

Sciences Cognitives

Cours d'introduction Aux limites de l'informatique : les problèmes indécidables

Les sciences cognitives ont pour objet d'étude les principales capacités de l'esprit humain : langage, raisonnement, perception, motricité, planification, décision, émotion, conscience, culture, etc. Elles visent à décrire ces prédispositions humaines, à les expliquer, voire à les simuler ou les amplifier.

Dans ce cours, nous introduirons les sciences cognitives, à travers l'exemple d'un mathématicien, informaticien, philosophe et biologiste, Alan Turing, dont les travaux fortement interdisciplinaires sont emblématiques de cette science. Les résultats d'Alan Turing sont le fruit d'un travail d'équipe, en particulier, c'est avec John von Neumann qu'Alan Turing partage le prestige d'être considéré comme le fondateur de l'informatique moderne. Cependant, Alan Turing nous intéresse en ce qu'il s'est explicitement interrogé sur le « fonctionnement » de l'esprit et car il est l'auteur d'importants travaux en intelligence artificielle.

Une question pratique

Imaginons un étudiant ayant obtenu son DUT et venant tout juste d'être embauché dans une entreprise. Notre jeune informaticien a été chargé de développer une application pour un nouveau client. Le programme accède à une base de données de grande taille, génère une page web avec un formulaire, de nombreux boutons, des listes de choix et restitue les résultats de différents calculs en fonction des options choisies, tout cela en fonction du type d'utilisateur connecté. Le programme tourne parfaitement...sur tous les jeux d'essais que notre informaticien a testés. Le jeune programmeur a cependant la hantise de n'avoir pas testé certaines valeurs critiques. Son programme ne va-t-il pas entrer, pour une valeur qu'il n'aura

pas testée, dans une boucle de calcul dont il ne pourra plus sortir ? Notre étudiant se dit que qu'un tel scénario le discréditerait s'il se produit dès son premier projet dans l'entreprise.

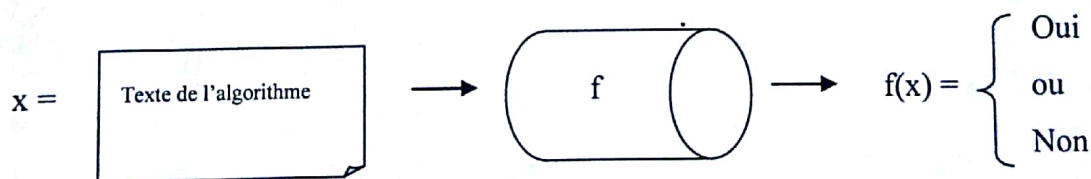
L'idéal serait de développer un programme qui testerait tous les jeux d'essais possibles du programme avant de le livrer au client. Cependant, le problème serait le même pour les prochains programmes. Ce qui impliquerait de développer un programme-test pour tous les programmes livrables se dit le programmeur. Autrement dit, il s'agirait de doubler chaque programme de son programme-vérification.

Le jeune programmeur s'interroge : existe-t-il un méta-programme capable de tester automatiquement et avec certitude si *un programme donné* (n'importe lequel, par exemple sous une forme compilée), prêt à être livré au client, s'arrêtera et donnera une réponse (en un temps fini), *quelque soient* les valeurs qu'il aura en entrée.

L'interrogation formulée par le jeune programmeur est connue sous le nom de **problème de l'arrêt**.

Un peu de théorie

En termes mathématiques, ce méta-programme équivaut à l'**existence d'une fonction** (notons la f) qui accepterait en entrée le texte d'un programme quelconque et qui fournirait en sortie la réponse Oui (cet algorithme s'arrête) ou NON (il existe une entrée pour laquelle cet algorithme ne s'arrête pas, pour laquelle il boucle indéfiniment).



Mais peut-on calculer la valeur (oui/non) de cette fonction pour tout texte de programme ?

Autrement existe-t-il une suite d'opérations que l'on peut *effectivement* mettre en œuvre pour obtenir le résultat de la fonction.

Peut-on tout calculer ?

Cette question a passionné les mathématiciens bien avant les premiers ordinateurs.

Le mot calcul vient de *calculus* qui signifie petit caillou en latin. Toute multiplication de nombres entiers peut être réduite à des additions successives. De même toute division se ramène à des additions et des soustractions. Quant aux additions et soustractions, elles se

convertissent aisément en manipulations de symboles ou de cailloux. Le calcul numérique tel que nous le connaissons aujourd'hui a d'abord consisté en *une manipulation d'objets matériels selon des règles bien définies*. Ce calcul par manipulation s'est ensuite étendu à un décompte mental, avec ou sans support matériel, puis à des programmes informatiques exécutés automatiquement, sans présence humaine. **Ce calcul n'en demeure pas moins une combinaison réglée de symboles qui peuvent éventuellement être remplacés par des objets du monde matériel comme des cailloux.**

Calcul et calculabilité

Jusqu'où de telles manipulations peuvent-elles aller ? Quel est l'ensemble des fonctions f , exprimables en termes mathématiques, pour lesquelles il existe une succession de manipulations de symboles déterminant sans ambiguïté l'image de n'importe quelle valeur x par f ? C'est-à-dire un calcul de la valeur y telle que $y = f(x)$? Autrement dit, quelle est la classe des fonctions calculables ? Telle est la question qu'aborde la calculabilité.

L'idée de Turing

À l'âge de 24 ans, le britannique Alan Mathison Turing, mathématicien génial, entre autres, imagine un concept de machine théorique. Il établira une correspondance entre les notions de calculable et de programmable sur une machine qu'il aura lui-même imaginé.

Turing montra, en 1937, que la classe des fonctions calculables (dans un sens précis que l'on ne définira pas précisément ici), était équivalente à la classe des fonctions programmables sur les machines imaginaires qu'il avait conçues.



Alan Mathison Turing (1912-1954)

Une machine imaginaire 'modèle' de toutes les machines ?

Turing va au cœur de la question qui touche à l'activité du mathématicien : « What are the possible processes which can be carried out in computing a number ? » quel est le comportement du mathématicien lorsqu'il calcule ? » se demande Turing.

Préoccupé par le « fonctionnement » de l'esprit, il pose dans le cadre de ses travaux en mathématiques, des questions du domaine de la psychologie.

Alan Turing a réfléchi à une simplification extrême du principe de tout calcul, de toute machine possible c'est-à-dire de toute machine concevable, qu'elle soit réelle, actuelle ou future.

Quelle sorte de machine Alan Turing va-t-il imaginer ? Cette machine est relativement simple. Elle se compose d'un ruban infiniment long divisé en petites cases, sur lesquelles sont imprimés des idéogrammes puisés dans une réserve finie donnée par avance. Une petite fenêtre découvre l'une des cases de ce ruban à une tête de lecture, de sorte que la machine soit en mesure d'identifier l'idéogramme qui y est inscrit, de l'effacer ou d'en imprimer un autre qui efface le premier. Le ruban peut se mouvoir vers la gauche ou vers la droite, de façon à placer l'une quelconque des cases qu'il contient sous la fenêtre.

La machine de Turing et ses états internes

Outre son ruban, les moteurs qui le déplacent, la petite fenêtre de lecture, d'effacement et d'impression, une machine de Turing possède ce que l'on désigne ici comme des « états internes », que J-G Ganascia s'amuse à comparer à ce que les hommes appellent leurs « états d'âme ». Ceux-ci conditionnent les réactions de la machine qui peut être « enjouée », et sauter gaiement d'une case à une autre du ruban, ou être « dépressive » et tout effacer sur son passage, ou encore être « mélancolique » et revenir indéfiniment sur son passé.

Cependant, à la différence des hommes, chez qui les subtiles complexions de l'âme sont en nombre infini, les machines de Turing admettent un nombre fini d'états internes. Chacun conditionne de façon totalement déterministe les réactions de la machine aux nouveaux événements lus sur le ruban.

Enfin, une « table », ou ce qu'en termes modernes nous appellerions aujourd'hui un « programme », décrit, pour chaque état interne, l'action exacte que la machine doit exécuter.

Les actions possibles : « déplacement » du ruban vers la gauche ou vers la droite, « lecture, effacement ou impression » d'un idéogramme sur la case du ruban qui se trouve juste sous la fenêtre, et enfin, « arrêt définitif », ainsi que l'état interne qui s'ensuivra.

Certes, les machines de Turing sont d'une complexion étrange et bien abstraite, qui fait fi des limitations de temps et d'espace, ce qui interdit toute réalisation physique de l'une d'entre elles. Mais à chaque instant, leur fonctionnement fait appel à un nombre fini de règles de calcul parfaitement définies et intelligibles, que nous pourrions nous-même exécuter sans difficulté.

Existence de fonctions non calculables

Revenons maintenant aux fonctions calculables : Turing montra, en 1937, que la classe des fonctions calculables, au sens de Church, était équivalente à la classe des fonctions programmables sur les machines imaginaires qu'il avait conçues. En son hommage, ces dernières sont connues depuis sous le nom de machines de Turing.

Turing a démontré qu'il n'est pas possible de concevoir un algorithme qui, étant donné un programme quelconque, nous avertisse avec certitude et au bout d'un temps fini si ce programme doit éventuellement « tourner en rond » et s'exécuter indéfiniment, sans trouver jamais la sortie. **L'une des conséquences pratiques les plus essentielles pour les informaticiens, c'est qu'on ne saurait construire un programme général capable de prouver la terminaison de n'importe quel programme.**

Décidabilité et calculabilité

Notons que la notion de calculabilité est souvent évoquée sous sa forme équivalente de notion de décidabilité.

Note : Ce texte s'appuie sur le document de J-G Ganascia : « Alan Turing : du calculable à l'indécidable » publié sur la revue en ligne de culture scientifique, « Interstice », créée par des chercheurs pour nous inviter à explorer les sciences du numérique. Ce texte a fait l'objet d'ajouts et de modifications pour être simplifié.

Sciences Cognitives

Questions de compréhension et de réflexion sur le texte

Aux limites de l'informatique : les problèmes indécidables

1. Quel problème le programmeur ne peut-il pas résoudre (limitation conceptuelle) ?
(Cochez la ou les bonnes réponses)
 - a) Tester automatiquement si son programme, prêt à être livré au client, s'arrêtera et donnera une réponse (en un temps fini), *quelque soient* les valeurs qu'il aura en entrée.
 - b) Tester automatiquement si *un programme donné (n'importe lequel)*, prêt à être livré au client, s'arrêtera et donnera une réponse (en un temps fini), *quelque soient* les valeurs qu'il aura en entrée.
2. On peut exprimer formellement de façon simple le problème de l'arrêt. Quelle en est la formulation mathématique ? (il faut clairement percevoir la différence entre formuler un problème et résoudre ce problème)
3. Pouvez-vous donner la définition 'informatique' du problème de l'arrêt ? (et sans regarder le texte ?)
4. On pourrait remplacer le mot calculer par le mot caillouter, expliquez cette image avec vos propres termes.
5. Donnez une définition intuitive du mot calcul ? a-t-on enfin répondu à la question « peut-on tout calculer » ?

6. Considérez, d'une part, l'intention initiale d'Alan Turing qui a donné naissance à sa machine de Turing, considérez, d'autre part, que la machine née de cette *réflexion* initiale, en donnant lieu au concept d'ordinateur moderne, a généré une profonde mutation de l'univers social, politique, culturel, économique et industriel. Pouvez-vous dire en quoi l'histoire de la machine de Turing souligne-t-elle un intéressant paradoxe ?

2) Quel est l'ensemble des fonctions $f(a)$ pour lesquels il existe $y = f(a)$?

3) Peut-on modéliser le problème par un programme qui fournira une réponse dans un temps fini?

4) Cela signifie que l'on utilise des objets (réels ou mentaux) pour servir de support pour effectuer des opérations mathématiques.

5) Calcul : Manipulation d'objet pour obtenir le résultat dans un temps fini

Un calcul ne mène pas forcément à un résultat ou à l'absence de résultat est-elle en de même un résultat?

6) Machine de Turing modélisée

Machine réelle : PC
fonction programmable

fonction programmable
→ fonction avec résultat

→ peut ne pas avoir de résultat.

Sciences Cognitives

Chapitre I : La nature polymorphe de l'activité mentale

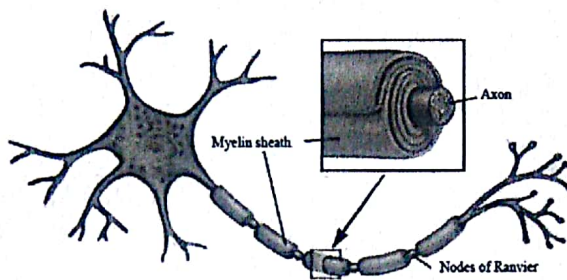
Pendant longtemps, la réflexion sur notre fonctionnement psychique (le langage, la vision, les émotions, la prise de décision etc..) a été l'exclusivité des philosophes et a reposé sur une démarche introspective, c'est-à-dire sur l'observation de soi, de son état intérieur. Aujourd'hui, des questions philosophiques très anciennes posées par Platon, Kant ou Descartes sont réexaminées par une *science de la vie mentale* s'appuyant sur un nouvel outil, la technologie : technologie pour explorer le comportement, neuro-imagerie, modélisation mathématique s'appuyant sur l'informatique.

La pensée est ancrée dans la biologie du cerveau ce qui a pour conséquence que les lois de la physique et de la biologie contraignent notre vie mentale. Ces lois naturelles sont un héritage de l'évolution, comme le souligne Jean-Pierre Changeux, le cerveau de l'homme est une formidable machine chimique où l'on retrouve les mêmes mécanismes moléculaires à l'œuvre chez la mouche drosophile ou le poisson torpille.

Lois de la pensée, lois de la physique : à quelle vitesse pensons-nous ?

Un exemple de contrainte qu'exercent les lois de la physique sur notre pensée est la vitesse de nos opérations mentales et de nos apprentissages. Celle-ci est directement liée à la vitesse de propagation des signaux électriques et des transitions moléculaires des récepteurs membranaires de notre cerveau. Dès 1850, le physicien et biologiste Hermann Von Helmholtz établit la vitesse de l'influx nerveux : **quelques dizaines de mètre par seconde** seulement. Un peu plus tard, Franciscus Donders démontre que *cette conduction lente affecte les décisions mentales* : la vitesse de la pensée n'est pas infinie, on peut décomposer les opérations mentales en une somme d'étapes lentes, plusieurs dizaines de milliseconde par étape.

Aujourd'hui, grâce aux progrès de *l'imagerie par tenseur de diffusion* (méthode présentée dans la suite du cours), on sait que la vitesse de transmission de l'influx nerveux augmente avec le développement de l'enfant, à mesure que se développe la gaine conductrice de myéline qui recouvre l'axone.



Lois de la pensée, lois algorithmiques : l'architecture du cerveau ne ressemble en rien à celle d'un ordinateur classique

L'invention de l'ordinateur, les travaux d'Alan Turing, de John von Neuman mais aussi ceux de chercheurs contemporains comme le linguiste Noam Chomsky ont conduit à l'apparition d'une science dont l'objet est la conception d'algorithmes qui simulent le traitement de l'information par le cerveau : reconnaissance visuelle ou vocale, mémorisation d'information, apprentissage de grammaires formelles. Une large part de la psychologie cognitive consiste ainsi, à tenter *d'inférer* les algorithmes de la pensée. Cependant, le cerveau humain, suprême exemple de système de traitement de l'information est une machine toute particulière ayant de multiples niveaux d'architecture imbriqués et fonctionnant *en parallèle*. Avec cent mille millions de processeurs, un million de milliards de connexions, cette structure reste sans équivalent en informatique.

On peut être tenté de penser au cerveau comme à un ordinateur, en considérant que la biologie constitue le matériel et la psychologie le logiciel. Cette métaphore est fortement réductrice et ne modélise pas fidèlement le cerveau. En effet, depuis la molécule jusqu'aux interactions sociales, tous les niveaux d'organisation se combinent étroitement pour déterminer notre fonctionnement mental.

Déroulement de la séance

Nous commencerons la séance par une interrogation écrite sur le cours précédent.

Nous poursuivrons par la lecture du texte relatif au Chapitre I : **La nature polymorphe de l'activité mentale.**

La suite du cours, abordera avec le support de diapositives les notions suivantes :

-----*Il vous est conseillé de prendre des notes*-----

- Les représentations du cerveau hier et aujourd'hui.
- Le lien anatomie cérébrale / fonction cognitive.
- Le système nerveux des êtres vivants : du plus simple au plus complexe.
- Les neurones miroirs, classe de neurones apparus récemment à l'échelle de l'évolution, sont-ils à la base de comportements spécifiquement humains ?

Nous terminerons la séance par la visualisation et la discussion de la conférence intitulée « **L'approche calculatoire des neurosciences** » donnée au Collège de France par Alexandre Pouget, chercheur à l'Université de Genève dont le thème de recherche porte sur le décodage des principes de représentation et de computation dans les circuits neuronaux

Sciences Cognitives

Chapitre I : La nature polymorphe de notre activité mentale

- 1) Quelle compétence que possède l'homme est très supérieure à celle des robots actuels ? Le HBP intègre-t-il cet aspect dans le projet de simulation du cerveau ? Quel est le nom de la théorie qui s'y rapporte ?

C'est la conscience de l'environnement. Le projet HBP essaye d'intégrer certaines sensations. (la théorie de la cognition incarnée)

- 2) Pourquoi le cerveau fonctionne-t-il avec un voltage très bas ?

Parce qu'il ne dispose pas de suffisamment d'énergie.

- 3) Quelle propriété fonctionnelle essentielle qui caractérise le cerveau le distingue fondamentalement de l'ordinateur d'aujourd'hui et compense sa vitesse de transmission de l'information plus lente ? Retrouvez l'ordre de grandeur du nombre d'opération dans un ordinateur et dans le cerveau.

Cette propriété est la fréquence de calcul. Le cerveau compense par le nombre des neurones. L'ordre de grandeur est le milliard d'opérations par seconde.

- 4) Quelle propriété matérielle distingue significativement le cerveau de l'ordinateur d'aujourd'hui ?

Le cerveau est électrochimique alors que l'ordinateur est 100% électrique.

- 5) Pourquoi les neurones miroirs portent-ils ce nom ? A quoi servirait la résonance motrice qu'assurent les neurones miroirs ?

Car ils permettent la mimétisme animale. Cela permet de contrôler des objets à distance.

- 6) Comment sait-on que différentes régions assurent différentes fonctions cognitives dans le cerveau ?

Expérience à partir d'accidents AVC, qui ont privé la victime d'une fonction mettez de leur corps sur un endroit précis du

- 7) Qu'est-ce qui distingue la méthode d'exploration de l'esprit et du monde psychique d'hier de celle d'aujourd'hui ? quel inconvénient peut présenter la méthode ancienne ?

C'est principalement la technologie (IRM). La méthode ancienne est basée sur des suppositions et est im précise.

8) Quelles sont les deux types de structures présentes dans le cerveau.

- substance grise: Cortex, traitement des infos.
- substance blanche: permet de faire circuler les infos, influence par le langage.

9) La théorie de l'esprit implique les neurones miroir et permet de se représenter la pensée des autres.

Le cerveau

dans le monde → philosophe + psychologue

cognition : mobilisation interdisciplinaire sur le cerveau.

- ↳ enfant : cela app + (implicites)
- Donne des infos sur l'état pathologique.
- un être vivant dans son grand social

Penser ? / Voir (l'image figurée) / juger / se battre /
fonctions / sentiments

HISTOIRE : 1,3 kg de gelatino → nous contrôle
opérations du cerveau → ≠ anesthésie pour passer
tester les zones selon leur importance.

Découverte du papaver d'Édwin Smith : fondement
de la neurosciences. Le principe du cerveau :
état de conscience par les égyptiens / hippocrate.

Traité du cerveau - tout ce qu'on sait sur le cerveau

différentes parties assurent des fonctions.

Cortex
Cerve frontal : se dev jusqu'à la fin de l'adolescence

- > peut donner des troubles de comportement (violence)
- > gère les fonctions exécutives.

→ T V → P lecture

Comment on suit ?

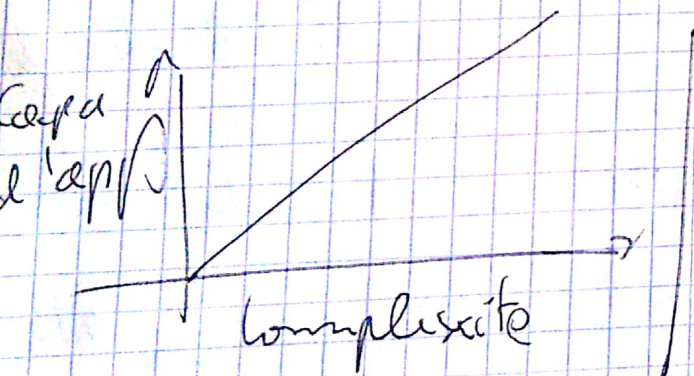
⊗ Patient HAM: (Wipperfurth)

Mémoire tampon dans le cerveau avant d'entrer dans la mémoire à long terme.

⊗ Patient qui comprend mais ne peut pas parler (région de Broca)

⊗ Patient qui parle - mais ne comprend pas (région de Wernicke)

⊗ Phineas Gage travaillait - en chemin de fer et sa tête a été perçée par une barre de fer mais, il est devenu violent. (Cortex Pré Frontal).



Théorie de l'esprit = penser à ce qui se passe dans le cerveau de l'autre

Neurone Miroir: apprend en soit qqun faire qqch

so active les mêmes neurones chez nous

→ empathie

→ catégoris

→ simulation

Sciences Cognitives

Chapitre II : Les différentes méthodes de mesure de l'activité cérébrale et ce qu'elles nous enseignent sur nos représentations mentales.

Historiquement, la réflexion sur notre fonctionnement psychique a d'abord été l'exclusivité des philosophes et a reposé sur une démarche introspective. Plus tard, la psychologie cognitive s'est principalement appuyée sur l'étude du comportement, par l'analyse des réponses des participants, de leurs erreurs ou de leurs temps de réaction, la psychologie cognitive tente d'inférer l'organisation des représentations mentales et les algorithmes de traitement de l'information chez l'adulte sain, l'adulte atteint de pathologies, l'enfant, et l'animal.

Aujourd'hui, l'usage de l'imagerie cérébrale humaine et animale est répandu, en particulier dans le domaine des sciences cognitives. Cette méthode ne vise pas seulement à *localiser*, dans le cerveau, les bases cérébrales de fonctions cognitives dont l'existence et l'organisation fonctionnelle auraient déjà été établies par des méthodes comportementales. Cet outil permet d'étudier les principes d'organisation du fonctionnement de notre cerveau en allant bien au-delà de la simple localisation des aires cérébrales qui assurent telle ou telle fonction. Après une définition des principales méthodologies de mesure de l'activité cérébrale, nous verrons à travers des exemples, comment l'examen de l'état d'activité d'une *structure cérébrale* permet d'observer les étapes du traitement cognitif avec une résolution temporelle fine (toutes les millisecondes pour l'électroencéphalographie, par exemple) et ainsi d'analyser l'organisation interne des représentations mentales.

pour un neu... un formu

EC: Communication Centrale

① IRM: Le cerveau est aimanté par ses atomes d'hydrogène de l'eau. On envoie un champ électromagnétique qui est modifié par le cerveau. On le recapte ensuite pour le recoder sous forme d'une image. Après analyse on peut apprécier de nombreuses caractéristiques (tumeurs...)

- À des variations de fréquence, on associe de varié de contraste.

Des avancées on peut mettre au point une IRM fonctionnelle: statique ou dynamique.

- Afflux de sang à l'utilisation d'une zone. Donc on va aimanter d'hémoglobine et prendre une image continue du cerveau (vidéo).

- DTI: Permet de détecter un AVC à temps.

- La vitesse de circulation de l'eau = \perp → \parallel : On peut voir les vecteurs de déplacement connaître les directions de la substance blanche

Syndrôme de Capgras: quand on reco aperçoit, on recon pas que son visage

Reco émotivité → amygdale (émotion) } Prosopagnosie: on peut pas reconnaître les visages.

lié aux objets, rupture le lien de connexion entre amygdale et aire du visage.

PRENDRE CONSCIENCE = PRODUIRE DU SENS

Sciences Cognitives

Chapitre III : La nature fabulatrice de notre activité mentale

Les résultats en psychologie et sciences cognitives montrent un fait remarquable pour la question de la connaissance : nous pensons accéder en toute objectivité aux informations de l'univers qui nous entoure, cependant, le tissu de nos représentations est fait d'interprétations du réel, de constructions fictives et subjectives.

« Neurologue et chercheur en neurosciences de la cognition, je ne peux ignorer le mystère que constitue le « cas Freud », qui s'offre à moi chaque matin, lorsque je traverse les allées de l'hôpital Salpêtrière, empruntés par Freud lui-même, il y a plus d'un siècle. [...] En hommage au fondateur de la psychanalyse, qui cultivait l'art de la métaphore à un degré inégalé de justesse, je me permettrais de faire usage à mon tour de cette figure de style. La thèse que je défends peut en effet être illustrée par la métaphore suivante. Freud peut-être envisagé comme le Christophe Colomb de notre univers mental. A l'image de Colomb qui nous fit cadeau d'un nouveau continent, nous reconnaissons dans l'inconscient de Freud, une immense découverte psychologique qui a révolutionné la connaissance que nous avons de nous-mêmes. A l'image de Colomb qui explorait les Amériques en étant persuadé de découvrir les indes, l'erreur de Freud fut de croire découvrir l'inconscient, alors qu'il dévoilait l'essence profonde de notre conscience ».

Ces propos de Lionel Naccache, neurologue à l'hôpital de La Pitié Salpêtrière à Paris et chercheur en neurosciences cognitives à l'INSERM¹ dans son ouvrage *Perdons-nous connaissance ? : De la mythologie à la neurologie*² nous introduisent à la question de la conscience telle qu'elle sera abordée dans ce chapitre.

Dans ce cours nous passerons en revue quelques unes des études de la psychologie expérimentales et des neurosciences qui portent sur les opérations non-conscientes. *Les illusions visuelles* sont, par exemple, un domaine dans lequel notre perception est fortement influencée par divers indices auxquels nous n'avons aucun accès conscient. Cependant, le

traitement de ces indices exerce une réelle influence sur nos actions. Nous verrons comment la bistabilité de la perception, illustrée par le cube de Necker ou l'illusion du vase et du visage, souligne que notre conscience n'a accès qu'à une fraction des interprétations que notre système visuel calcule en parallèle de l'activité consciente.

Nous verrons également la technique du *masquage*. Dans ce paradigme, un stimulus est rendu *invisible* alors même que le sujet y dédie toute son attention. Ici, la non-conscience n'est pas liée à l'attention, mais aux limitations de l'information de la stimulation visuelle. À l'inverse, d'autres conditions expérimentales s'appuient sur le *détournement* de l'attention du sujet, alors même que le stimulus en lui-même possède une durée et une énergie suffisante pour être perceptible. Dans le paradigme de « cécité inattentionnelle » (*inattentional blindness*), par exemple, l'attention du sujet est détournée de la cible par une tâche parallèle difficile, qui en concurrence avec la tâche principale et qui porte sur d'autres stimuli présentés au même moment. Il est alors possible de présenter des stimuli visuels en pleine fovéa (partie de la rétine d'acuité maximale) parfois pendant plusieurs secondes, sans que le sujet en prenne conscience.

Déroulement de la séance

Après la lecture et le commentaire du texte relatif au Chapitre III : « La nature fabulatrice de notre activité mentale » nous visualiserons la conférence donnée au collège de France par Stanislas Dehaene, professeur au collège de France et chercheur à l'Unité de Neuro-Imagerie cognitive (INSERM). Cette conférence s'intitule : *L'inconscient cognitif et la profondeur des opérations subliminales, 1001 manières de rendre une information non-consciente*.

Il est fortement conseillé de prendre des notes

Dans la suite du cours, nous verrons comment l'outil informatique est un outil puissant et très utile pour la psychologie expérimentale en ce qu'il permet d'explorer les opérations cognitives. Il permet, d'une part, de concevoir des programmes qui présentent des stimuli aux participants de l'expérience en faisant varier et en contrôlant étroitement les paramètres des stimulations présentées (ex : son, image avec des propriétés et des durées d'une très grande précision), d'autre part, de recueillir de la part du sujet, une réponse d'une très grande précision spatio-temporelle. L'informatique permet enfin le traitement d'une quantité

importante de données, d'en faire l'analyse statistique (statistiques descriptives, analyse de la variance, graphes permettant d'observer et interpréter les données etc.).

Après une courte initiation au langage python, nous emprunterons à la littérature de la psychologie cognitive un exemple représentatif pour programmer une expérience de psychologie.

(1) Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale

(2) Naccache, L. (2010). *Perdons-nous connaissance?: de la mythologie à la neurologie.*

Odile Jacob.

→ Empirisme : par rapport à l'expérience.

→ Designe son image pose pb

→ Motion induced blindness

Quelle est la \neq entre act psychique quand on voit les
Mouvements faibles et quand on les voit pas.

René Descartes : fait appel à l'introspection.

dualisme : opposition entre matériel et
immatériel (âme). → pb de communication?
→ l'âme et le corps se rejoignent dans le grand principe
(système endocrinien).

Tout aurait une forme de conscience atomique
 \neq entre conscient et in conscient?

(→ modèle des états neuronaux selon la conscience
(global work space). conscience = calculs (computationnel)
propagation de l'information.

Mise en valeur de l'activité inconsciente

Image subliminale influence le temps ^{ref} de
→ Non conscient mais apparaît dans le
comportement.

conférence Lionel Naccache "L'Éveil de nos
connaissances?"

La gouvernance de l'étonnement

Société de la connaissance = 1ère historique

La connaissance a deux facettes : vital
temporelle

conscience → création de sens.

création + interprétation

On modifie en permanence une
interprétation subjective

Perception = information + interprétation.

Sciences Cognitives

Questions de compréhension et de réflexion sur le texte

L'étrange monde du synesthète

1. Selon vous, parmi les formes d'association entre les sens évoquées dans le texte, quelle est la plus étonnante ? Association goût + qch

2. Après une période d'oubli dans les années cinquante, qu'est-ce qui a donné un regain d'intérêt à l'étude de la synesthésie ? Nouvelle génération de scientifiques aidés par l'IRM

3. Relevez dans l'article des exemples d'expressions langagières montrant qu'une certaine forme de synesthésie est présente chez la majorité des individus. Pouvez-vous trouver d'autres exemples que ceux du texte ? les métaphores et associations être couleur.

4. Expliquez brièvement l'expérience montrant que la synesthésie correspond à une réelle perception sensorielle et n'est pas une simple association d'idées. l'expérience de

~~de voir mon neveu qui ne voit pas le chiffre il le compare à la couleur la liaison est dans le década de la couleur~~
5. Quelles sont les deux différentes interprétations qu'on a données à la synesthésie avant

que des scientifiques ne révèlent des résultats relatifs aux bases cérébrales de ce phénomène ? quels arguments montrent la faiblesse de chacune de ces interprétations initiales ? 1) Je ne reconnais rien par des souvenirs qui sont restés → pas de lien de réurgence 2) Possibilité à la métaphore → R une perception constante ?

6. Quelle hypothèse font les neuroscientifiques sur les bases cérébrales de la synesthésie et quelles expériences ont permis de l'étayer ? Lien entre bases cérébrales sensorielles et perception pour l'IRM de l'act. v. té dans le cortex sensoriel précis avec sujet contrôlé.

7. Quelle place aurait selon vous un phénomène comme la synesthésie dans un projet de simulation de l'intelligence humaine ? cela pourrait être une recherche pour améliorer la puissance de calcul des ordinateurs : logiciel.

L'étrange monde du synesthète

E.M. Hubbard, Inserm U562, service hospitalier
Frédéric-Joliot, Orsay

SCIENCES COGNITIVES

2 est-il rouge ou bleu, plus loin dans l'espace que 8 ou à gauche de 5 ? La plupart des gens trouveront ces questions absurdes, mais certains répondront « Pour moi, 2 n'est pas rouge mais plutôt orangé ». Ces personnes ne sont pas folles mais synesthètes, c'est-à-dire que chez elles une perception active simultanément différentes représentations. La synesthésie, longtemps considérée comme une curiosité, intéresse désormais les neurologues comme une clé pour comprendre le développement. Si nombres et espace sont associés, ou sons et couleurs, c'est qu'il existe des connexions entre les régions cérébrales qui traitent ces informations, connexions normalement éliminées au cours du développement. A quoi servent-elles ? Comment sont-elles éliminées ? E. Hubbard décrit ces phénomènes étranges pour qui ne les perçoit pas. Les enfants seraient apparemment plus synesthètes que les adultes. Ne vous étonnez donc pas la prochaine fois qu'un de vos petits patients vous affirmera sérieusement que a est bien plus vert que o ! G. Dehaene-Lambertz

La synesthésie est un phénomène dans lequel une stimulation **unimodale** conduit à une perception dans une autre modalité. Par exemple, des notes de musique, des lettres et des chiffres peuvent entraîner la perception de couleurs, ou des goûts peuvent être associés à des formes tactiles. Des recherches récentes ont montré que la synesthésie est un phénomène bien réel, avec des corrélats génétiques, perceptifs et cérébraux. Nous allons présenter dans cet article quelques-uns de ces faits ainsi que les questions qui nécessitent encore des investigations, notamment chez l'enfant. Les prochaines générations de scientifiques et de pédiatres devront reconnaître la synesthésie chez l'enfant pour en explorer les racines développementales et leurs conséquences.

En 1871, Arthur Rimbaud publia un sonnet intitulé *Voyelles*, qui a amené le monde artistique européen de la fin du 19^e siècle à s'intéresser au phénomène de la synesthésie, lequel associe, par exemple, certaines lettres avec certaines couleurs. Bien qu'il soit généralement admis que Rimbaud n'était pas sy-

nesthète lui-même, son poème demeure une description frappante de ce que cela doit être d'expérimenter cette insolite association des sens. Certains synesthètes perçoivent du bleu lorsqu'ils entendent la note *ré* jouée sur un piano et du rouge pour la note *fa* (audition colorée), **ou même ressentent des formes tactiles lorsqu'ils goûtent différentes nourritures**. D'autres synesthètes voient en couleur les lettres de l'alphabet, même lorsqu'elles sont imprimées en encre noire. Ces personnes ne sont ni folles, ni atteintes d'un désordre neurologique. Elles font partie du petit groupe, estimé entre 1/20 et 1/2000 individus, de gens normaux qui sont synesthètes. Chez eux, les sens, toucher, goût, audition, vision et odorat, sont « mélangés » au lieu de rester séparés.

Nous ignorons quand ce phénomène a été remarqué pour la première fois, mais Sir Francis Galton en a conduit la première étude systématique. Ses papiers, publiés dans *Nature* en 1880 [1, 2], se focalisent sur les trois manifestations les plus communes de la synesthésie : dans la première forme, les sons évoquent des couleurs (audition colorée) ;

dans la seconde, les nombres sont associés avec des localisations précises dans l'espace (synesthésie nombre-espace) ; dans la troisième, les différents nombres apparaissent teintés de différentes couleurs (synesthésie graphème-couleur). D'autres scientifiques ont bientôt suivi, et vers 1910 plus de cinquante articles avaient été publiés sur la seule audition colorée par certains des plus fameux psychologues de l'époque, comme Alfred Binet, Théodore Flournoy et Edouard Claparade. Pourtant, après cette vague d'intérêt initiale, l'étude de la synesthésie s'est alanguie, et ce phénomène a depuis été considéré comme une simple curiosité de la psychologie et des neurosciences (pour une revue voir [3]). Cette tendance s'est récemment inversée et une nouvelle génération de psychologues et de neuroscientifiques ont recommencé à s'intéresser à la synesthésie. Plus d'articles portant sur la synesthésie ont été publiés dans les quatre dernières années que pendant les quarante années précédentes. Dans cet article, je voudrais :

1. discuter les preuves expérimentales montrant que la synesthésie est un phénomène perceptif réel. Ces sujets ne faiblit pas ;
2. faire le point sur les propositions théoriques de ce qui se passe dans le cerveau des synesthètes qui les distinguent des non-synesthètes ;
3. rapporter les faits de la littérature suggérant que la synesthésie pourrait être fréquente chez l'enfant.

LES EXPLICATIONS HISTORIQUES DE LA SYNESTHÉSIE

Une explication classique de la synesthésie est que ces personnes revivent des associations et des mémoires de l'enfance. Peut-être que le petit Charles jouait avec des lettres aimantées sur la porte du réfrigérateur et que le 5 était rouge et le 6 vert. Bien sûr, cela n'explique pas pourquoi seulement certaines personnes restent « collées » à ces mémoires sensibles saisissantes ni pourquoi seulement

certains groupes de stimulus, comme les lettres, les nombres et les notes de musique, sont les plus probables pour créer des perceptions synesthésiques.

Une deuxième explication que l'on entend souvent est que ces personnes utilisent de vagues images métaphoriques quand ils disent que la note ré est rouge ou que le poulet a un goût pointu, de la même façon que l'on parle d'une chemise criarde ou d'un fromage piquant. Cette hypothèse estime que la langue regorge de ce genre de métaphores et que les synesthètes sont simplement plus prolixes à cet égard. Toutefois, dire que la synesthésie est une histoire de métaphores n'aide pas réellement non plus à comprendre ce phénomène, car personne n'a une bonne idée de comment les métaphores marchent ni de comment elles sont décodées par le cerveau.

Aucune de ces explications ne rend compte des caractéristiques que moi-même et d'autres avons observées dans les études récentes de la synesthésie. Par exemple, plusieurs études ont montré que les rapports des synesthètes sont cohérents (> 90 %) à travers des séances répétées de tests, même quand les séances sont séparées par des périodes de plus d'un an [3, 4]. Des sujets contrôles, par comparaison, ne sont cohérents que dans 30 % des cas. De la même façon, quand on présente à un synesthète un chiffre écrit dans une couleur qui ne correspond pas à sa perception, le temps qu'il lui faut pour nommer la couleur de l'encre est plus longue que celui qui lui est nécessaire quand le chiffre est imprimé dans la couleur adéquate [4, 5]. Ces faits montrent bien que la synesthésie est un phénomène automatique et digne de foi, mais ils ne répondent pas à la question de savoir si ces perceptions colorées sont liées à des associations mémorisées ou à des processus perceptifs particuliers.

LA RÉALITÉ PERCEPTIVE DE LA SYNESTHÉSIE

Pour tester l'hypothèse que la synesthésie est un phénomène perceptif, nous

avons utilisé un test « d'isolement perceptif ». Si vous regardez un groupe de points verts dispersés parmi une « forêt » de points rouges, les points verts vont vous sauter aux yeux (pop-out). Si vous regardez des groupes de 3 dispersés au milieu d'autres chiffres (figure 1a), ils se mélangent avec l'arrière-plan. Ils sont difficiles à distinguer sans inspecter chaque élément un à un. Mais si vous regardez les chiffres rouges de la figure 1b, vous pouvez instantanément les séparer de l'arrière-plan et les regrouper mentalement pour former une figure séparée de triangle.

Notre question était de savoir ce qui se passerait si on montrait cette figure à un synesthète qui voit les 3 rouges, les 4 verts et les 5 bleus. S'il pense simplement à rouge et à vert quand il voit des 3 et des 5, alors, comme vous et moi, il ne verra pas le triangle instantanément. Si par contre la synesthésie est un vrai phénomène perceptif, et pas seulement une association mémorisée, alors le triangle lui sautera aux yeux, comme dans la figure 1b, car pour lui les nombres sont vraiment colorés. La réponse fut claire comme de l'eau de roche : les synesthètes étaient bien meilleurs que les non-synesthètes [6, 7]. Nous avons testé un second groupe de contrôles non-synesthètes avec des figures colorées comme les perceptions des synesthètes. Dans ce cas, les non-synesthètes avaient de meilleures performances que les synesthètes, ce qui est cohérent avec le fait que les synesthètes rapportent que les couleurs qu'ils perçoivent sont réelles mais plus fades que celles du monde réel.

Ces résultats sont une preuve évidente

L'unité Inserm 562 est en train de mettre au point des expériences pour tester ces hypothèses. Nous sommes donc à la recherche de volontaires qui pensent être synesthètes. Si vous pensez être synesthète, quel que soit le type de synesthésie que vous présentez, contactez : Edward M. Hubbard ou Manuela Piazza, Inserm Unité 562, service hospitalier Frédéric-Joliot CEA, 4 place du Général-Leclerc, 91401 Orsay ; tél. : 01 69 86 77 65 ; courriel : edhubbard@gmail.com.

que les couleurs perçues par les synesthètes sont vraiment d'origine sensitive. Cette expérience montre également que les synesthètes ne sont pas fous ou mythomanes. Comment une personne folle pourrait-elle être plus efficace que des sujets normaux ? Il n'y a aucun moyen de truquer. Pour la première fois depuis Francis Galton, nous avons une preuve non équivoque que la synesthésie est bien un processus sensitif.

Dans une deuxième expérience, nous avons tiré parti d'un phénomène visuel, la saturation (crowding). Si vous fixez la croix de la figure 2b, vous trouverez assez facile de percevoir le nombre 5 sur le côté, même si vous ne le regardez pas directement. Mais si on entoure ce 5 de quatre autres nombres de même couleur (comme des 3 noirs), vous ne pouvez plus identifier le nombre du milieu (figure 2a). Cela n'est pas dû à une réduction de l'acuité en périphérie. Après tout, le 5 était parfaitement évident quand il n'était pas entouré de 3. Une hypothèse est que la saturation est due à des ressources attentionnelles limitées. Les 3 qui flanquent le 5 distraient l'attention du stimulus central et empêchent les sujets de le voir. Nous eûmes une grande surprise lorsque nous avons montré la figure 2a à nos synesthètes. Ils regardèrent la figure et firent des remarques du genre : « Je ne peux pas voir le nombre du milieu. C'est flou mais c'est un flou bleu, donc je devine que cela doit être un 5 ». Cela suggère que, bien qu'ils n'aient pas enregistré consciemment le nombre du milieu, ce nombre était traité quelque part dans le cerveau à un niveau inconscient et évoquait la couleur appropriée. Ils pouvaient ensuite utiliser cette couleur pour en déduire intellectuellement l'identité du nombre [8]. Néanmoins, cela n'était vrai que pour seulement 3 de nos 6 synesthètes, alors que, dans la tâche précédente d'isolation du triangle, le groupe des synesthètes avaient de meilleures performances que les contrôles [7]. Cela peut vouloir dire qu'il existe différents sous-groupes de synesthètes, une question sur laquelle nous reviendrons ci-dessous.

Figure 1

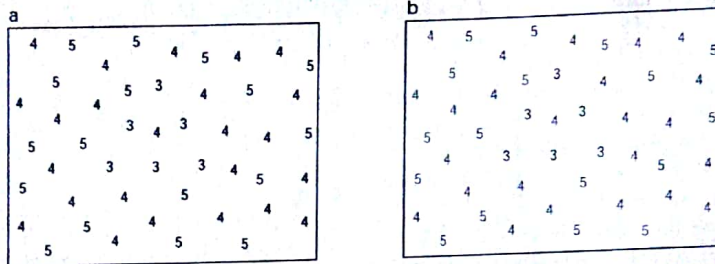
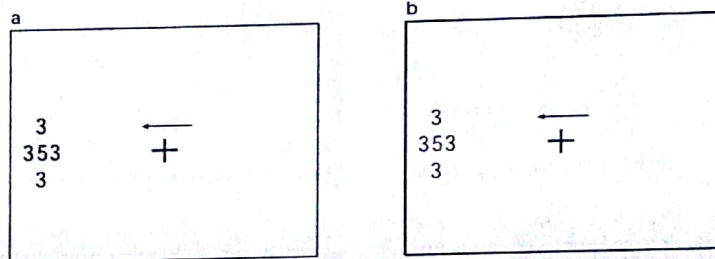


Figure 2



LES BASES NEURALES DE LA SYNESTHÉSIE GRAPHÈME-COULEUR

Pour comprendre pourquoi certaines personnes font l'expérience d'un tel phénomène, revenons d'abord sur les bases neurales du traitement des couleurs, des lettres et des nombres. Les signaux neuronaux en provenance de la rétine sont d'abord envoyés au cortex visuel primaire (V1), où l'image est analysée selon ses différents attributs, comme sa couleur, son mouvement, sa forme et sa profondeur. Ensuite, les informations sur ces différents éléments sont distribuées vers de nombreuses aires visuelles dans les régions temporales et pariétales. Les neuroscientifiques ont maintenant une connaissance assez précise de la manière dont les couleurs sont analysées. Après avoir été analysée par les cônes (les récepteurs de la couleur) dans l'œil et avoir été ensuite traitée dans des amas (blobs) dans V1, l'information colorée de la scène visuelle est envoyée vers l'aire hV4 dans le gyrus fusiforme. De là, elle est relayée vers les

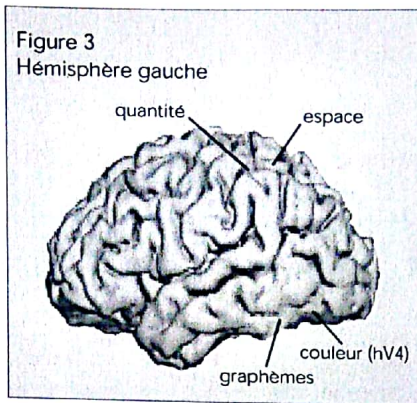
aires de couleur « supérieures », qui se trouvent plus haut, près de la région du lobe pariétal appelé gyrus angulaire. Ces aires supérieures seraient impliquées dans les aspects les plus sophistiqués du traitement de la couleur, comme la couleur typique de tel ou tel objet ou la discrimination de couleurs ambiguës.

Les représentations numériques sont également calculées en suivant plusieurs étapes. Une première étape dans le gyrus fusiforme reconnaît la forme des chiffres (graphèmes), alors que les stades plus tardifs dans le gyrus angulaire et le sillon intrapariétal interviennent dans les concepts numériques que sont l'ordinalité (l'ordre des nombres, 2 est avant 3 qui est lui-même avant 4 dans la liste des nombres) et la cardinalité (la quantité). Quand la région angulaire est détruite par un accident vasculaire cérébral ou une tumeur, le patient peut encore identifier les nombres mais ne peut plus ni diviser ni soustraire (voir revue en [9]). Les multiplications sont généralement moins affectées, car les tables sont souvent apprises par cœur dans l'enfance et peuvent permettre de trouver le résultat par récitation verbale.

Cette configuration anatomique, la proximité des régions traitant les couleurs et les nombres dans le gyrus fusiforme et dans le gyrus angulaire, suggère que la synesthésie nombre-couleur pourrait être la conséquence d'erreurs de câblage entre ces régions spécialisées (figure 3) [8]. La synesthésie est souvent présente chez plusieurs membres d'une même famille et le schéma de transmission suggère fortement une base génétique à ce phénomène. Peut-être qu'une mutation génétique entraîne un déficit d'élimination de connexions pré-existantes entre ces régions qui sont normalement séparées au cours du développement grâce à des phases d'élagage de connexions exubérantes. Si cette mutation s'exprime de façon inhomogène dans les tissus, cela expliquerait pourquoi certains synesthètes connectent couleurs et nombres tandis que d'autres voient des couleurs quand ils entendent des syllabes ou des notes de musique. Notez aussi qu'alors que presque toutes les régions cérébrales peuvent être connectées avec n'importe quelle autre, les régions qui présentent ces erreurs de câblage sont proches les unes des autres, expliquant pourquoi certaines formes de synesthésie sont plus fréquentes que d'autres.

Chez certains synesthètes, nous avons trouvé que les chiffres sous leur forme romaine (V pour 5) n'évoquaient aucune couleur. Ce fait est important, car il suggère que, pour ces sujets, ce n'est pas le concept numérique 5, mais la forme physique du chiffre qui est associée à la couleur. Cette observation est cohérente avec l'idée que les connexions exubérantes se trouvent pour ces sujets dans le gyrus fusiforme, cette structure étant principalement impliquée dans l'analyse des formes visuelles et non pas dans la signification conceptuelle du chiffre. Ces synesthètes de « bas niveau » étaient ceux qui avaient les meilleures performances dans notre tâche de saturation (figure 2).

Néanmoins, pour d'autres synesthètes, même les jours de la semaine ou les mois de l'année évoquent des couleurs. Lundi peut être vert, mercredi rose et



décembre jaune. Les jours de la semaine, les mois et les nombres partagent le même concept de séquence ou d'ordinalité. Chez ces personnes, c'est peut-être le concept abstrait de séquence numérique qui suscite la couleur plutôt que l'apparence visuelle du signe. Quelle est la différence entre ces deux groupes de synesthètes ? Comme nous l'avons déjà rapporté, après que la forme du nombre est reconnue dans le gyrus fusiforme, le message est relayé vers le gyrus angulaire et le sillon intrapariétal. Le gyrus angulaire est impliqué dans le traitement des quantités et des séquences numériques et dans le raisonnement arithmétique abstrait. Peut-être que chez certains synesthètes l'interférence se produit entre les deux régions de traitement de haut niveau de la couleur et du nombre dans le gyrus angulaire et non pas dans le gyrus fusiforme. Cela expliquerait pourquoi, chez ces personnes, la représentation abstraite du nombre ou l'idée de nombre évoquée par les jours de la semaine ou les mois de l'année suscite fortement la couleur. En d'autres termes, il y aurait différentes formes de synesthésie suivant les régions du cerveau dans lesquelles s'exprime le gène responsable. Les synesthètes de « haut niveau » seraient ceux dont l'expérience serait commandée par le concept numérique, alors que les synesthètes de « bas niveau » seraient ceux dont l'expérience serait commandée seulement par l'apparence physique. Cette hypothèse non seulement explique la connexion entre couleurs et

lettres ou nombres, mais aussi le rapport d'un synesthète qui dit ressentir un goût dans la bouche quand il entend des mots. Ainsi cette sensation serait due au fait que le cortex auditif et le cortex du goût sont adjacents respectivement dans le lobe temporal supérieur et dans l'insula. De la même façon, goûter des formes pourrait être dû à des connexions entre le cortex du goût dans l'insula et la représentation adjacente de la main dans le cortex somatosensoriel. Dans le cas de la synesthésie notes de musique et couleur, les régions impliquées sont loin l'une de l'autre (le cortex auditif et V4), mais il existe des preuves que des connexions longue distance entre ces deux régions sont présentes à la naissance. La persistance de ces connexions expliquerait la synesthésie notes de musique-couleur, même si cette synesthésie met en jeu des régions éloignées.

ÉTUDES D'IMAGERIE FONCTIONNELLE DES SYNESTHÉSIES GRAPHÈME-COULEUR

Pour tester cette théorie, nous avons mené une étude d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle chez 6 synesthètes et 6 contrôles. Nous avons mesuré les activations dans les régions cérébrales répondant à la couleur pendant que les sujets regardaient des lettres ou des nombres, en blanc sur un fond gris, qui alternaient avec des symboles non linguistiques appariés quant à la complexité visuelle de bas niveau. Comme le prédisait notre hypothèse, les synesthètes avaient plus d'activité que les contrôles dans toutes les régions visuelles de traitement précoce, et notamment dans hV4, la région répondant sélectivement à la couleur. De plus, les synesthètes qui avaient les meilleures performances dans les deux tâches décrites ci-dessus avaient également la plus forte activation dans hV4, suggérant que les synesthètes pourraient différer par l'intensité de leur coloration synesthé-

sique [7]. Ces différences pourraient également être dues à la distinction « haut et bas niveau » de traitement que nous avons soulignée ci-dessus, mais cela nécessite plus de recherche.

Une étude en IRMF antérieure avait étudié la synesthésie mots entendus-couleur et avait montré une augmentation de l'activité dans hV4 chez les synesthètes, similaire à celle que nous avons décrite dans la synesthésie graphème-couleur [10]. De plus, dans cette étude, les auteurs avaient entraîné les sujets contrôles à imaginer les mots en couleur et avaient montré que, malgré l'entraînement, les non-synesthètes n'avaient pas d'activation dans hV4. Ces résultats non seulement montrent la généralité de l'implication de V4 dans la perception synesthésique des couleurs, mais démontrent que cette activation ne peut pas être due simplement à des influences descendantes (top-down) comme dans l'imagerie mentale. Pris ensemble, ces résultats sont en faveur du modèle général d'activation croisée que nous avons proposé ci-dessus. Néanmoins, simplement montrer que ces régions sont actives n'explique pas totalement leur rôle fonctionnel, ni quelles sont les interactions entre gènes et environnement pouvant conduire à la synesthésie.

LES ÉTUDES DÉVELOPPEMENTALES DE LA SYNESTHÉSIE

Tout ce que nous avons récemment appris sur la synesthésie provient d'études chez l'adulte. Ces résultats intrigants conduisent pourtant à toute une série de questions sur la manière dont la synesthésie se développe. Par exemple, si l'hypothèse de l'élagage de connexions exubérantes est juste, nous devrions nous attendre à trouver plus de synesthètes chez les enfants que chez les adultes, puisque l'élimination synaptique se poursuit pendant l'enfance jusqu'à l'adolescence. De la même façon, étant donné que la synesthésie a une composante génétique mais dépend de

systemes appris comme les lettres, les chiffres et les notes de musique, quelles peuvent être les interactions entre génétique et expérience qui conduisent à la forme adulte de synesthésie ?

La question de savoir si la synesthésie est plus fréquente chez les enfants n'a pas été envisagée dans les études récentes. Néanmoins, des données obtenues dans les premiers temps de la recherche sur la synesthésie suggèrent que cela est effectivement le cas (pour une revue voir [11]). Par exemple, Galton, en 1883, a noté la tendance pour les enfants à être plus synesthètes que les adultes. Charles Meyers, en 1914, a aussi remarqué cette tendance et a suggéré qu'il s'agissait juste d'une des nombreuses « perceptions indifférenciées » communes aux enfants. Heinz Werner, en 1940, a suggéré que la synesthésie pourrait concerner un enfant sur deux et que la prévalence de la synesthésie diminue avec l'âge après dix ans. Néanmoins, aucun de ces auteurs n'a utilisé les techniques expérimentales modernes pour vérifier la stabilité et le sérieux de ces associations synesthésiques. Par exemple, ils ne se sont pas assurés de distinguer entre synesthésie et possibilité de métaphore, ou autres images. Il s'agit donc clairement d'une question qui doit être réexaminée avec les méthodologies plus fiables qui sont à notre disposition maintenant.

Une autre question développementale intéressante est la relation entre génétique et expérience dans le développement de certaines associations synesthésiques. Bien qu'il soit clair qu'il existe une composante génétique dans la synesthésie, la concordance, même parmi des jumeaux monozygotes, n'est pas parfaite, suggérant également une composante environnementale [12]. Dans une étude récente de la synesthésie goût-mots entendus, Jamie Ward et Julia Sinner ont montré que leur synesthète JIW ressentait des goûts qui étaient liés au contenu sémantique et phonétique des mots, démontrant ainsi que des facteurs linguistiques et conceptuels jouent un rôle dans les associations synesthésiques [13]. Une autre étude ré-

cente a montré que, chez des anglophones, le *r* est par exemple plus souvent associé au rouge (red en anglais) et le *g* plus souvent au vert (green en anglais), suggérant un biais dans les associations colorées dû à la dénomination des couleurs. Néanmoins, cette association n'est pas parfaite, *o* étant souvent perçu comme noir ou blanc et non comme orange [14]. Chez d'autres synesthètes, entendre le mot « rouge » leur fait voir du vert, un effet que Gray et ses collègues [15] ont surnommé « l'effet de couleur étrangère » (alien color effect : ACE). Nous avons nous-mêmes rapporté le cas d'un synesthète qui avait un trouble de la vision des couleurs (déficit en cônes *s*) et avait des difficultés à distinguer les bleus des violets. Néanmoins, il rapportait qu'il percevait des couleurs synesthésiques qu'il ne pouvait pas voir dans le monde réel [6, 8]. En résumé, ces résultats contradictoires suggèrent un rôle important de l'environnement pour déterminer quelles sont les associations synesthésiques les plus probables, mais suggèrent également qu'il existe un certain degré d'aléatoire dans les connexions génétiquement spécifiées qui détermineront quelles sont les associations que le synesthète éprouvera.

CONCLUSIONS

L'étude de la synesthésie a explosé pendant ces dix dernières années. Au fur et à mesure que les chercheurs ont exploré ce phénomène énigmatique, ils ont pu montrer que ces couleurs synesthésiques ont des conséquences perceptives, démontrant la réalité de ce phénomène. Les études de neuro-imagerie ont montré que les synesthètes qui voient des stimulus induisant des perceptions colorées ont effectivement des activations dans les régions cérébrales traitant la couleur, suggérant que la synesthésie est due à des co-activations de régions adjacentes du cerveau impliquées dans le traitement de la couleur et dans le traitement du nombre. Alors qu'il est classiquement accepté qu'il existe une composante génétique dans

ce phénomène, il est nécessaire de lancer des recherches pour déterminer exactement la part de cette composante et la manière dont cette dernière inter-

agit avec des facteurs environnementaux pour créer les associations précises que les synesthètes ressentent. Cela est un objectif essentiel pour les futures re-

cherches de ce domaine où pédiatres et psychologues du développement devraient collaborer pour mieux comprendre ce phénomène curieux. □

Références

- [1] GALTON F. : « Colour associations », in BARON-COHEN S., HARRISON J.E. : *Synaesthesia : Classic and contemporary readings*, 1880, Blackwell, Oxford, England ; p. 43-8.
- [2] GALTON F. : « Visualised numerals », *Nature*, 1880a ; 21 : 252-6.
- [3] BARON-COHEN S., HARRISON J., GOLDSTEIN L.H., WYKE M. : « Coloured speech perception : Is synaesthesia what happens when modularity breaks down ? » *Perception*, 1993 ; 22 (4) : 419-6.
- [4] MATTINGLEY J.B., RICH A.N., YELLAND G., BRADSHAW J.L. : « Unconscious priming eliminates automatic binding of colour and alphanumeric form in synaesthesia », *Nature*, 2001 ; 410 (6628) : 580-2.
- [5] DIXON M.J., SMILEK D., CUDAHY C., MERIKLE P.M. : « Five plus two equals yellow : Mental arithmetic in people with synaesthesia is not coloured by visual experience », *Nature*, 2000 ; 406 (6794) : 365.
- [6] RAMACHANDRAN V.S., HUBBARD E.M. : « Psychophysical investigations into the neural basis of synaesthesia », *Proceedings of the Royal Society Biological Sciences Series B*, 2001a ; 268 (1470) : 979-83.
- [7] HUBBARD E.M., ARMAN A.C., RAMACHANDRAN V.S., BOYNTON G.M. : « Individual differences among grapheme-color synesthetes : Brain-behavior correlations », *Neuron*, 2005 ; 45 (6) : 975-85.
- [8] RAMACHANDRAN V.S., HUBBARD E.M. : « Synaesthesia : A window into perception, thought and language », *Journal of Consciousness Studies*, 2001b ; 8 (12) : 3-34.
- [9] MOLKO N., WILSON A., DEHAENE S. : « La dyscalculie développementale, un trouble primaire de la perception des nombres », *Méd. Enf.*, 2005 ; 25 (3) : 165-70.
- [10] NUNN J.A., GREGORY L.J., BRAMMER M., WILLIAMS S.C.R., PARSLOW D.M., MORGAN M.J., MORRIS R.G., BULLMORE E.T., BARON-COHEN S., GRAY J.A. : « Functional magnetic resonance imaging of synesthesia : Activation of V4/V8 by spoken words », *Nature Neuroscience*, 2002 ; 5 (4) : 371-5.
- [11] DANN K.T. : *Bright Colors Falsely Seen*, 1998, New Haven, CT, Yale University Press.
- [12] SMILEK D., MOFFATT B.A., PASTERNAK J., WHITE B.N., DIXON M.J., MERIKLE P.M. : « Synaesthesia : A case study of discordant monozygotic twins », *Neurocase*, 2002 ; 8 (4) : 338-42.
- [13] WARD J., SIMNER J. : « Lexical-gustatory synaesthesia : linguistic and conceptual factors », *Cognition*, 2003 ; 89 (3) : 237-61.
- [14] DAY S. : « Some demographic and socio-cultural aspects of synesthesia », in ROBERTSON L., SAGIV N. : *Synaesthesia : Perspectives from Cognitive Neuroscience*, 2005, Oxford University Press, New York, NY.
- [15] GRAY J.A., CHOPPING S., NUNN J., PARSLOW D., GREGORY L., WILLIAMS S., BRAMMER M.J., BARON-COHEN S. : « Implications of synaesthesia for functionalism : Theory and experiments », *Journal of Consciousness Studies*, 2002 ; 9 (12) : 5-31.

Sciences Cognitives

Questions de Réflexion sur le texte :
« La nature spécialisée de notre activité mentale : des neurones dédiés à la lecture »

Répondez aux questions suivantes :

1. Le neurologue Joseph-Jules Déjerine a découvert les bases cérébrales de la lecture en observant le cas du patient C. atteint de « cécité verbale ».
Décrivez en peu de termes mais très précisément cette pathologie
2. Quelle capacité de traitement des lettres qui reste intacte chez le patient C. nous donne une indication précieuse sur le niveau auquel se situe le déficit ?
3. A quelle notion fait appel Déjerine pour interpréter son observation anatomique? les lésions constatées concernent-elles les neurones (substance grise) ou les cellules gliales (substance blanche) ?
4. A quel syndrome, vu dans les cours précédents, peut-on comparer la lésion du patient C. ?
5. Quelle technique aujourd'hui permet d'isoler, parmi les régions cérébrales, celle qui est directement responsable de l'alexie ? Quelle logique scientifique permet de dégager la région cérébrale nécessaire et suffisante à la lecture ?
6. Une preuve formelle que le patient C. est atteint d'un trouble qui concerne spécifiquement les lettres est qu'il possède jours (au moins) trois compétences comparables à la lecture.

Citez ces trois compétences et expliquez en quoi il est surprenant d'observer la coexistence d'un part, d'une altération des capacités à lire les lettres, d'autre part, de l'intégrité du système de traitement des chiffres

7. Que pouvons-nous déduire de cette dissociation en terme d'organisation cérébrale pour les fonctions de la lecture et de la numération ?

1) Cécité verbale : le sujet est capable d'écrire, de reconnaître les lettres par le toucher mais absolument incapable de les reconnaître visuellement.

2) Il peut reconnaître les lettres par le toucher.
+ nombres.

3) ~~Cécité verbale pure~~ → Déconnexion
substance blanche → syndrome = cécité

4) ~~Séparation des hémisphères supérieures~~
Broca / Wernicke Capgras

5) IRM fonctionnelle. ~~Expérience avec sujet Emman~~
reposition d'IRM d'Alexie

6) parole, écriture, reco d'image, il sait les compter

7) On peut déduire de ces observations que la zone de traitement visuelle du langage et du traitement des chiffres ne sont pas au même endroit.

« Nous sommes absurdement accoutumés au miracle de quelques signes écrits capables de contenir une imagerie immortelle, des tours de pensée, des mondes nouveaux avec des personnes vivantes qui parlent, pleurent, rient. [...] Et si un jour nous allions nous réveiller, tous autant que nous sommes, et nous trouver dans l'impossibilité absolue de lire ? »

Vladimir NABOKOV, *Feu pâle*
(traduction R. Girard et M.-E. Coindreau)

L'observation capitale de Joseph-Jules Déjerine

L'histoire de la neurologie de la lecture commence un matin d'octobre 1887. Ce jour-là, monsieur C., habile négociant en tissus retiré des affaires avec une confortable rente, homme cultivé et grand amateur de musique, s'installe confortablement avec un bon livre... lorsqu'il s'aperçoit avec stupéfaction qu'il ne peut plus lire un mot ! Depuis quelques jours, monsieur C. res-

petites attaques, toutefois, se dissipaient rapidement. Ce matin-là, c'est différent : la lecture lui est rigoureusement impossible. Pourtant, monsieur C. s'aperçoit qu'il sait toujours parler, distinguer avec netteté les objets et les personnes qui l'entourent, et même écrire. Pourquoi, alors, ne parvient-il plus à lire ne fût-ce qu'une seule lettre ?

Persuadé qu'il est atteint de troubles de la vision, qui céderont à l'usage de lunettes appropriées, monsieur C. s'en va consulter le Dr Landolt, puis, le 15 novembre 1887, le célèbre neurologue Joseph-Jules Déjerine, professeur agrégé et médecin de l'hospice de Bicêtre. Au terme d'une enquête psychologique et anatomique exemplaire, ce dernier tirera de l'observation de monsieur C. les premières conclusions solides sur les bases cérébrales de la lecture¹. « Cécité verbale pure », tel est le nom dont Déjerine baptisera cette perte sélective de la reconnaissance des lettres et des mots écrits, qui lui suggérera l'existence d'un « centre visuel des lettres » spécialisé pour la lecture.

Qu'établissent Déjerine et Landolt ? Ils démontrent d'abord que le patient ne reconnaît plus une seule lettre ni un seul mot. Confronté à un tableau de lettres,

« il croit avoir perdu la tête, car il se rend bien compte que les signes dont les noms lui échappent sont des lettres », « il affirme les voir parfaitement », et « esquisse du geste leur forme sans arriver à dire leur nom ». Si on le prie de recopier sur du papier ce qu'il voit, « il y parvient, mais non sans peine, en recopiant les lettres trait après trait, comme s'il s'agissait d'un dessin technique, examinant chaque jambage pour s'assurer de l'exactitude du dessin. Malgré tous ces efforts, il est incapable de nommer les lettres ».

Tel est en effet l'aspect le plus étrange de ce syndrome : le patient n'est aveugle qu'aux lettres et aux mots. Son acuité visuelle est bonne, il reconnaît aisément les objets, les visages, est capable de s'orienter dans un environnement nouveau, d'apprécier un tableau :

album de technique industrielle. Cet examen ne met pas une seule fois sa mémoire en défaut ; les dessins évoquent aussitôt le mot propre et l'idée de l'usage des objets. [...] En lui donnant le journal *Le Matin*, qu'il lit souvent, le malade dit : "C'est *Le Matin*, je le reconnais à sa forme", mais il ne peut lire aucune des lettres du titre..."

Certes, l'examen clinique met en évidence quelques déficits visuels. Monsieur C. ne voit plus bien dans la partie droite de l'espace. « Placés dans la moitié droite des champs visuels, les objets y semblent plus obscurs, moins nets que dans l'autre moitié » (ce que les neurologues appellent une hémianopsie droite partielle). Dans cette région, il ne distingue plus les couleurs (hémiachromatopsie) : la moitié droite du monde lui apparaît en noir et blanc. Mais ces déficits ne suffisent pas à expliquer l'immense difficulté de la lecture. Conscient de ses troubles visuels, monsieur C. oriente spontanément son regard afin que les lettres ou les mots qu'on lui demande de lire atterrissent un peu à gauche du point de fixation, là où sa vision est normale. Pourtant, cette stratégie n'améliore en rien sa lecture.

La meilleure preuve, sans doute, que monsieur C. souffre d'un trouble qui concerne spécifiquement les lettres réside dans le fait qu'il reconnaît toujours assez facilement les chiffres. Il est toujours capable de les lire, et même de réaliser des calculs complexes. Cette observation essentielle souligne que la lecture des chiffres ne fait pas appel aux mêmes voies anatomiques que la lecture des lettres et des mots. Sur le plan visuel, toutefois, les chiffres et les lettres ont des formes très semblables et, somme toute, totalement arbitraires et interchangeables. De fait, d'autres cultures choisissent d'utiliser la forme des lettres pour dénoter les chiffres – en arabe, par exemple, les formes ξ , θ , γ , λ , ν , qui ressemblent aux lettres de l'alphabet grec, représentent les chiffres 9, 8, 7, 6, 5. La dissociation chiffres-lettres ne saurait donc s'expliquer par une perte d'acuité visuelle. Aucune paire de lunettes, aussi sophistiquée soit-elle, ne soulagera monsieur C. La perte sélective de la lecture est d'origine cérébrale. La mala-

D'autres observations soulignent encore l'étrangeté du déficit. Déjerine insiste sur la remarquable préservation des capacités intellectuelles et verbales de monsieur C., qui s'exprime à la perfection avec un vocabulaire aussi étendu qu'avant son accident. Mieux, s'émerveille Déjerine, l'écriture reste intacte :

« Spontanément, le malade écrit aussi bien qu'il parle. En comparant de nombreux spécimens d'écriture que je lui fais tracer, on ne note aucune erreur, aucune faute d'orthographe, aucune transposition de lettres [...]. L'écriture sous dictée s'exécute également facilement et couramment, mais la lecture de ce que le malade vient d'écrire est absolument impossible. [...] Il s'impatiente de ces phénomènes, écrit les lettres les unes après les autres, et dit : "Je sais cependant écrire des lettres, les voici ; pourquoi ne puis-je les lire ?" »

En fait, Déjerine note bien une légère dégradation de l'écriture, mais celle-ci est imputable aux troubles de la vision :

« Vient-on à l'interrompre dans une phrase qu'il écrit sous dictée, il s'embrouille et ne sait plus où reprendre ses lettres ; de même, s'il fait une faute, il ne peut la retrouver. Autrefois, il écrivait plus vite et mieux, maintenant les caractères sont plus gros, tracés avec une certaine hésitation, car, dit-il, "il n'a plus le contrôle des yeux". En effet, loin de le guider, la vue de ce qu'il écrit semble plutôt le troubler, si bien qu'il préfère écrire les yeux fermés. »

La préservation de l'écriture va de pair avec celle des gestes. Ainsi le patient parvient-il encore à lire si on l'autorise à s'aider d'un geste qui esquisse les contours de la lettre. « C'est donc le sens musculaire qui réveille le nom de la lettre ; et la preuve, c'est qu'on peut lui faire dire un mot les yeux fermés en conduisant sa main dans l'air pour lui faire exécuter les contours des lettres. » Plus tard, d'autres neurologues montreront que la lecture tactile est également intacte : le patient déchiffre mieux les lettres qu'on lui trace sur la paume de la main, les yeux fermés, que celles qu'on lui met sous les yeux ! C'est une indication précieuse du niveau

L'alexie pure

Comment peut-on écrire, et même maîtriser l'orthographe des mots les plus rares, sans parvenir à lire une seule lettre ? La maladie de monsieur C. paraît tellement étrange qu'on pourrait s'interroger sur sa rareté même. Ne s'agit-il pas d'un hystérique ou d'un simulateur ? Non, répond Déjerine, car « nous possédons plusieurs belles observations cliniques de [cette] variété de cécité verbale ». De fait, la neurologie moderne va confirmer de façon éclatante les premières observations de Déjerine. On connaît aujourd'hui des centaines de cas de « cécité verbale pure », que l'on appelle aujourd'hui « alexie pure » ou « alexie sans agraphie » (trouble de la lecture sans atteinte de l'écriture)².

Pourquoi dit-on que l'alexie est « pure » ? Pour au moins quatre raisons, toutes notées par Déjerine dans son mémoire de 1892, et toutes répliquées depuis :

- le langage oral est intact ;
- l'écriture est intacte ;
- la reconnaissance visuelle des objets, des visages, des dessins, et même des chiffres, reste largement préservée³ ;
- la reconnaissance tactile ou gestuelle des lettres est normale.

L'alexie pure constitue ainsi une entité clinique caractéristique, certes peu fréquente, mais remarquablement cohérente dans ses traits majeurs, au point que l'on retrouve aisément aujourd'hui des patients très similaires au cas rapporté par Déjerine. Dans le détail, cependant, une source de variabilité sépare nettement deux catégories de patients⁴. Certains, comme monsieur C., ne parviennent plus à lire ni les mots ni même les lettres isolées. Ils éprouvent parfois même des difficultés à dire si une lettre majuscule et une lettre minuscule se

déchiffrer les mots en décryptant laborieusement, une par une, chacune de leurs lettres. Le déficit prend alors la forme d'un extrême ralentissement du temps de lecture, qui devient proportionnel au nombre de lettres que comprend le mot (figure 2.1). Cette lecture lettre à lettre révèle, comme en négatif, le déficit dont souffrent les patients alexiques : contrairement aux lecteurs normaux, ils ne parviennent plus à traiter en parallèle l'ensemble des lettres qui composent un mot⁶.

Des lésions révélatrices

Le cas de monsieur C. indique qu'il doit exister, dans le cerveau, des régions spécialisées dans la lecture, capables de transmettre en parallèle aux aires du langage des informations sur l'identité visuelle des lettres et des mots. Mais quelles sont les aires concernées ? Déjerine est conscient que seule l'autopsie peut donner à son observation « la valeur rigoureuse d'une expérience de physiologie ». Le 16 janvier 1892, un peu plus de quatre ans après l'accident initial, monsieur C. décède d'un second infarctus cérébral. Le neurologue, qui l'a suivi régulièrement, note que « malgré de patients exercices et beaucoup d'efforts, il n'a jamais pu réapprendre la signification des lettres et des mots ». Déjerine pratique aussitôt l'autopsie, dont il dévoilera les résultats à la Société de biologie quelques semaines plus tard. Celle-ci révèle que l'hémisphère droit est totalement intact, tandis que des lésions anciennes affectent la partie postérieure de l'hémisphère gauche. Elles occupent « le lobe occipital et plus particulièrement les circonvolutions de la pointe occipitale, de la base du cunéus, ainsi que celles du lobule lingual et du lobule fusiforme⁷ ». Le dessin original de la main de Déjerine est reproduit en figure 2.1. On y voit bien le contour de ces grandes « plaques jaunes atrophiques », cicatri-

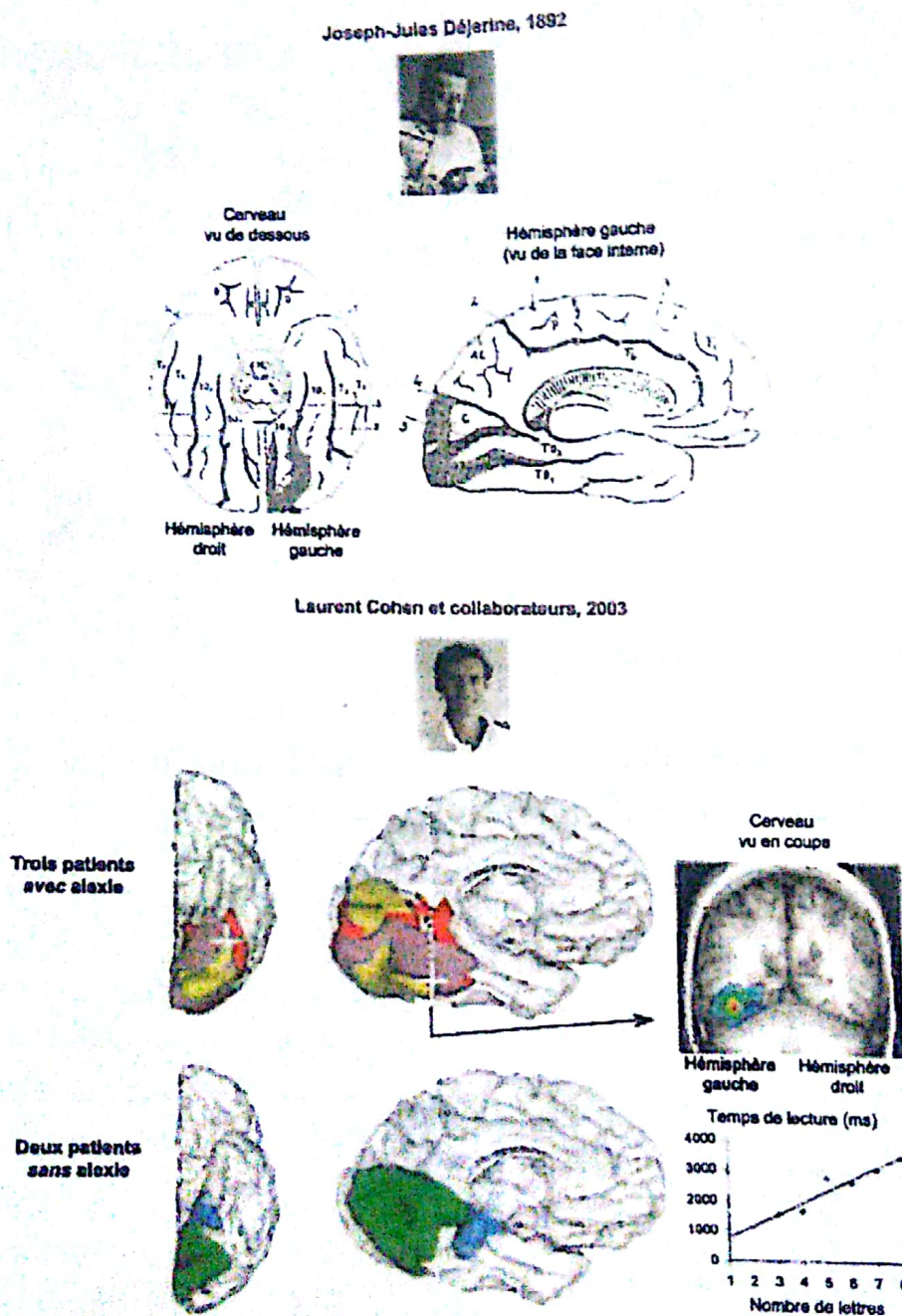


Figure 2.1 Après un accident vasculaire cérébral, il n'est pas rare qu'un patient perde la capacité de lire et devienne donc *alexique*. L'autopsie du premier patient alexique, décrit par Déjerine en 1892 (en haut), montre des lésions similaires à celles de patients contemporains, visualisées en imagerie par résonance magnétique (en bas, d'après Cohen et coll., 2003). Dans les deux cas, c'est la partie arrière de l'hémisphère gauche qui est lésée. L'intersection des lésions et leur confrontation avec celles d'autres patients qui ne souffrent pas d'alexie permettent d'isoler un site précis, la région occipito-temporale ventrale (croix blanche) dont la lésion affecte systématiquement la lecture. Les patients alexiques parviennent parfois à déchiffrer les mots lettre à lettre, mais leur temps de

Comment la lésion des régions visuelles affecte-t-elle sélectivement la lecture ? Pour interpréter son observation anatomique, Déjerine fait appel à la notion de déconnexion. En effet, la lésion de monsieur C. affecte en partie ce que les neurologues appellent la substance blanche, c'est-à-dire ces vastes faisceaux de connexions nerveuses qui relient des régions corticales distantes. De plus, elle concerne le pôle occipital, siège du traitement visuel. Enfin, elle affecte pour partie le cortex visuel gauche et pour partie les connexions qui font entrer dans l'hémisphère gauche les informations visuelles en provenance des régions visuelles droites (corps calleux).

Déjerine suppose donc que la lésion affecte la transmission des informations visuelles en direction d'une région qu'il appelle le « centre visuel des lettres » et qu'il localise, sur la base d'autres observations, dans le gyrus angulaire, aussi appelé pli courbe, un plissement de l'écorce cérébrale situé à la base de la région pariétale gauche. Selon Déjerine, ce centre visuel des lettres lui-même est intact – ce qui expliquerait que le patient sache encore écrire, orthographier ou reconnaître la forme des lettres par le geste. Toutefois, privée de ses entrées visuelles en provenance des deux hémisphères, cette région est littéralement déconnectée : elle ne reçoit plus les informations nécessaires à la lecture et se trouve donc incapable d'appliquer ses connaissances sur les lettres aux stimuli visuels. Ainsi, le patient n'est pas aveugle : il voit encore les formes des lettres et sait les traiter comme des objets visuels quelconques ; mais il ne peut pas les reconnaître comme des lettres ou des mots (« cécité verbale »).

L'analyse moderne des lésions

ments d'observation nouveaux : grâce à l'imagerie par résonance magnétique, il nous était notamment possible de nous affranchir de la contrainte de l'autopsie pour observer *in vivo* les lésions. C'est ainsi que nous avons observé plusieurs cas d'alexie pure. Pratiquement tous ces patients avaient des lésions dans le même secteur que monsieur C. : la région occipito-temporale gauche. Ces lésions sont fréquemment observées à la suite d'un infarctus de l'artère cérébrale postérieure gauche qui irrigue cette région. À titre d'exemple, la figure 2.1 montre les lésions observées chez trois de ces patients : toutes affectent la partie arrière et inférieure de l'hémisphère gauche.

De nos jours, l'IRM permet d'aller plus loin que ne le pouvait Déjerine. Il devient facile de digitaliser les lésions et les superposer dans un espace anatomique standardisé qui compense en partie les variations individuelles de taille et de forme du cerveau. Ainsi est-il possible de répondre à une question que Déjerine ne pouvait aborder que par un travail indirect de recoupement : peut-on séparer, parmi les régions atteintes, celles dont la lésion est directement responsable de l'alexie, et celles qui sont responsables d'autres troubles tels que la perte de vision des couleurs ? Ce travail ne fait que commencer, mais sa logique est simple : il suffit d'examiner un grand nombre de patients et de noter dans quelle mesure la lésion de telle ou telle région est systématiquement associée à une alexie. En examinant l'intersection des lésions de nombreux patients, on peut s'affranchir de la variabilité aléatoire des accidents vasculaires et isoler le ou les territoires corticaux associés de façon systématique aux troubles de la lecture. En éliminant, de cette image d'intersection, les secteurs lésés chez les patients qui ne souffrent *pas* d'alexie, on parvient enfin à isoler les régions nécessaires et suffisantes à la lecture.

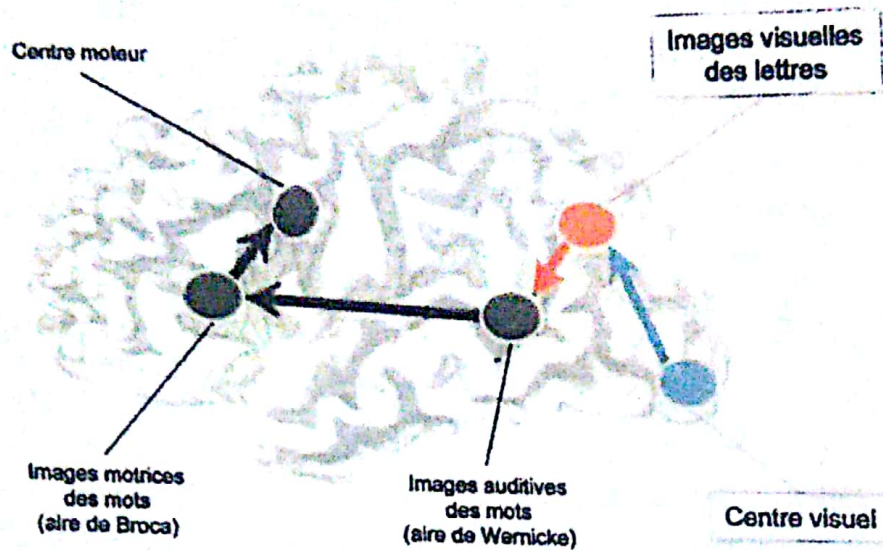
Une telle analyse, esquissée sur la figure 2.1, suggère que les régions les plus postérieures de l'hémisphère gauche ne jouent pas de rôle spécifique dans la lecture. On sait aujourd'hui

ture, mais contribue à la reconnaissance de la forme et de la couleur de tous les objets. Une lésion dans ces régions n'entraîne donc que des troubles visuels non spécifiques. Ces patients ont un champ visuel amputé et ne voient pas bien à droite du point où se fixe leur regard. Ils ont souvent des difficultés à voir la partie droite des mots et à programmer des mouvements des yeux vers la droite. Quoique ces troubles induisent un ralentissement, en particulier dans la lecture des phrases, ils doivent être distingués soigneusement de l'alexie pure proprement dite¹⁰.

En revanche, un peu plus en avant sur la face ventrale de l'hémisphère gauche se trouve une petite région qui est presque toujours atteinte chez les patients alexiques, et dont la lésion entraîne, presque toujours, une alexie pure. C'est la région occipito-temporale gauche – retenez bien ce terme, car il reviendra fréquemment, et n'hésitez pas à vous référer au diagramme anatomique de la figure 2.2 pour bien comprendre sa place dans le circuit de la lecture. C'est là, en effet, que se situe la région clé pour l'analyse visuelle des mots. Comme nous allons le voir, un vaste ensemble de données suggère que cette région joue un rôle prépondérant dans l'analyse de la forme des lettres, leur reconnaissance, et leur assemblage en mots. C'est pourquoi Laurent Cohen et moi avons proposé de l'appeler la *région de la forme visuelle des mots*¹¹.

L'interprétation de Déjerine doit donc être corrigée. Nous pensons aujourd'hui que ce n'est pas le gyrus angulaire qui permet la reconnaissance visuelle des lettres, mais une région distincte de celui-ci, située sur la face ventrale du cerveau (voir le schéma de la figure 2.2). L'erreur de Déjerine vient pour partie du fait que, chez monsieur C., cette région n'est pas directement lésée (cela se voit clairement sur la figure 2.1). Sans doute était-elle seulement déconnectée, exactement comme le supposait le grand neurologue. Celui-ci se méprenait simplement sur la localisation de la région déconnectée, qui appar-

L'ancien modèle neurologique de la lecture
(d'après Déjerine, 1892 ; Geschwind, 1965)



Une vision moderne des réseaux corticaux de la lecture

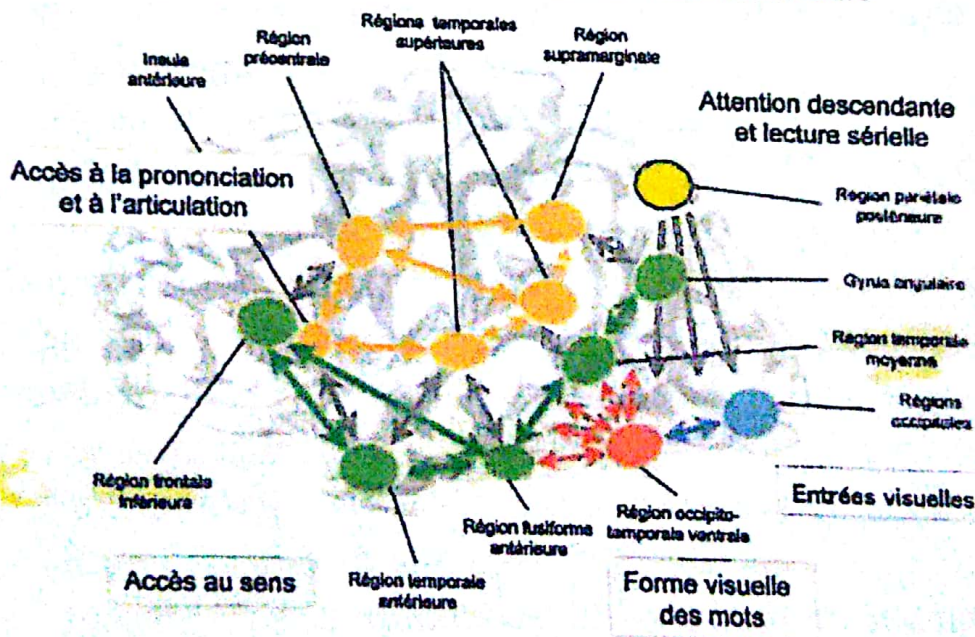


Figure 2.2 Le modèle neurologique classique de la lecture (en haut) est aujourd'hui remplacé par un schéma parallèle et foisonnant (en bas). La région occipito-temporale gauche reconnaît la forme visuelle des mots. Elle distribue les informations visuelles à de nombreuses régions, réparties dans tout l'hémisphère gauche, qui sont impliquées à des degrés divers dans la représentation du sens, de la sonorité et de l'articulation des mots. Toutes les régions en vert et orange ne sont pas spécifiques à la lecture : elles interviennent au premier chef dans le traitement du langage parlé. Apprendre à lire consiste donc à mettre en connexion les aires visuelles avec les aires du langage. Toutes les interconnexions entre régions qui sont bidirectionnelles

Nous savons maintenant qu'il y a au moins trois manières dont les lésions peuvent empêcher le fonctionnement de la région de la forme visuelle des mots¹². La situation la plus simple est évidemment lorsqu'une lésion la détruit directement. Cependant, il se peut également qu'elle soit déconnectée en amont, c'est-à-dire coupée de ses entrées visuelles, comme chez monsieur C. ; ou bien, qu'elle soit déconnectée en aval, et ainsi empêchée de transmettre le résultat de ses calculs à d'autres régions cérébrales. Dans tous les cas, le résultat est le même : une sévère incapacité à reconnaître les mots écrits. Nous verrons plus loin qu'il existe également des cas de déconnexion partielle, où cette région ne reçoit plus qu'une partie des informations visuelles. Il se peut, par exemple, qu'elle ne reçoive plus que les entrées visuelles de l'hémisphère gauche. On aboutit alors à des phénomènes encore plus paradoxaux : un patient qui ne sait lire que les mots qu'on lui présente du côté gauche !

Il y a un autre point, plus fondamental, sur lequel Déjerine se méprenait : c'est l'architecture générale des réseaux cérébraux de la lecture. Déjerine, entraînant à sa suite d'autres experts tel le grand neurologue américain Norman Geschwind¹³, envisageait un circuit linéaire et somme toute assez simple. Les images visuelles étaient envoyées vers le gyrus angulaire, où elles entraient en contact avec le répertoire d'images visuelles des mots. L'activité se propageait ensuite à la région de Wernicke, siège des images auditives des mots, puis à la région de Broca, site de leurs formes articulatoires, et enfin au cortex moteur qui se chargeait du contrôle des muscles. En somme, quelques étapes successives suffisaient à passer de la vision à l'audition, à l'articulation et la prononciation. Derrière cette vision strictement sérielle de la lecture se devine l'influence des analogies mécaniques en vogue au XIX^e siècle. Le fonctionnement de la mécanique cérébrale était alors comparé à la propagation de l'électricité ou à la répartition de la pression dans une machine à vapeur. En remontant plus loin encore, il y a comme

expliquait nos réflexes par la circulation des « esprits animaux » dans la tuyauterie du corps. Le modèle de l'arc réflexe restait la vision dominante.

On se saurait donc reprocher à Déjerine de n'avoir pas anticipé un siècle de psychologie et de neurosciences. Une vision beaucoup plus complexe, foisonnante et parallèle est venue remplacer le modèle sériel des neurologues. Nous savons aujourd'hui, pour avoir tenté de la programmer sur nos ordinateurs, à quel point la reconnaissance des formes visuelles est un problème difficile, qui ne saurait se résumer à la simple excitation de quelques « images » dans le cerveau. Comme nous l'avons vu au premier chapitre, toute une série d'opérations complexes est nécessaire afin d'aboutir à une reconnaissance invariante des caractères écrits.

Encore celle-ci n'est-elle qu'une première étape de la lecture. À partir de la représentation visuelle de la chaîne des lettres, de multiples informations doivent encore être retrouvées : les racines des mots, leur sens, leur sonorité, la façon de les articuler... Chacune de ces opérations fait appel à une ou plusieurs aires corticales distinctes. Par ailleurs, les connexions corticales ne s'établissent pas sous forme de chaînes linéaires : chaque région en contact plusieurs autres en parallèle. Toutes les connexions sont d'ailleurs réciproques : chaque fois qu'une région A contacte une région B, la région B projette également en retour vers la région A.

Sur la base de ces principes, j'ai tenté d'esquisser, au bas de la figure 2.2, ce que pourrait être une vision moderne de la lecture dans le cerveau. Toutes les régions qui apparaissent dans ce diagramme contribuent de façon certaine à la lecture des mots. Pourtant c'est un schéma qui doit être considéré comme provisoire. Paradoxalement, il est sans doute encore beaucoup trop simple, car de nombreuses régions et connexions manquent encore à l'appel. La différence la plus évidente entre cette vision moderne et le diagramme de Déjerine est l'abandon d'une vision sérielle de l'activation cérébrale, au profit d'un schéma

Le 5 Juin 2018

Sciences et technologies de la communication

I/ Une aire cérébrale pour une compétence culturelle

Depuis une cinquantaine d'années, la psychologie cognitive analyse la mécanique humaine de la lecture. Son objectif est de comprendre quels « algorithmes » au sens informatique du terme un bon lecteur applique au problème de la reconnaissance des mots.

La complexité de ce système est notamment illustrée par l'extrême difficulté à développer des systèmes artificiels de lecture, en particulier pour les chèques ou les enveloppes dont l'écriture est manuscrite.

Après avoir lu le texte de Stanislas Dehaene, vous répondrez aux questions qui le suivent. Vous attacherez une attention particulière à la concision et à la précision de vos réponses. Il en sera tenu compte dans l'évaluation.

« Lorsque nous lisons un texte, nous n'avons pas conscience de la difficulté et de la complexité des opérations qui sont réalisées par notre système visuel. En une fraction de seconde notre cerveau reconnaît les mots et accède à leur sens. Cette opération est plus complexe qu'il n'y paraît. D'une part, notre système visuel s'adapte aux multiples variations de forme des mots. Ainsi, nous savons reconnaître le mot « quatre », que celui-ci soit présenté en majuscules ou en minuscule. Pour le montrer, mes collègues et moi avons utilisé une méthode de masquage subliminal (Dehaene et Naccache, 2001, 2004). Nous sommes même capables de lire des mots dans lesquels une lettre sur deux apparaît en MiNuScUIEs. La région de la forme visuelle des mots est responsable de cette capacité.

D'autre part, nous sommes étonnamment sensibles aux minuscules différences qui, parfois, distinguent deux mots très différents, tels que « deux » et « doux ». Il est clair, enfin, que cette capacité résulte d'un long apprentissage. Ce qui distingue deux mots dans une langue peut n'avoir aucune importance dans une autre. L'apprentissage de la lecture semble inculquer à notre cerveau un sens nouveau, celui de percevoir, en un clin d'oeil, les traits visuels qui sont pertinents pour la lecture et ceux qui ne sont pas. Selon que nous apprenions à lire le chinois, l'hébreu ou les hiéroglyphes, notre cerveau saura reconnaître sans hésitation ces caractères, ou au contraire n'y verra que des formes abstraites et impossibles à décoder.

L'imagerie fonctionnelle par résonance magnétique (IRMf) permet aujourd'hui de visualiser l'activité du cerveau au cours de nombreuses activités cognitives. Pour visualiser le circuit cérébral de la lecture, il suffit de placer un adulte volontaire dans le champ de l'aimant et de mesurer son débit sanguin cérébral alors qu'on lui présente des mots sur un écran d'ordinateur. Il serait erroné de penser qu'une seule aire cérébrale se charge d'une opération aussi complexe que la lecture. La reconnaissance visuelle, l'accès au lexique mental, la récupération du sens de chaque mot, leur intégration dans le contexte de la phrase, et enfin leur prononciation mobilisent plus d'une dizaine d'aires cérébrales réparties dans les régions occipitales, temporales, pariétales et frontales.

Concentrons-nous sur une petite région qui intervient aux étapes les plus précoces de la lecture. Cette région, que l'on appelle l'aire de la forme visuelle des mots, fait partie de la voie visuelle ventrale gauche, une bande de cortex qui s'étend à la base du cerveau depuis le pôle occipital, impliqué dans l'analyse des traits visuels, jusqu'à la région fusiforme antérieure où l'identité des objets est extraite. Une première surprise est l'étonnante reproductibilité de cette région d'un individu à l'autre. Il est aisé de la repérer : quelques minutes de lecture suffisent à l'activer de façon reproductible chez n'importe quel bon lecteur. On la retrouve systématiquement à la même position chez tous les individus, dans une région du cerveau appelé le sillon occipito-temporal, qui borde le gyrus fusiforme. Dans le système de coordonnées de Talairach, qui permet de repérer toute région du cerveau par ses coordonnées tridimensionnelles, la variabilité de cette région d'un individu à l'autre n'est que de l'ordre de 5 millimètres.

De nombreuses caractéristiques démontrent que cette région joue un rôle particulier dans l'identification visuelle des mots. Tout d'abord, elle ne s'active que pour des mots écrits, pas lorsque les mots sont présentés à l'oral. De plus, elle ne semble pas s'intéresser au sens des mots, mais uniquement à leur forme visuelle. Ainsi, l'on observe exactement la même quantité d'activation lorsque l'on présente des mots qui existent en français ou ce que l'on appelle des pseudo-mots, c'est-à-dire des suites de lettres telles que « plougiston » qui sont prononçables et qui obéissent aux règles du français, mais qui n'appartiennent pas au dictionnaire.

La lésion de cette région, à la suite par exemple d'un accident vasculaire, entraîne d'ailleurs un syndrome singulier, l'alexie pure, décrite par Joseph-Jules Déjerine dès 1892. Le patient ne parvient plus à lire les mots avec rapidité (a-lexie); tout au plus parvient-il à déchiffrer péniblement l'identité du mot lettre à lettre, souvent en les traçant du doigt. On parle d'alexie « pure » pour deux raisons. D'abord, parce que le patient parvient toujours à *écrire* les mots même qu'il ne parviendra pas à relire quelques instants plus tard (on parle donc aussi d' « alexie sans agraphie ») ; il n'a également aucune difficulté particulière à comprendre ou à répéter des mots parlés. Ensuite, parce que d'autres formes de reconnaissance visuelle, par exemple l'identification des visages ou la reconnaissance des objets de la vie quotidienne peuvent demeurer largement préservés. «

Stanislas Dehaene

Unité INSERM 562 « Neuroimagerie cognitive »

1. Le cerveau d'un bon lecteur doit être capable de conjuguer deux compétences apparemment contraires concernant le traitement de la forme des lettres. Lesquelles ?
2. Expliquez la méthode de masquage subliminal évoquée dans le texte en vous appuyant sur l'exemple de l'expérience vue en cours, sans oublier de :
 - a. Décrire la tâche indirecte assignée au sujet
 - b. Indiquer ce qui est mesuré dans l'expérience
 - c. Fournir les deux conclusions majeures que l'on peut tirer du résultat de cette expérience sur la question de la conscience.
3. Avec la méthode de masquage subliminal, on peut comparer l'activité du cerveau dans deux situations : lorsque le sujet est conscient d'avoir perçu un mot à l'écran et lorsqu'il reçoit cette même stimulation visuelle sans s'en rendre compte. Quelle méthode d'imagerie permet de le faire ? Existe-t-il une différence d'activation cérébrale entre les deux situations ?
4. Le patient atteint d'alexie pure est capable de lire assez facilement les chiffres. Expliquez en quoi ce fait est surprenant. Que peut-on en déduire sur l'organisation cérébrale ?

II/ La nature polymorphe de notre activité mentale

1. De quelle activité mentale systématique s'accompagne la prise de connaissance d'une information par un sujet humain ? Donnez un exemple montrant que cette activité est irrépressible.
2. A quelle question précise voulait répondre Milgram en mettant en œuvre son expérience concernant l'obéissance à l'autorité ? Quelle était sa conclusion et pourquoi a-t-elle bouleversé le monde scientifique ? Quelles sont les trois conditions nécessaires pour obtenir l'obéissance d'une majorité des sujets ?
3. Les neurones miroirs sont une classe particulière de neurones du cortex pré-moteur qui s'activent lorsque le sujet se trouve dans deux types de situations similaires. Précisez, en une phrase pour chacune, ces deux situations. Quel rôle jouerait un tel système miroir que l'on implémenterait dans une machine ?

III/ Du cerveau... à la machine

1. Le cerveau est constitué de deux sortes de cellules nerveuses, les neurones et les cellules gliales. A quoi correspondent ces deux types d'entité dans un ordinateur ? Rappelez l'origine du nom des cellules gliales puis donnez un exemple montrant leur importance critique dans les opérations cognitives.
2. Quelle propriété fonctionnelle essentielle, qui caractérise le cerveau, le distingue fondamentalement des ordinateurs qui existent aujourd'hui et compense sa vitesse de transmission de l'information plus lente ?
3. Quelle propriété matérielle distingue significativement le cerveau de l'ordinateur d'aujourd'hui ?
4. « Si vous me demandez si un jour on pourra créer une machine capable d'être dotée de conscience, je vous répondrai « bien sûr, puisque c'est exactement ce que nous sommes ». Expliquez cette phrase de Daniel Dennett. Citez et expliquez les deux composantes qu'une machine doit posséder selon la théorie de Dehaene et Naccache pour être dotées d'une conscience.
5. Le Human Brain Project a pour ambition de révolutionner les concepts actuels de l'informatique, comment les chercheurs pensent-ils y parvenir ?