones, grâce aux ions (sodium, potassium, chlore, etc.) présents à l'extérieur et à l'intérieur des cellules, sont chargés électriquement. Lorsque le neurone est excité, il se dépolarise et crée ce que l'on nomme un potentiel d'action. Les *potentiels d'action* (PA) du cerveau codent l'information en *fréquence*. Celle-ci est causée par la dépolarisation des synapses

³⁸ L'analogie veut illustrer le début de la propagation d'une onde. L'aspect quantique de l'électricité neuronale, en lien avec l'esprit, n'est pas visé ici. Pour plus d'information sur ces théories se référer aux travaux de Stuart Hameroff, Roger Penrose et Henry Stapp sur la cohérence et la décohérence quantiques de l'esprit.

³⁹ Libet, Benjamin, W.W. Alberts, E.W. Wright Jr., and B. Feinstein (1972), "Cortical and Thalamic Activation in Conscious Sensory Experience", in G.G. Somjen (ed.), *Neurophysiology Studied in Man*, Amsterdam: Excerpta Medica. Libet, Benjamin, Curtis A. Gleason, Elwood W. Wright, and Dennis K. Pearl (1983), "Time of Conscious Intention to Act in Relation to Onset of Cerebral Activity (Readiness-Potential): The Unconscious Initiation of a Freely Voluntary Act", *Brain* 106 (3):623-642. Soon, Chun, Brass, Marcel, Heinze, Hans-Jochen and Haynes, John-Dylan. (2008). "Unconscious Determinants of Free Decisions in the Human Brain". *Nature Neuroscience*. 11. 543-5. 10.1038/nn.2112.

⁴⁰ Le laboratoire Ishikawa Senoo décrit ce système dans le rapport *Recognition and Behaviour in Smart Systems* (Laboratoire Ishikawa Senoo s.d.)

⁴¹ Ces informations proviennent de : <https://www.unige.ch/medecine/neuf/files/3814/0369/8111/neurone.pdf>

neuronales qui, en ouvrant les canaux ioniques et en libérant les neurotransmetteurs (ions), ont toujours la même amplitude et le même découpage temporel. Les canaux ioniques sont donc ouverts ou fermés (binaires) et par conséquent, un neurone ne peut transmettre de l'information qu'en variant la *fréquence* de ses *potentiels d'action*. La fréquence de ces oscillations est calculée en hertz (Hz) et cinq grandes catégories permettent de classer les ondes cérébrales (figure 12) : Delta (1-3Hz), Thêta (3,5-8Hz), Alpha (8-13 Hz), Bêta (12-33 Hz) et Gamma (25-100 Hz).

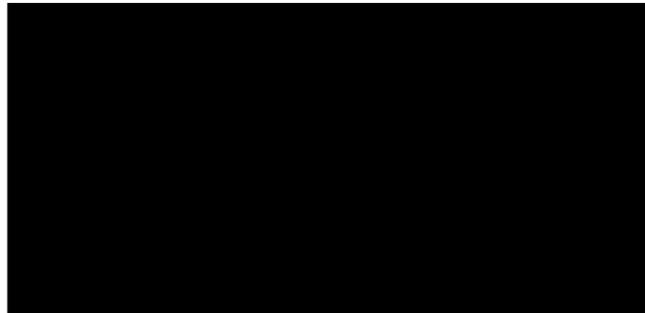


Figure 12 - Humain Brainwave. Site web (2018) <http://www.chosemuse.com>

L'*amplitude* de ces ondes manifeste l'importance de l'activité cérébrale et est associée aux nombres de neurones qui, en s'activant, se synchronisent suite à un stimulus tels que le volume sonore ou l'intensité lumineuse. Le temps de *latence* est quant à lui lié à la durée qui sépare le stimulus de l'apparition de l'onde.

Depuis Canton et Hans, une série d'ondes spécifiques, ayant leur temps de latence propre, a été répertoriée. Comme nous l'avons vu plus haut, ces ondes, nommées *potentiel évoqué (PE)*, désignent la modification (la synchronisation) du *potentiel d'action (PA)* produite par le système nerveux.

« Ceux-ci semblent refléter l'activité cumulée des potentiels postsynaptiques produits lorsqu'un grand nombre de neurones pyramidaux corticaux orientés de manière similaire (de l'ordre de milliers ou de millions) se synchronisent en traitant des informations » (Nam et al., p.34).

Pour reprendre l'analogie du Big Bang, l'analyse EEG des *potentiels évoqués* fournit un moyen non invasif d'effectuer, à la manière des télescopes, un retour temporel sur le traitement de l'information neuronale milliseconde par milliseconde.

« Chez l'homme, ces ondes peuvent être divisées en deux catégories. Les ondes précoces, ou les composantes atteignant un pic ~100 ms après le stimulus sont appelées « sensorielles » ou « exogènes », car elles dépendent largement des paramètres physiques du stimulus. Après 100 ms, les ondes cérébrales semblent refléter la manière dont le sujet évalue un stimulus et sont appelées « cognitives » ou « endogènes ». Ces ondes peuvent avoir des déflexions négatives ou positives » (Sur et Sinha 2009).

Voilà un exemple de nomenclature : P50 (déflexion positive, temps de latence de 50 ms), N100 (déflexion négative, temps de latence de 100 ms.). Il est important de noter que ces ondes ne représentent pas un potentiel cérébral lié à une zone spécifique du cerveau, mais un ensemble largement distribué. En ce sens la cognition est distribuée dans l'ensemble du système neuronal (voir, *la pensée distribuée*, chapitre 2).

Calibration et paradigmes

La calibration d'un ICM se fait sur ces ondes en évoquant une série de paradigmes les sollicitant. Prenons l'exemple de l'onde P300. C'est en 1964 que les chercheurs Chapman et Bragdon ont remarqué que l'activité cérébrale augmentait en amplitude, aux alentours des 300 ms, lorsqu'un stimulus inattendu était présenté au sujet (Chapman et Bragdon 1964). C'est sur cette découverte qu'une procédure appelée « le paradigme du OddBall » a été développée dans le but précis de provoquer cette onde (Squires, Squires et Hillyard 1975). Pour ce faire, on présente à un sujet un minimum de deux stimuli différents. Dans l'exemple ci-bas (figure 13), les stimuli visuels sont présentés dans une séquence temporelle. Le stimulus relatif au cercle de couleur verte se présente souvent et il est ainsi nommé stimulus « fréquent » ou « non ciblé ». Le cercle de couleur rose est, quant à lui, rarement présenté et il est appelé stimulus « rare » ou

« ciblé ». Ainsi, l'apparition du cercle rose nous renseigne ainsi sur l'activité cognitive du sujet qui évalue la pertinence du stimulus donné pour la tâche (Wenzel, Bogojeski et Blankertz, citée dans Nam, Nijholt et Lotte 2017, p. 344) (figure 14).

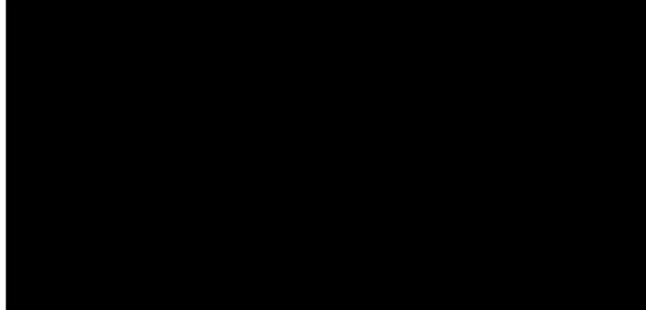


Figure 13 - Paradigme «Oddball» dans le domaine visuel (Daltrozzi et Conway 2014).

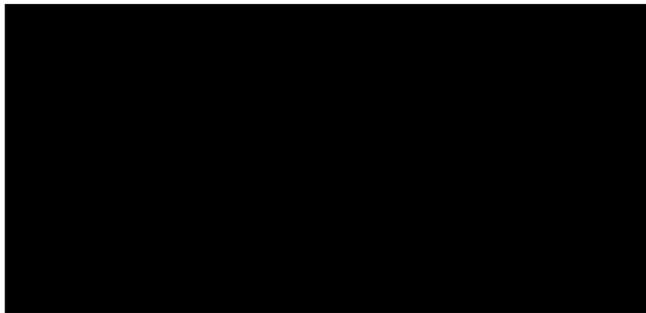


Figure 14 - Forme d'onde obtenue grâce au paradigme oddball (Mc Laughlin, et al. 2013).

Une application orthographique, encore très populaire aujourd'hui, et qui porte le nom de « P300 speller », est proposée dans un article inaugural publié en 1988 par Farwell et Donchin et (Farwell et Donchin 1988).

Les casques EEG

La topologie fonctionnelle du cerveau est d'une grande importance pour le ICM qui cherche constamment de nouveaux modèles pour isoler certaines ondes cérébrales liées à une activité cognitive spécifique. Pourtant, la localisation d'un signal EEG n'est pas chose aisée ; elle est même présentée comme théoriquement impossible par la recherche sur les traitements de signaux qui l'identifie sous le nom du *problème inversé*. Pour localiser un signal EEG, représenté par une différence de tension - *amplification différentielle* - entre deux emplacements, le placement des électrodes ainsi que leur nombre est fondamental et permet de bonnes suppositions (Blankertz 2018).

Pour ces raisons, le choix d'un protocole de calibration est défini selon la localisation « générale » d'une activité cognitive (la vision dans le lobe temporal, le langage dans la zone de Broca, etc.). Par exemple, dans la première phase de développement de *Télékinésium* nous avons utilisé le casque EEG Muse (figure 15) comportant 4 électrodes frontales (vertex) et deux mastoïdes (ground - électrodes de références).

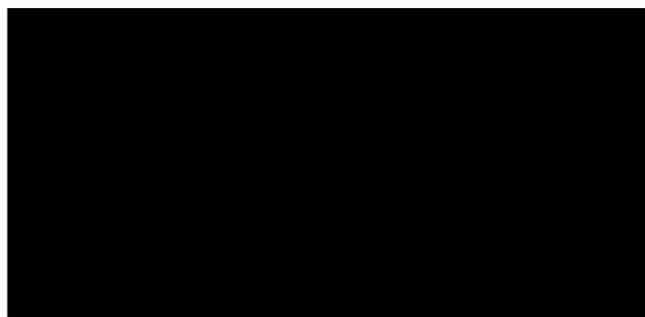


Figure 15 - Site web (2018) <http://www.chosemuse.com>

En guise de comparaison, le standard EEG international *10-20* en comprend 71 (figure 16).

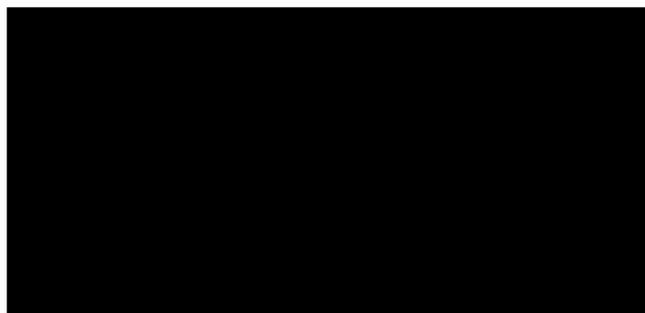


Figure 16 - Standard EEG international 10-20.

Ainsi, les protocoles de calibration que nous avons utilisés devaient tenir compte de l'activité cognitive détectable au niveau du lobe frontal. D'un point de vue clinique, ces modèles sont nommés *paradigmes*. Un paradigme ICM est l'approche choisie pour le système et englobe tous ses aspects (équipement, environnement, flux de l'expérience, paramètres utilisés, description des participants, etc.). L'ensemble de ces principes et méthodes assure que l'expérience puisse être reproduite efficacement, analysée et comparée par la communauté scientifique. Comme le souligne Thomas Kuhn, qui mit de l'avant ce terme en 1962 dans *La Structure des révolutions scientifiques*, un paradigme est un modèle à suivre qui fait autorité pour un temps et qui sera éventuellement amené à être remplacé par un autre. Dans une perspective humaniste éthologique, le choix d'un paradigme ICM, pour l'investigation de la pensée, est révélateur d'une certaine vision, ou conception de soi-même :

« La façon dont on se voit et se conçoit en tant qu'individus (homme, femme, groupe, etc.) est liée au regard que l'on porte. Quand on regarde dans un certain sens on voit le monde d'une certaine manière. Un paradigme organise une certaine vision des choses. La difficulté pour envisager d'autres paradigmes c'est qu'il faut lâcher une certaine vision de soi pour en trouver une autre » (Nifle s.d.).

À la lumière de ces descriptions, six paradigmes permettant d'associer une signature électrique spécifique à une activité cognitive ont été proposés par *NeuroTechX*. Définis comme productifs

par une étude publiée sur PLoS One, ceux-ci tiennent compte des préférences variées d'un bassin d'utilisateurs large (mathématique, lecture, rotation mentale, association, mémoire visuelle spatiale, choix libre) (Friedrich, Neuper et Scherer).

Le premier exercice cognitif du prototype *Télékinésium*, sollicitant l'activité cognitive associée au lobe frontal, est *mathématique*. Pour ce faire, il présente, sur un écran, un nombre aléatoire à partir duquel l'utilisateur doit s'efforcer de compter à rebours avec des sauts dont la valeur est définie par un second nombre aléatoire. Par exemple, il sera demandé de compter à l'envers à partir de 75 par saut de 3. Le deuxième, lié à la *lecture*, présente une phrase aléatoire qu'il faut lire, à répétition, pour la durée entière de la calibration. Le troisième exige une *rotation mentale* de deux formes choisies aléatoirement, la première tournant au-dessus de la seconde. Il s'agira, par exemple, d'imaginer un cube rose tournant au-dessus d'un cône orange. Le quatrième, fondée sur l'*association*, propose une lettre aléatoire à partir de laquelle un maximum de mots commençant par cette lettre doit être trouvé. Le cinquième, qui repose sur la *mémoire spatiale visuelle*, suggère de se rappeler, dans les détails, du chemin pris pour se rendre au lieu actuel. Enfin, le sixième, qui introduit un *choix libre*, est ouvert et offre la possibilité de choisir une activité cognitive de son choix. Un état neutre est également calibré. C'est celui-ci qui devrait permettre à l'utilisateur, en passant d'un état neutre à l'état induit par un des six paradigmes choisis, d'actionner la *commande mentale* qui déclenchera l'animation de la barre métallique à l'écran.

Pour finir, mentionnons que ces six paradigmes sont catégorisés en tant que ICM *actif*, car les ondes cérébrales sont modulées par l'utilisateur. Le P300, quant à lui, est un ICM *réactif* du fait qu'il repose sur la détection de potentiels cérébraux générés en réponse à un stimulus (Nam, Nijholt et Lotte 2017, p. 613). Il existe une autre catégorie, qualifiée de ICM *passif*, où le système s'adapte automatiquement aux fluctuations cérébrales de l'utilisateur et où aucune instruction spécifique est demandée. Ce dernier ne permet pas de commande mentale intentionnelle.

Télékinésium : configuration technique du prototype

À la lumière de ces informations, nous pouvons qualifier ce prototype de ICM *actif*, car ce sont les efforts mentaux *endogènes* du sujet qui modulent l'activité EEG. L'interface, à

travers la visualisation des ondes hertziennes du cerveau (*neurofeedback*), offre au sujet un entraînement qui lui permet de moduler ou de maintenir son activité cérébrale. Ce système, en *boucle fermée*, s'adapte *automatiquement* (selon un *apprentissage machine*) aux signaux EEG reçus afin de détecter et d'agir sur les états cognitifs du sujet de manière autonome. Enfin, le *mode d'opération est asynchrone*, car les paramètres de l'expérience sont contrôlés par le sujet au moment où il le souhaite (figure 17).

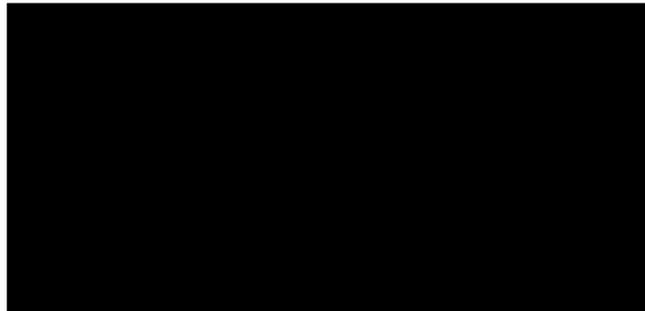


Figure 17 - L'architecture du prototype *Télékinésium* fournie par NeuroTechX.

Télékinésium : évaluation du prototype

Comme mentionné plus haut, les trois participants au prototype ont noté que l'impression qu'une corrélation directe entre la modulation « endogène » d'un état cognitif et l'activation de l'animation était faible. Relativement à la récurrence de ce sentiment, plusieurs hypothèses sont émises. La première est que le nombre limité d'électrodes sur le casque MUSE (4 vertex frontaux) ne permettrait pas d'évoquer des paradigmes optimaux pour une *commande mentale*. En ce sens, la littérature ICM semble favoriser des paradigmes sollicitant *l'imagination motrice* sur les *potentiels évoqués*. Les paradigmes basés sur l'imagerie motrice sont calibrés sur les

rythmes sensorimoteurs (SMR), notamment le rythme *mu* de la partie sensorimotrice du cortex (Nam, Nijholt et Lotte 2017, p. 2). La zone d'intérêt pour l'*imagerie motrice*, située dans une bande linéaire entre les deux oreilles, n'est pas couverte par le casque MUSE (figure 18).

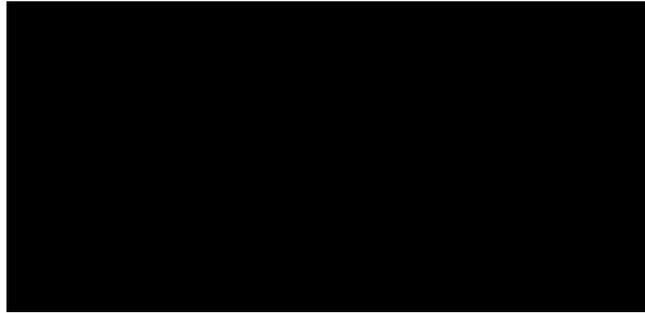


Figure 18 - Cortex moteur

Ainsi, le rythme *mu* (compris entre 8 et 12 hertz et associé aux neurones miroirs ou MNS) est largement diminué (désynchronisé) lorsqu'un individu se prépare mentalement à amorcer un mouvement ou qu'il imagine celui-ci (Gastaut et Bert 1954). C'est aux États-Unis que Jonathan Wolpaw et ses collègues ont développé pour la première fois ce type de paradigme (Wolpaw, et al. 1991). Avec cette approche, les utilisateurs, arrivent à autoréguler l'amplitude de leur activité SMR, grâce au *neurofeedback* (Nam, Nijholt et Lotte 2017, p. 2). Pour cette raison, il apparaît pertinent de tester l'hypothèse de l'*imagination motrice* en utilisant des casques EEG comme *Emotiv* ou *openBCI* qui permettent la lecture du rythme *mu*. D'autres paradigmes tels que les SCP (les potentiels corticaux lents) et les SSVEPs (les *steady-state visual evoked potential*) pourraient également être examinés. La deuxième hypothèse remet en question l'expérience usager. Pour l'instant l'interface ICM n'affiche pas de jauge (0-100%) permettant la visualisation des états cognitifs. Bien que cette information visuelle puisse parasiter le signal EEG, elle apparaît, à l'heure actuelle, nécessaire au bon apprentissage par neurofeedback. Selon la troisième hypothèse, le protocole de calibration, c'est-à-dire les indications visuelles ou sonores nécessaires à la calibration, est à revoir. Par exemple, dans le prototype, la calibration de l'état neutre demande textuellement à l'utilisateur de « penser au vide ». Cette demande est

paradoxe et ne peut naturellement pas induire la calibration neutre demandée. Selon la quatrième hypothèse, nous pourrions combiner les signaux EEG aux signaux EMG (électromyographie) ou EOG (électrooculographie). L'*amplitude* de ces signaux électro-musculaires offre une qualité de commande largement supérieure à l'électricité neuronale. Le désavantage est que leurs emplois amenuiseraient la force conceptuelle du projet soit, la télékinésie. Malgré ces hypothèses, il faut garder en tête qu'une des problématiques contemporaines des ICM *actifs* est que leur taux de succès, hors laboratoire, dépasse rarement les 85 %.

En conclusion, les grandes étapes d'un système ICM sont : le choix du paradigme, l'acquisition du signal, le prétraitement, l'extraction de ses caractéristiques, la classification (ciblée ou non ciblée), la décision de sortie, la conversion de la prédiction en commande et l'utilisation de la commande par le système ICM. Pour permettre aux utilisateurs de réguler naturellement leur activité neuronale, le traitement du signal doit être réalisé en moins de 100 ms et la mise à jour du signal de sortie doit être faite au moins vingt fois par seconde. À ce débit, le logiciel ICM a moins de 50 ms pour effectuer les calculs d'acquisition, le traitement du signal et le retour de signaux (Nam, Nijholt et Lotte 2017, p. 323).

Utopie et manipulation

Les ICM semblent porter en elles l'utopie de la libération de l'esprit des contraintes physique du corps où la pensée peut interagir avec le monde sans passer par son système nerveux périphérique. Cette idée, vieille de plus de trois quarts de siècle (Wolpaw et Wolpaw 2012), semble bien naïve dans la mesure où, comme notre recherche en fait foi, la nature et les contours de l'esprit nous échappent toujours. De plus, comme semblent l'indiquer le développement de *Télékinésium* et la recherche scientifique, les succès des ICM, hors des environnements contrôlés des laboratoires, restent mitigés. D'autre part, une libération des contraintes biologiques n'implique-t-elle pas, dans le cas présent, un assujettissement (impliquant de nouvelles contraintes) au numérique ?

D'autre part, la peur d'une manipulation amplifiée par les ICM semble apparentée au concept du Dieu trompeur de Descartes. En ce sens, l'illusion biologique et l'illusion numérique suscitent les mêmes questionnements sur la nature de la réalité. De plus, pour qu'il y ait réellement manipulation par les ICM, cela suppose, comme le soulignent Fisher et Sucfirman, une compréhension partagée du monde entre machine et humain. Cela implique l'adhérence à la position A.I. forte :

« La référence en matière de communication et de coopération naturelles repose largement sur une compréhension partagée du monde [...] et implique un modèle commun des comportements appropriés. » (Fischer, cité dans Nam, Nijholt et Lotte 2017, p. 81).

Pour l'instant, la logique *unidirectionnelle* des ICM rend la communication humain-machine profondément asymétrique et non assimilable par les deux partis : le code d'un côté et la pensée abstraite humaine de l'autre. Pourtant, dans un contexte de création, ce partage non équitable de l'information, à terme, a le pouvoir de redéfinir la relation de l'artiste à sa création. Ainsi, dans un contexte industriel, l'arrivée d'outils ICM d'analyse émotionnelle⁴² réorganise aujourd'hui les relations entre créateur, producteur et distributeur.

La compagnie montréalaise Beam Me Up⁴¹ propose déjà une interface⁴³ permettant l'analyse émotionnelle, en direct, d'un spectateur placé devant un film ou tout autre document visuel ou sonore. Dans un contexte commercial, cette interface identifiant les émotions vécues à tel ou tel moment du visionnement offre des données « d'apparences objectives » pouvant être utilisées pour rejoindre un public spécifique. Devant ces informations nouvelles, le rapport entre créateurs et producteurs s'en voit transformé. Ainsi, les données non objectives et non quantifiables, telles que la vision esthétique d'un auteur, peu être délaissée dans un but d'optimisation commerciale.

⁴² L'entreprise montréalaise *Beam Me Up* offre ce service depuis 2017. Site web : <http://www.bmu.co>
<http://www.bmu.co/2018/08/quicker-and-clearer-access-to-brain-data-insights/>

⁴³ L'interface calibrant les données EEG sur le modèle théorique de Russell. Russell, James A. 1980. «A circumplex model of affect.» *Journal of Personality and Social Psychology* (39): 1161–1178.

Les ICM font également face à plusieurs difficultés. L'une d'entre elles est le problème de la vérification de la tâche demandée lors de la période de calibration. Pour cela, aucune donnée empirique, sur la façon dont l'activité cérébrale est liée à une tâche cognitive, n'est réellement disponible (Nam, Nijholt et Lotte 2017, p. 60) (voir *l'expérience de pensée de la chambre chinoise*, chapitre 2). De plus, les corrélations entre électricité et cognition ne nous informent pas complètement sur l'intentionnalité des sujets. Par exemple, savoir que le rythme *mu* est désynchronisé chez un individu visualisant un mouvement spécifique (ex. une course), ne nous informe nullement sur le sens de celui-ci (l'intention derrière ce mouvement). Malgré tout, la recherche fondamentale en neuro-imagerie avance rapidement et fournit de plus en plus d'informations axiomatiques permettant de caractériser l'activité cérébrale (Nam, Nijholt et Lotte 2017, p. 59).

Pour conclure ce chapitre, malgré les problèmes évoqués, le fantasma électrique semble être une nouvelle fois réactivé à travers les utopies ICM. Il est donc aisé de postuler que, sur la base de l'information, les A.I. seront un jour considérés comme des agents interactifs autonomes. Dans un couplage humain-machine, ces agents pouvant agir sur *nos ondes* « *sensorielles* » (avant 100 ms), pourraient affecter nos *états mentaux*, bien avant que nous en soyons conscients. Bien qu'il existe un écart ontologique entre information et compréhension (voir *David Chalmers : le problème facile et le problème difficile*, chapitre 2), à quel point notre pensée serait affectée par ces manipulations ? L'impossibilité de savoir qui est l'initiateur ultime de l'action me semble profondément redéfinir la notion du *soi*.

« With this autonomously operating system originally having learned from our own subjective responses to various actions and contexts, it may at some point become unclear who was the ultimate initiator of the action, by whose authority the action was executed, or who, in fact, “acted.” As the lines separating the two interactive agents, human and machine, become blurred, merely the interaction itself remains » (Nam et coll., p. 81).

Conclusion

De par leur récente démocratisation, les interfaces cerveau-machine occupent une place bien particulière dans le monde des applications cinétiques et ouvrent de nouvelles avenues aux artistes. La nature éminemment multidisciplinaire, théorique et pratique, de ce médium pose un défi de taille. En ce sens, une connaissance large basée sur les fondements neurologiques de la pensée, les outils de visualisation (EEG, IRMI f) et l'emploi des algorithmes d'apprentissage machine, est nécessaire pour créer une commande mentale spécifique calibrée sur l'activité cognitive de l'utilisateur. Toutefois, ce n'est pas la première fois que science et art s'associent dans une technologie de prime abord complexe. Au terme de notre projet, nous constatons que de nos trois axes de recherche (une brève histoire de la visualisation du cerveau, la pensée-image, *Télékénésium* : une interface cerveau-machine) resurgissent des questions identitaires liées à l'ouverture de l'ultime espace privé qu'est le cerveau. Nous avons vu que l'investigation de la pensée, à travers sa visualisation, trace une nouvelle topologie du *soi* en modifiant le rapport que le sujet entretient avec lui-même.

Relativement au prototypage du projet *Télékinésium*, nous avons vu que lorsque l'art s'imisce littéralement dans nos têtes, pour faire de notre activité électrique endogène son médium de création, il transforme également la filiation de l'artiste face à son œuvre. Ainsi, les ICM comme la réalité virtuelle permettent une forme de *perception étendue* du monde où, dans un rapport de comparaison avec le réel, notre expérience visuelle et proprioceptive est transformée.

En ma qualité de cinéaste d'animation, j'entrevois que l'arrivée des ICM, hors des applications médicales et thérapeutiques, contribuera à l'acquisition de connaissances nouvelles sur le fonctionnement de l'esprit au travail.

Bibliographie

- Alhazen, Mark Smith A. 2001. *Alhacen's Theory of Visual Perception: A Critical Edition, with English Translation and Commentary, of the First Three Books of Alhacen's De Aspectibus, the Medieval Latin Version of Ibn Al-Haytham's Kitab Al-Manazir*. Vol. 1-2. American Philosophical Society.
2011. *Shock and Awe: The Story of Electricity*. Produit par BBC four. Interprété par Jim Al-Khalili.
- Amzica, Florin, et Fernando Lopes da Silva. 2010. «Cellular Substrates of Brain Rhythms.» Dans *Niedermeyer's Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields*, de Donald L. Schomer et Fernando Lopes da Silva, 33–63. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.
- Anzieu, Didier. 1994. *Le moi-peau*. Paris: Dunod.
- Bach, Roger, Damian Pope, Sy-Hwang Liou, et Herman Batelaan. 2013. «Controlled double-slit electron diffraction.» *New Journal of Physics* 15.
- Bartlett, Mel. 2000. «In the brain, the model is the goal.» *Nature Neuroscience* 3.
- Baudouin, Philippe, et Mireille Berton. 2015. «Les spectres magnétiques de Thomas Alva Edison : Cinématographie, phonographie et sciences des fantômes.» *Open edition 2* (76): 66-93.
- Bedau, Mark A., et Paul Humphreys. 2007. *Emergence: Contemporary Readings in Philosophy and Science*. Cambridge : The MIT Press.
- Bégouën, Robert, Jean Clottes, Valérie Feruglio, et Andreas Pastoors. 2014. *La caverne des Trois-Frères : Anthologie d'un exceptionnel sanctuaire préhistorique*. Paris: l'Association Louis Bégouën.
- Berger, Hans. 1929. «Über das Elektrenkephalogramm des Menschen (On the human electroencephalogram).» *Archiv f. Psychiatrie u. Nervenkrankheiten* (87): 527-570.
- Bideaud, J., et Y. Courbois. 1998. *Image mentale et développement ? De la théorie piagétienne aux neurosciences cognitives*. Paris: PUF.
- Biggs, Robert D. 2005. «Medicine, Surgery, and Public Health in Ancient Mesopotamia.» *Journal of Assyrian Academic Studies* 19 (1).

- Blondel, Christine, et Bertrand Wolff. 2011. «Histoire de l'électricité et du magnétisme : Galvani et «l'électricité animale»» CNRS. Accès le 12 1, 2018. <http://www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique/galvani-volta/galvani>.
- Borvon, Gérard. 2009. *Histoire de l'électricité: de l'ambre à l'électron*. Paris: Vuibert.
- Bruch, Jean-Frédéric, Damien Sizaret, Antoine Brault, Flore Tabareau-Delalande, et Frédéric Maître. 2015. «Étude historique du microscope optique : Des premières lentilles du XVIe siècle aux techniques de super-résolution et de lecture automatisée.» *Revue francophone des laboratoires* (468): 67-79.
- Cajal, S. R. 1909-11 (1904). *Textura del sistema nervioso del hombre y de los (Histologie du système nerveux de l'homme et des vertébrés)*. Traduit par Translated by L. Azoulay. Paris: Maloine.
- Caton, Richard. 1875. «Electrical currents of the brain.» *British Medical Journal* 2: 278.
- Cauchy, Thomas. 2007. «Système magnétique complexe avec des métaux de transition.» *Doctorat Université d'Angers et de Barcelone*.
- Cayotte, Jacques. 1976. «La médecine aux temps préhistoriques.» *Mémoires de l'Académie nationale de Metz* (Académie nationale de Metz) 285-304.
- Cerveau et Psycho. s.d. <https://www.cerveauetpsycho.fr/sd/neurosciences/le-test-du-gorille-invisible-9702.php>.
- Chalmers, David. 2014. «20th Anniversary Conference. Toward a Science of Consciousness.» 21-26 April. <https://www.youtube.com/watch?v=JoZsAsgOSes>.
- . 1996. *The Conscious Mind: In Search of a Fundamental Theory*. New York: Oxford University Press.
- Chalmers, David, et Andy Clark. 1998. «The Extended Mind.» *Analysis* 58 (1): 10-23.
- Chapman, R. M., et H. R. Bragdon. 1964. «Evoked responses to numerical and non-numerical visual stimuli while problem solving.» *Nature* (203): 1155-1157.
- Chomsky, Noam. 1957. *Syntactic Structures*. The Hague: Mouton & Co.
- CIA. s.d. «document release.» <https://www.cia.gov/library/readingroom/docs/CIA-RDP96-00791R000100480003-3.pdf>.
- Clark, A. 2008. «Pressing the Flesh: A Tension in the Study of the Embodied, Embedded Mind?» *Philosophy and Phenomenological Research* 56 (1): 37-59.

- Clark, Andy. 1997. *Being There : Putting Brain, Body and World Together Again*. Cambridge: MIT Press.
- Cyr, Yan. s.d. *Beam Me Up*. Accès le 12 1, 2018. <http://www.bmu.co/2018/08/quicker-and-clearer-access-to-brain-data-insights/> .
- da Silva, Frederick Lopes. 2010. «Origin and Measurement.» De *Technique, and Applications. EEG – fMRI : Physiological Basis*, édité par Christoph Mulert et Louis Lemieux. Berlin: Springer Berlin Heidelberg.
- Daltrozzo, Jérôme, et Christopher Conway. 2014. «Neurocognitive mechanisms of statistical-sequential learning: What do event-related potentials tell us?» *Frontiers in human neuroscience* 8: 437.
- Damasio, Antonio. 2012. *L'Autre moi-même : Les nouvelles cartes du cerveau, de la conscience et des émotions*. Paris: Odile Jacob.
- DeFelipe, Javier. 2010. *Cajal's Butterflies of the Soul: Science and Art*. New York: Oxford University Press.
- Dehaene, Stanislas. 2014. *Le Code de la conscience*. Paris: Odile Jacob.
- Dennett, Daniel C. 1991. *Consciousness Explained*. New York: Little, Brown and Co.
- . 2017. *The Evolution of Minds : From Bacteria to Bach and Back*. London: WW Norton.
- Descarte, René. 2011. «Méditations Métaphysiques.» http://www.ac-grenoble.fr/PhiloSophie/old2/file/descartes_meditations.pdf.
- Dewey, John. 1939. *Art as Experience*. New York: Capricorn Books.
- Dods, J. B. 1852. *Philosophy of electro-biology, or electrical psychology. In a course of nine lectures*. London: Fowler, J. F.
- Dortier, Jean-François. 2013. «Balade parmi les théories de l'esprit.» *Sciences Humaines* 248 (5): 4.
- Douglas C., Prasher, R. O. McCann, M. Longiaru, et M. J. Cormier. 1987. «Sequence comparisons of complementary DNAs encoding aequorin isotypes.» *Biochemistry* 26 (5): 1326–1332.
- Edge. s.d. «Consciousness is a big suitcase.» https://www.edge.org/conversation/marvin_minsky-consciousness-is-a-big-suitcase.

- Esfeld, Michael. 2003. «Der Körper in der Philosophie / Le corps dans la philosophie : L'argument sémantique pour la dépendance corporelle de la pensée.» *Studia Philosophica* (62): 119-131.
- Evrard, Renaud. 2016. *Enquête sur 150 ans de parapsychologie : la légende de l'esprit*. Escalquens: Trajectoire.
- Farwell, L., et E. Donchin. 1988. «Talking off the top of your head: Toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials.» *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 70 (6): 510–523.
- Finger, Stanley. 1994. *Origins of Neuroscience : A History of Explorations into Brain Function*. New York: Oxford University Press.
- Fischer, Gerhard. 2001. «User Modelling and User-Adapted Interaction.» *Springer* 11 (1-2): 65-86.
- Foucault, Michel. 1963. *La Naissance de la clinique*. Paris: Presse universitaire de France.
- Friedrich, Elisabeth V. C., Christa Neuper, et Reinhold Scherer. 2013. «Whatever Works: A Systematic User-Centred Training Protocol to Optimize Brain-Computer Interfacing Individually.» *PLoS One*.
- Galen. 1968. *De usu partium, traduction : On the Usefulness of the Parts of the Body*. Édité par Cornell University Press. Traduit par M. T. May. New York: Ithaca.
- Gastaut, H. J., et J. Bert. 1954. «EEG changes during cinematographic presentation.» *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 6: 433-444.
- Gillot, Pascale, et Garreta, Guillaume. 2012. «Les lieux de l'esprit.» *Intellectica* 1 (57): 7-19.
- Goffart, A. 1900. «Les « Esprits animaux ».» *Revue néo-scholastique* 7 (26): 153-172.
- Harman, Gilbert. 1973. *Thought*. Princeton: Princeton University Press.
- Heil, John. 2013. *Philosophy of mind : a contemporary introduction*. New York: Routledge.
- Hofstadter, Douglas. 2007. *Je suis une boucle étrange*. Traduit par Bella Arman. France: Dunod.
- s.d. *Imagerie super-résolue*. https://www-litc.biotoul.fr/developpement_imagerie.php.
- Juignet, Patrick. 2015. «Les paradigmes scientifiques selon Thomas Kuhn.» *Philosophie, science et société*. Accès le 12 1, 2018. <https://philosciences.com/philosophie-et-science/methode-scientifique-paradigme-scientifique/113-paradigme-scientifique-thomas-kuhn>.
- Kamiya, J. 1968. «Conscious control of brain waves.» *Psychology Today* 1: 56-60.

- Kardek, Allan. 1857. *Le livre des Esprits*. Paris: Édouard Dentu.
- Kosslyn, Stephen. 1980. *Image and Mind*. Cambridge: Harvard University Press.
- Laboratoire Ishikawa Senoo. s.d. *Janken (rock-paper-scissors) robot with 100% winning rate (human-machine cooperation system)*. Accès le 12 1, 2018. <http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/fusion/Janken/index-e.html> .
- . s.d. «Recognition and Behaviour in Smart Systems.» Accès le 12 1, 2018. <http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/Booklet/all-2018.pdf>.
- Le Bihan, Denis. 2012. *Le Cerveau de cristal: Ce que nous révèle la neuro-imagerie*. Paris: Odile Jacob.
- Le Bihan, Denis, Jean-François Mangin, Cyril Poupon, Chris A. Clark, Sabina Pappata, Nicolas Molko, et Hughes Chabriat. 2001. «Diffusion Tensor Imaging: Concepts and Applications.» *Journal of Magnetic Resonance Imaging* (13): 534–546.
- Lescarbourea, Austin C. 1920. «Edison’s View on Life After Death.» (*Scientific American*) 123 (18): 446, 458-460.
- Livet, Jean, Tamily A. Weissman, Hyuno Kang, Ryan W. Draft, Ju Lu, Robyn A. Bennis, Joshua R. Sanes, et Jeff W. Lichtman. 2007. «Transgenic strategies for combinatorial expression of fluorescent proteins in the nervous system.» *Nature* 450: 56–62 .
- Lucrèce. 1954. *De la Nature*. Paris: Librairie Garnier Frères.
- Marr, David. 2010 (1982). *Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information* . Cambridge: The MIT Press.
- Maureille, Bruno. 2004. *Les Premières sépultures: Les origines de la culture* . Paris: Les éditions Le Pommier.
- Mc Laughlin, Myles, Alejandro Lopez Valdes, Laura Viani, P Walshe, J. Smith, Richard Reilly, et F.-G. Zeng. 2013. «Aspectrally rippled noise mismatch negativity paradigm for objectively assessing speech perception in cochlear implant users.» *36th Annual Midwinter Meeting Abstract Book. Baltimore*.
- Millett, David. 2001. «Hans Berger: From Psychic Energy to the EEG .» *Perspectives in Biology and Medicine* (Johns Hopkins University Press) 44 (4): 522-542.
- Modern Mecanic. s.d. «Edison’s Own Secret Spirit Experiments (Oct, 1933).» <http://blog.modernmechanix.com/edisons-own-secret-spirit-experiments/#mmGal>.
- Muse. s.d. Accès le 12 01, 2018. <http://www.choosemuse.com/research/>.

- Nam, Chang S., Anton Nijholt, et Fabien Lotte. 2017. *Brain–Computer Interfaces Handbook : Technological and Theoretical Advances*. New York: CRC Press.
- NEF. s.d. *Rencontre professionnelle sur l'écriture du film d'animation*. Accès le 12 01, 2018. <http://nefanimation.fr/rencontres-formations/rencontre-professionnelle-sur-lecriture-du-cinema-danimation/>.
- NeuroTechX. s.d. Accès le 12 01, 2018. <https://neurotechx.com>.
- Nifle, Roger. s.d. *Youtube*. Accès le 12 1, 2018. <https://www.youtube.com/watch?v=nciSBAwcEZO>.
- Noë, Alva. 2009. *Out of our Heads: Why You Are Not Your Brain, and Other Lessons from the Biology of Consciousness*. New York: Hill and Wang.
- . 2016. *Strange tools: Art and Human nature*. New York: Hill and Wang.
- . 2012. *Varieties of Presence*. Cambridge: Harvard University Press.
- Oxenham, Marc F., Lorna Tilley, Hirofumi Matsumura, Lan Cuong Nguyen, Kim Thuy Nguyen, Kim Dung Nguyen, Kate Domett, et Damien Huffer. 2009. «Paralysis and severe disability requiring intensive care in Neolithic Asia.» *Antropological Science* 117 (2): 107-112.
- Paulus, Jean. 1946. « La perception de la causalité selon M. Michotte van den Berck.» *Revue philosophique de Louvain* 44 (4): 530-547.
- Pera, M. 1996. *The Ambiguous Frog : The Galvani-Volta Controversy on Animal Electricity*. Princeton: Princeton University Press.
- Platon. 2001. *Ion*. Paris: GF Flammarion.
- Putnam, Hilary. 1995. «Les significations ne sont tout simplement pas dans la tête.» Dans *Le langage*, édité par Pascal Ludwig, 124-134. Flammarion.
- . 1981. *Reason, Truth And History*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ricoeur, Paul. 1990. *Soi-même comme un autre*. Paris: Seuil.
- Rivet, Charle. 1922. *Traité de Métapsychique*. Paris: Alcan.
- Russell, James A. 1980. «A circumplex model of affect.» *Journal of Personality and Social Psychology* (39): 1161–1178.
- Salih, H., M. Al-Amri, et M. El Gomati. 2005. «The Miracle of Light.» 3 (2).
- Sauvé, Denis. 1990. «Règles et langage privé chez Wittgenstein : deux interprétations.» *Société de philosophie du Québec* 17 (1): 45-70.

- Schnakers, C., F. Perrin, M. Schabus, R. Hustinx, S. Majerus, G. Moonen, M. Boly, A. Vanhaudenhuyse, M.A. Bruno, et S. Laureys. 2009. «Detecting consciousness in a total locked-in syndrome: an active event-related paradigm.» *Neurocase* 15 (4): 271-277.
- Scoonover, Carl. 2010. *Portraits of the Mind: Visualizing the Brain from Antiquity to the 21st Century*. New York: Abrams.
- Searle, John. R. 1980. «Minds, brains, and programs.» *Behavioral and Brain Sciences* 3 (3): 417-454.
- Silver, D., J. Schrittwieser, K. Simonyan, I. Antonoglou, A. Huang, A. Guez, et T. Hubert. 2017. «Mastering the Game of Go without Human Knowledge .» *Nature* 550: 354-359.
- Simons, Daniel J., et Christopher F. Chabris. 1999. «Gorillas in our midst: sustained inattentive blindness for dynamic events.» *Perception* 28 (9): 1059-1074.
- Snapp, Henry. s.d. «The information philosopher.» <http://www.informationphilosopher.com/solutions/scientists/stapp/>.
- Squires, Nancy K., Kenneth C. Squires, et Steven A. Hillyard. 1975. «Two varieties of long-latency positive waves evoked by unpredictable auditory stimuli in man.» *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 38 (4): 387-401.
- Stanford Encyclopedia of Philosophy. s.d. <https://plato.stanford.edu/entries/mental-imagery/#Des>.
- . s.d. <https://plato.stanford.edu/entries/panpsychism/>.
- Stenger, Victor J., James A. Lindsay, et Peter Boghossian. 2015. «Physicists Are Philosophers, Too.» *Scientific American*.
- Stone, G. W. 1850. *Electro-Biology: or, the Electrical science of life*. Smith E. and Co.
- Strickland, Lloyd. 2014. *Leibniz's Monadology : A New Translation and Guide*. Edinburgh : Edinburgh University Press.
- s.d. *Sub-longueur d'onde optique*. <http://how-to-do.website/2016/06/03/sub-longueur-donde-optique/>.
- Suchman, L. A. 1987. *Plans and Situated Actions: The Problem of Human-Machine Communication*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Sur, Shravani, et V. K. Sinha. 2009. «Event-related potential: An overview .» *Ind Psychiatry* 18 (1): 70-73.
- Tye, Michael. 1991. *The Imagery Debate*. Cambridge: The MIT Press.

- Universe today. s.d. <https://www.universetoday.com/36302/atoms-in-the-universe/>.
- Varela, Francisco J. 1989. *Autonomie et connaissance : Essai sur le Vivant*. Paris : Seuil.
- . (1988) 1996 . *Invitation aux sciences cognitives*. Traduit par Traduit de l'anglais par Pierre Lavoie. Paris: Seuil.
- Vidal, J. J. 1973. «Toward Direct Brain-Computer Communication.» *Annual Review of Biophysics and Bioengineering* 2: 157-180.
- Vulgaris Médical. s.d. *Potentiels évoqués somesthésiques*. Accès le 12 1, 2018. <http://www.vulgaris-medical.com/encyclopedie-medicale/potentiels-evoques-somesthesiques-definition-et-technique-d-enregistrement>.
- Wenzel, M. A., M. Bogojeski, et B. Blankertz. 2017. «Real-time inference of world relevance from electroencephalogram and eye gaze.» *Neural Eng.* 14 (5).
- Wolpaw, J. R., D. J. McFarland, G. W. Neat, et C. A. Forneris. 1991. «An EEG-based brain-computer interface for cursor control.» *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol* (78): 252–259.
- Wolpaw, Jonathan R., et Elizabeth W. Wolpaw. 2012. *Brain Computer Interfaces : Principles and Practice*. New York: Springer-Verlag.
- Ziskind, Bernard, et Bruno Halioua. 2004. «La conception du coeur dans l'Égypte ancienne.» *M/S : médecine sciences*, 04 March: 367–373.

Annexe A

Cette annexe veut rendre compte de deux aspects du travail de prototypage⁴⁴ de *Télékinésium*. 1) Rendre compte plus spécifiquement des procédés techniques qui m'ont permis de réaliser, l'intégration et l'animation des objets métallique sur la plateforme de jeux Unity. 2) Le travail fait par NeurotechX (rendu possible grâce à l'ONF).

1) Résumé de mon travail

Le modèle. Afin de représenter, sous la forme d'une sculpture métallique, un visage humain, un modèle de mon visage a été imprimé en 3D. Subséquent, celui-ci a servi de guide pour le travail de soudure.

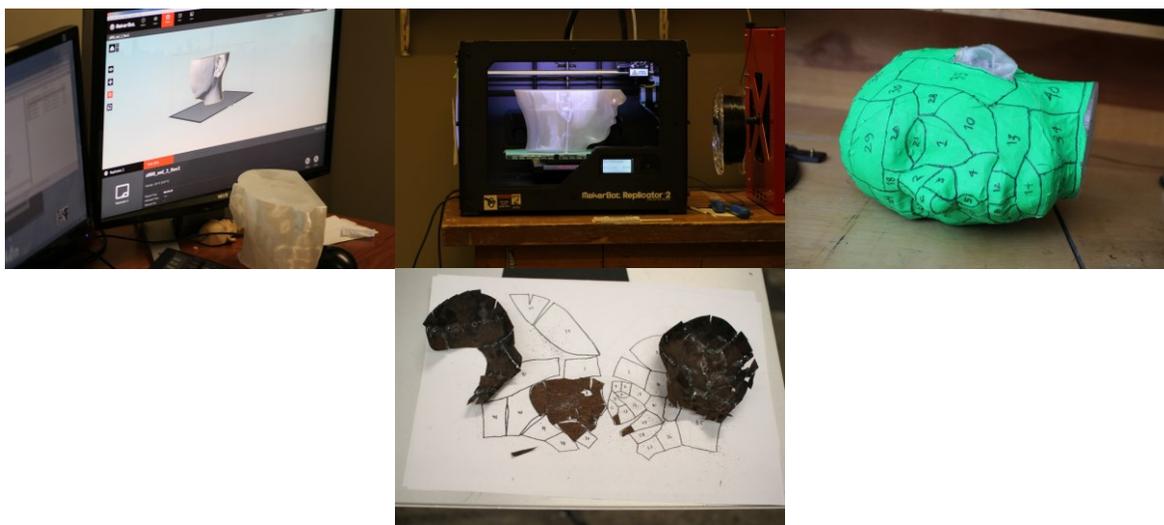


Figure 19 - Impression 3D : guide pour le travail de soudure.

⁴⁴ Le prototypage est vu ici comme une version préliminaire de l'œuvre permettant de bien saisir le potentiel de l'expérience final.

La soudure. Deux tests de soudure ont été réalisés. Le premier, réalisé en *brasure*⁴⁵, c'est avéré inadéquat pour l'assemblage de petites plaques de métal et le deuxième, réalisé au *MIG*⁴⁶ dans le garage #19 de l'ONF, a résolu ce problème en fusionnant les plaques entre elles.



Figure 20 - Plaques métalliques pliées et soudées.

La numérisation et l'intégration. Pour numériser ces objets en 3D et conserver leurs qualités photographiques, nous avons opté pour la photogrammétrie et délaissé des technologies comme la numérisation laser. Une fois l'objet photographié sous tous ces angles, un objet 3D a été généré grâce au logiciel Agisoft. Ensuite, ces objets ont été intégrés à la plateforme de jeux Unity.



Figure 21 - Photographie sur socle mobile (rotation 360°)

⁴⁵ Le brasage des métaux est un procédé d'assemblage (collage) établissant une liaison métallique entre les pièces réunies. Ce lien métallique peut se défaire s'il est nouvellement exposé à la chaleur.

⁴⁶ Le soudage au MIG est un procédé semi-automatique fusionnant les métaux entre eux par l'énergie calorifique dégagée par un arc électrique.

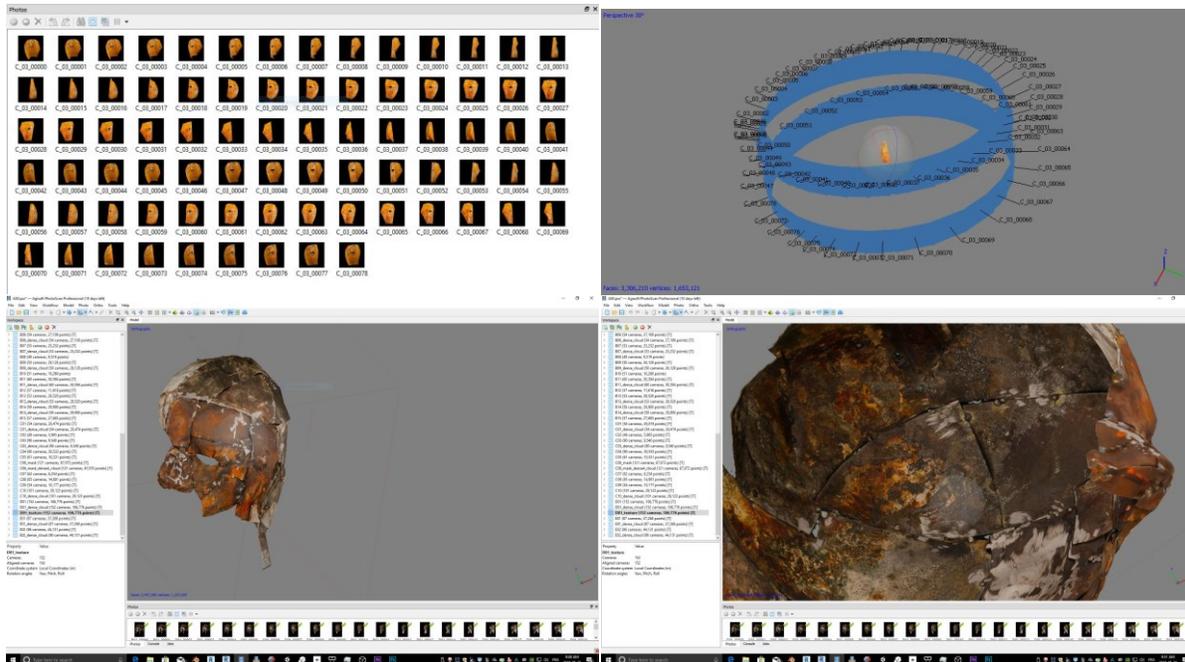


Figure 22 – Modèle 3d : interface Agisof (photoscan).

2) Le travail fait par NeuroTechX

Grâce à l'ONF, nous avons pu bénéficier de l'expertise de NeuroTechX, pour poursuivre le développement de *Télékinésium*. Ainsi nous avons pu corréler les animations (assemblées et simulées dans Unity) aux données EEG du casque MUSE et établir un premier protocole de calibration basé sur deux états cognitifs. Suite à ce travail nous avons créé une commande mentale permettant de moduler les animations en passant consciemment (activement) d'un état à l'autre.

Un dossier de documentation et de transfert d'expertise a été remis à l'ONF en 2018. Voilà une partie de son contenu (page suivante) :

(...)

Installation de l'expérience

- Équipement

- Logiciels

 - Configuration

 - Python 3.6

 - Muse Direct

 - Architecture de répertoires

 - Emplacement des fichiers de l'expérience

Lancement de l'expérience

- Préparation de l'équipement

- Démarrage des logiciels

- Choix des options

- Utilisation des contrôles

Architecture logicielle

- Flux de l'expérience & des données

 - Option d'enregistrement des signaux bruts

- Apprentissage machine

 - Paradigmes BCI

 - État de concentration:

 - Mathématique

 - Lecture

 - Visualisation 3D

 - Association

 - Mémoire spatiale visuelle

 - Au choix de l'utilisateur

 - Calibration

 - Enregistrement des données & résultats

 - Recommencer une calibration

 - Calibrations cumulatives

 - Lissage des résultats de classification

 - Suppression des clignements des yeux

 - Algorithme personnalisé de concentration

 - Visuels indépendants de l'expérience

 - État du casque cérébral

 - Signaux bruts

 - Bandes de fréquences

 - Résultats de calibration

 - Contact des électrodes & qualité des signaux

(...)