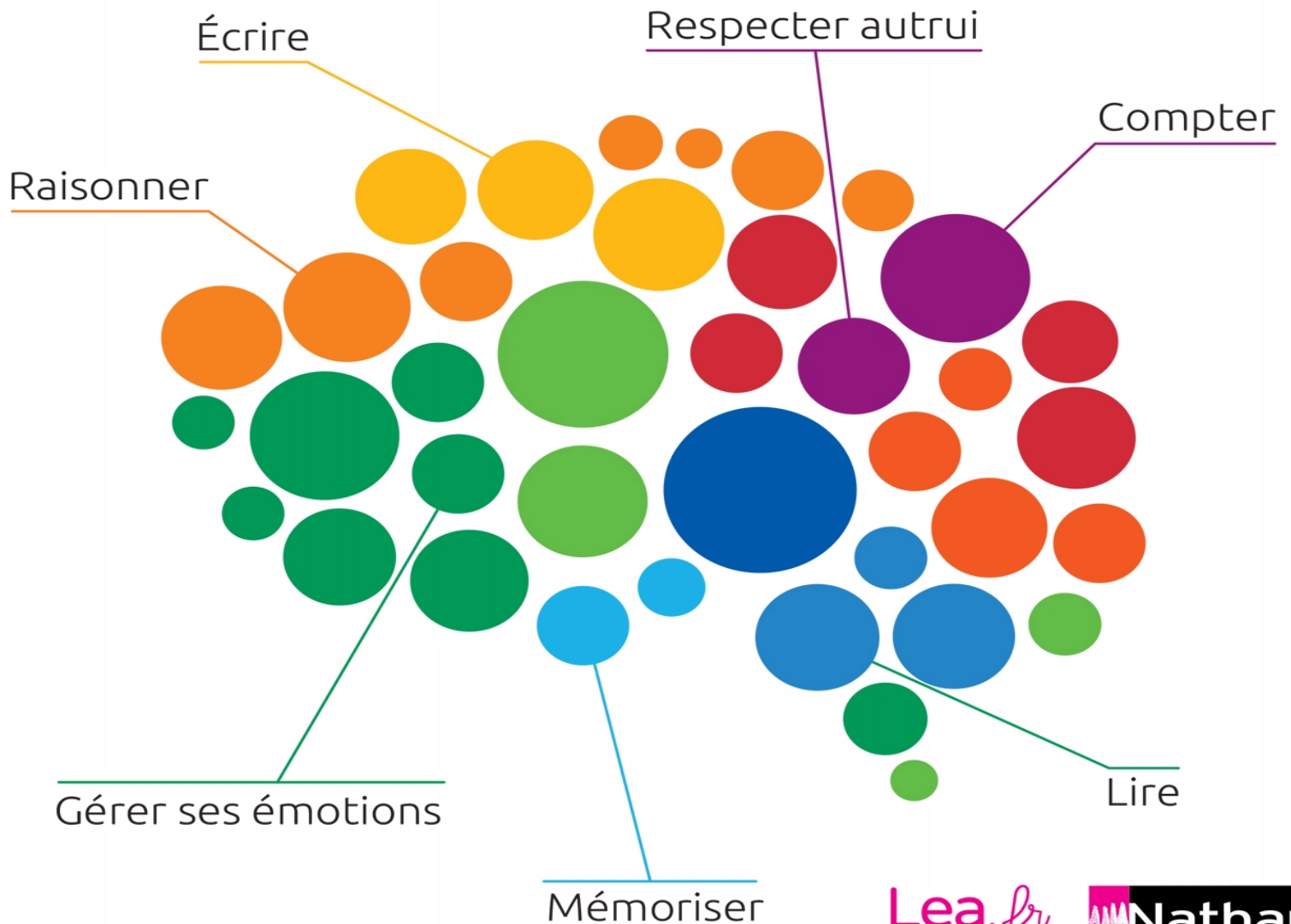


COLLECTION  LES REPÈRES
PÉDAGOGIQUES

Le cerveau et les apprentissages

Olivier Houdé et Grégoire Borst

Christophe André
Alain Berthoz
Jean-Pierre Changeux
Antonio Damasio
Hanna Damasio
Francis Eustache
Michel Fayol
Jean-Philippe Lachaux
Philippe Peigneux
Jérôme Prado
Joëlle Proust
Jeanne Siaud-Facchin
Johannes Ziegler



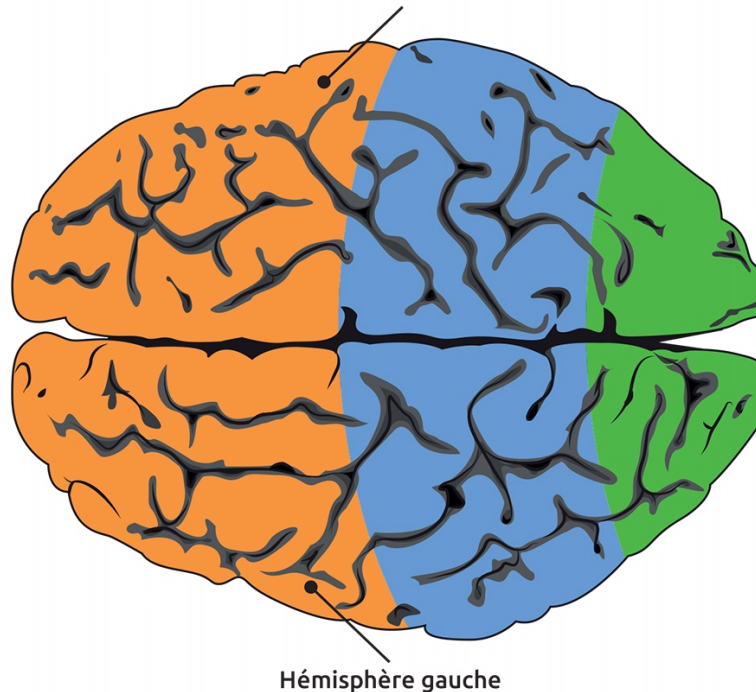
Lea.fr

 Nathan

Ce livre numérique est une création originale notamment protégée par les dispositions des lois sur le droit d'auteur. Il est identifié par un tatouage numérique permettant d'assurer sa traçabilité. La reprise du contenu de ce livre numérique ne peut intervenir que dans le cadre de courtes citations conformément à l'article L.122-5 du Code de la Propriété Intellectuelle. En cas d'utilisation contraire aux lois, sachez que vous vous exposez à des sanctions pénales et civiles.

Vue supérieure du cerveau

Hémisphère droit



Vue médiane du cerveau

Gyrus cingulaire

Détection des conflits cognitifs,
des erreurs, des incongruités

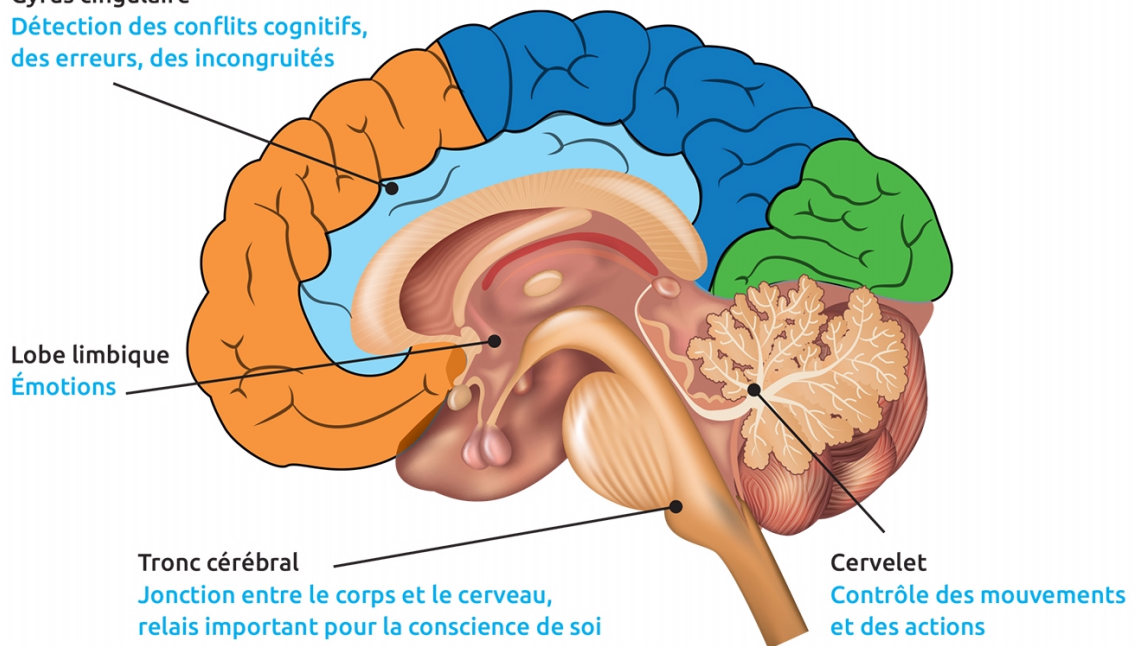
Lobe limbique
Émotions

Tronc cérébral

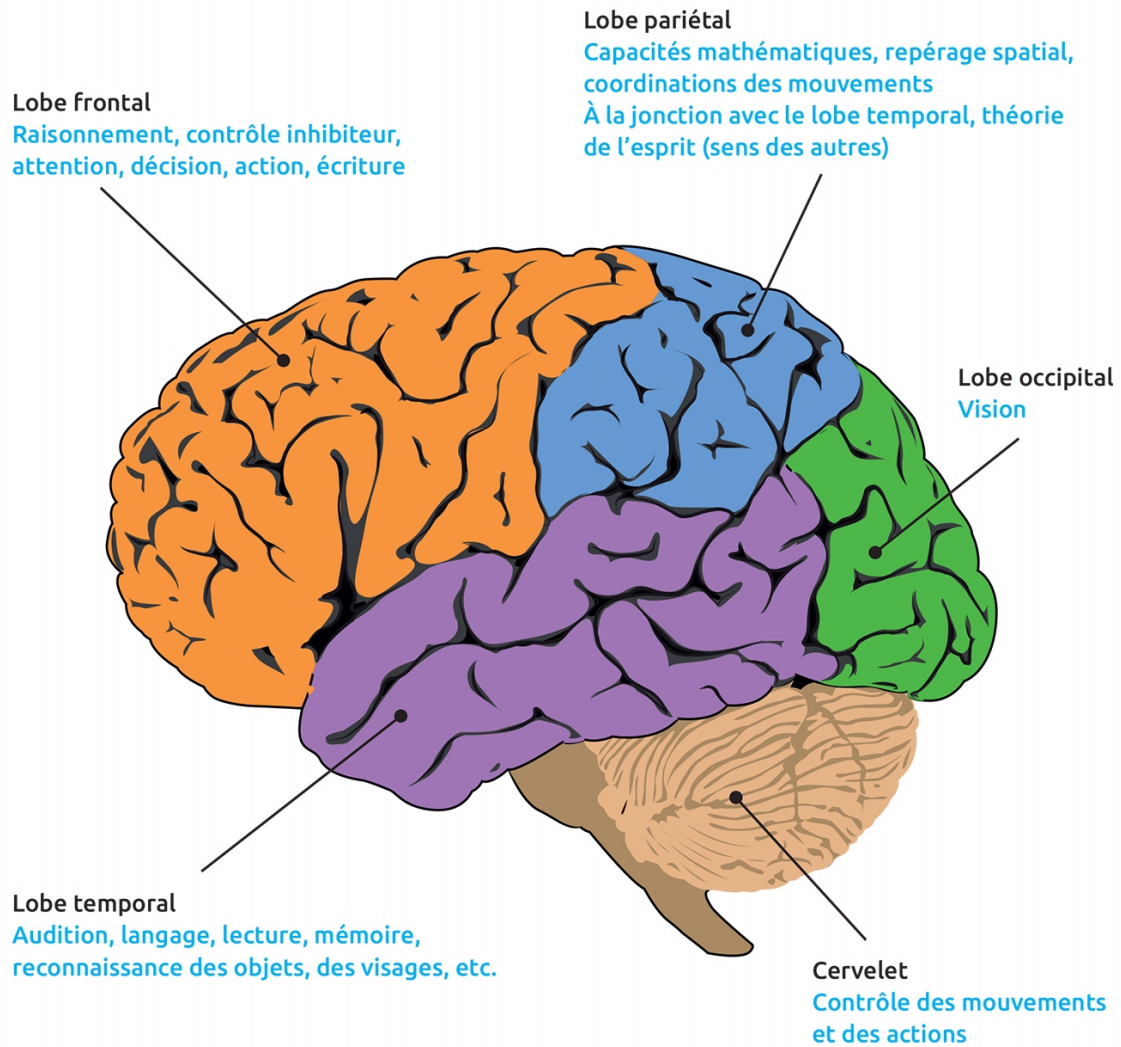
Jonction entre le corps et le cerveau,
relais important pour la conscience de soi

Cervelet

Contrôle des mouvements
et des actions



Vue latérale du cerveau

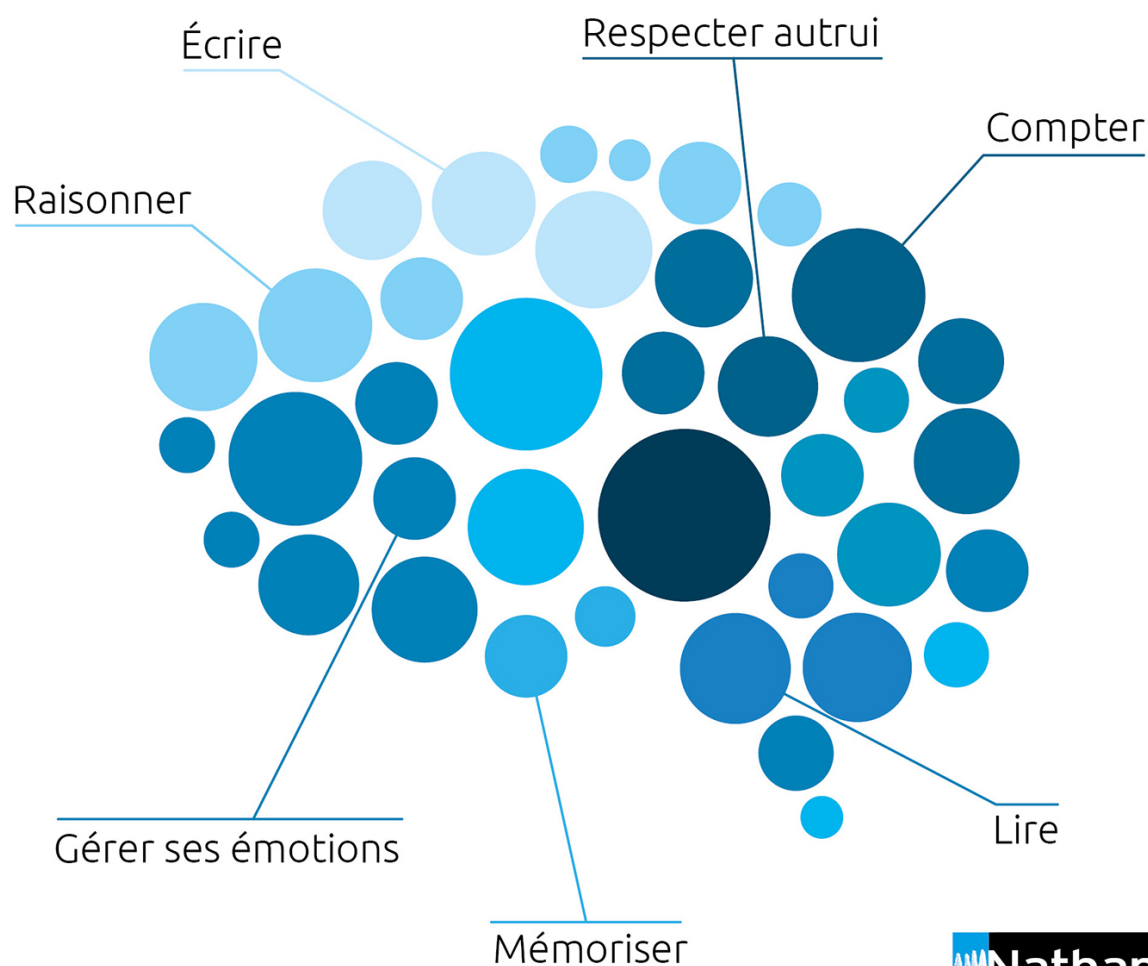


Les fonctions associées aux lobes sont indiquées en bleu.

COLLECTION ● LES REPÈRES
PÉDAGOGIQUES

Le cerveau et les apprentissages

Olivier Houdé et Grégoire Borst



Édition : Pascaline Citron, Stéphanie Dizel-Doumenge
Création et mise en page : Richard Takvorian
Illustrations : Claire Thibon (p. 21 et 96), Richard Takvorian
Fabrication : Camille Friquet
Compositeur epub : Kepler Systèmes d'Informations, Roumanie

© Editions Nathan - Lea.fr 2022
ISBN : 9782091247106
Code éditeur : 124710

Sommaire

Introduction

Olivier Houdé et Grégoire Borst

Le cerveau au cœur du programme : lire, écrire, compter et penser

1 Apprendre avec ses neurones Jean-Pierre Changeux

- I. Les briques élémentaires du cerveau
- II. Comment se construit un cerveau
- III. Épigenèse neuronale et évolution culturelle
- IV. De la matière à la pensée consciente

Focus Au début était l'action Alain Berthoz

Focus Le point de vue d'un inspecteur général de l'Éducation nationale Jean-Pierre Bellier

2 Lire Johannes Ziegler et Anaïs Deleuze

- I. Les mécanismes d'apprentissage de la lecture
- II. Pratiques d'enseignement de la lecture basées sur les données probantes
- III. Les « troubles dys »

Focus La lecture : au-delà de la querelle des méthodes Roland Goigoux

3 Écrire Michel Fayol

- I. Un bilan des données issues de la neuropsychologie et de l'étude des adultes
- II. L'évolution des productions à l'école élémentaire

4 Compter et penser-raisonner Olivier Houdé

- I. Compter ou la genèse des mathématiques
- II. Penser-raisonner ou la genèse de la logique

Focus Du sens des quantités au raisonnement mathématique Jérôme Prado

Les fonctions cognitives transversales du cerveau

5 L'attention Jean-Philippe Lachaux

- I. Qu'est-ce que l'attention ?

II. Le contrôle volontaire de l'attention

III. L'attention et la concentration

Focus La méditation pour les enfants Christophe André

6 La mémoire Bérengère Guillery-Girard et Francis Eustache

I. La mémoire ou les mémoires ?

II. Développement de la mémoire chez l'enfant

III. Soutien aux apprentissages

Focus Le sommeil et les apprentissages Philippe Peigneux

7 Les fonctions exécutives Grégoire Borst

I. Les fonctions exécutives et leur développement

II. Le rôle des fonctions exécutives dans le développement cognitif et les apprentissages scolaires

III. Les fonctions exécutives : comment les entraîner ?

Focus Facteurs socioéconomiques et cerveau Teresa Iuculano

8 La métacognition et l'auto-évaluation Joëlle Proust

I. Qu'est-ce que la métacognition ?

II. La métacognition à l'école : les controverses

III. Métacognition procédurale et pédagogie

IV. Métacognition conceptuelle et pédagogie

Focus Les émotions, les sentiments et l'éducation Antonio Damasio et Hanna Damasio

Les applications en neurosciences et sciences cognitives : quelques exemples

9 Les cogni'classes Jean-Luc Berthier

I. Les grands principes des *cogni'classes*

II. Les axes de l'apprentissage sur lesquels s'engagent les *cogni'classes*

III. Les conditions de mise en œuvre des *cogni'classes*

IV. Les pistes pédagogiques

Focus Le cerveau et les sciences cognitives à l'INSPÉ Alain Frugière

10 Du labo à l'école : Une recherche collaborative en neurosciences, LaPsyDÉ – Lea.fr
Pascaline Citron et Marie Létang

I. Pourquoi faire de la recherche collaborative ?

II. Comment passer du laboratoire à l'école ?

III. Comment s'est passée la première année de recherche collaborative ?

Focus Le point de vue d'une professeure des écoles sur la communauté pédagogique

Lea.fr Laure Argouet-Stol

11 Sciences, sciences cognitives et éducation : l'expérience de *La main à la pâte* Elena Pasquinelli

- I. Le dispositif *La main à la pâte*
- II. Sciences cognitives et sciences de l'éducation
- III. Les sciences cognitives et la Fondation *La main à la pâte*

Focus Des groupes de formation-action sur la créativité Mathieu Cassotti, Anaëlle Camarda et Lison Bouhours

12 Troubles d'apprentissage et difficultés scolaires : l'apport des sciences cognitives Hervé Glasel

- I. De la difficulté scolaire aux troubles des apprentissages
- II. Le primat du bilan neuropsychologique dans la prise en charge des troubles des apprentissages
- III. La mise en place d'une feuille de route pour l'enfant, les enseignants et les parents
- IV. Stimulation des fragilités, contournement des difficultés
- V. Pédagogie renouvelée et différenciée : le travail de l'enseignant
- VI. Règles générales des apprentissages et spécificités issues des troubles

Focus Mais QI sont vraiment les enfants surdoués ? Jeanne Siaud-Facchin

Annexes

Petit lexique du cerveau

Bibliographie

Sitographie

Les auteurs

Ont contribué à cet ouvrage (dans l'ordre des chapitres et des focus)

Pour les chapitres

Jean-Pierre Changeux

Professeur honoraire au Collège de France, Institut Pasteur et Académie des sciences.

Johannes Ziegler

Directeur de recherches au CNRS, Université d'Aix-Marseille, Directeur du Laboratoire de Psychologie Cognitive, Directeur adjoint de l'Institut de Convergences « Langage, Communication et Cerveau ». Membre du Conseil Scientifique auprès du Ministre de l'Éducation nationale.

Anaïs Deleuze

Orthophoniste et Formatrice, Montréal, Canada.

Michel Fayol

Instituteur puis Inspecteur stagiaire. Professeur émérite en Psychologie, Université Clermont Auvergne & CNRS.

Olivier Houdé

Instituteur de formation initiale. Professeur de psychologie du développement à l'Université de Paris. Directeur honoraire du Laboratoire de Psychologie du Développement et de l'Éducation de l'enfant (LaPsyDÉ, CNRS), La Sorbonne, et Administrateur de l'Institut Universitaire de France (IUF). Membre de l'Académie des sciences morales et politiques.

Jean-Philippe Lachaux

Directeur de recherches à l'INSERM, membre du Centre de Recherches en Neurosciences de Lyon, Université Lyon 1.

Bérengère Guillery-Girard

Neuropsychologue, Maître de Conférences HDR à l'EPHE, Université de Caen, membre du Laboratoire de Neuropsychologie et Imagerie de la Mémoire Humaine (NIMH, INSERM, EPHE).

Francis Eustache

Directeur d'études à l'EPHE, Université de Caen, Directeur du Laboratoire de Neuropsychologie et Imagerie de la Mémoire Humaine (NIMH, INSERM, EPHE), Pôle des Formations et de Recherche en Santé (PFRS).

Grégoire Borst

Professeur de psychologie du développement et de neurosciences cognitives de l'éducation

à l'Université de Paris. Directeur du Laboratoire de Psychologie du Développement et de l'Éducation de l'enfant (LaPsyDÉ, CNRS), La Sorbonne, et Membre Junior de l'Institut Universitaire de France (IUF).

Joëlle Proust

Directrice de recherches émérite au CNRS, Institut Jean-Nicod, École Normale Supérieure, Paris. Membre du Conseil Scientifique auprès du Ministre de l'Éducation nationale.

Jean-Luc Berthier

Proviseur honoraire et ancien ingénieur de formation à l'École supérieure de l'Éducation nationale, de l'enseignement supérieur et de la recherche (ESENESR, Ministère de l'Éducation nationale, Poitiers), créateur des Cogni'classes et animateur du site « Sciences cognitives, comment changer l'école », <http://sciences-cognitives.fr/>.

Pascaline Citron

Directrice du département Pédagogie Lea.fr, Éditions Nathan.

Marie Létang

Doctorante en psychologie au LaPsyDÉ (CNRS) de l'Université Paris Descartes, bénéficiaire d'une bourse CIFRE Nathan - LaPsyDÉ.

Elena Pasquinelli

Membre de La Fondation La Main à la Pâte, membre associée de l'Institut Jean-Nicod, École Normale Supérieure, Paris. Membre du Conseil Scientifique auprès du Ministre de l'Éducation nationale.

Hervé Glasel

Neuropsychologue, spécialiste du développement de l'enfant et de l'adolescent. Fondateur et directeur du CERENE, Centre de Référence pour l'Évaluation Neuropsychologique de l'enfant et des écoles du CERENE, accueillant des enfants présentant des troubles des apprentissages.

Pour les focus

Alain Berthoz

Professeur honoraire au Collège de France, Membre de l'Académie des sciences et de l'Académie des technologies.

Jean-Pierre Bellier

Inspecteur général honoraire de l'Éducation nationale, spécialisé en psychologie scolaire et en sciences cognitives.

Roland Goigoux

Professeur de sciences de l'éducation, Université Clermont-Auvergne.

Jérôme Prado

Chargé de recherches au CNRS, membre de l'Institut des Sciences Cognitives Marc Jeannerod, Université de Lyon 1.

Christophe André

Médecin psychiatre à l'hôpital Sainte-Anne à Paris.

Philippe Peigneux

Professeur de neuropsychologie clinique à l'Université Libre de Bruxelles (ULB), Directeur de l'Unité de Recherches en Neuropsychologie et Neuroimagerie Fonctionnelle (UR2NF) au Centre de Recherches Cognition et Neurosciences.

Teresa Iuculano

Chargée de recherches au CNRS, membre du Laboratoire de Psychologie du Développement et de l'Éducation de l'enfant (LaPsyDÉ, CNRS), Université de Paris, La Sorbonne.

Antonio Damasio

Professeur de neurosciences et Directeur du Brain and Creativity Institute à l'Université de Californie du Sud à Los Angeles.

Hanna Damasio

Professeur de neurosciences et membre du Brain and Creativity Institute à l'Université de Californie du Sud à Los Angeles.

Alain Frugière

Professeur des universités en physiologie, Directeur de l'INSPÉ de l'Académie de Paris.

Laure Argouet-Stol

Professeure des écoles à Paris.

Mathieu Cassotti

Professeur de psychologie du développement à l'Université de Paris, membre du Laboratoire de Psychologie du Développement et de l'Éducation de l'enfant (LaPsyDÉ, CNRS), La Sorbonne, et Membre Junior de l'Institut Universitaire de France (IUF).

Anaëlle Camarda

Post-doctorante au Laboratoire de Psychologie du Développement et de l'Éducation de l'enfant (LaPsyDÉ, CNRS), La Sorbonne, et au Centre de Gestion Scientifique de l'École des Mines de Paris.

Lison Bouhours

Doctorante au Laboratoire de Psychologie du Développement et de l'Éducation de l'enfant (LaPsyDÉ, CNRS), La Sorbonne.

Jeanne Siaud-Facchin

Psychologue, psychothérapeute, fondatrice de Cogito'Z, Centre Européen de Psychologie intégrative.

Introduction

Ces dernières années ont été celles d'une mise en avant des neurosciences et de leur héros, le cerveau humain, par le Ministre français de l'Éducation nationale, Jean-Michel Blanquer. C'était une première dans l'histoire de l'école depuis Jules Ferry. Mieux comprendre ce qui se passe dans la tête des élèves n'était plus seulement une question de psychologie scolaire au sens classique du terme depuis Alfred Binet (1857-1911), mais aussi une question de science plus « dure », biologique : celle des neurones et du cerveau. En particulier « le cerveau qui apprend ».

Les éditions Nathan ont voulu au plus vite offrir aux professeurs des écoles un état de l'art ou plutôt de la science en la matière dans leur collection « Les repères pédagogiques ». Nous réalisons déjà avec notre laboratoire du CNRS, le LaPsyDÉ¹, à la Sorbonne (qui fut d'ailleurs le laboratoire de Binet jadis), depuis la rentrée 2017, *via* Lea.fr (le réseau collaboratif des enseignants du primaire) une grande expérience de recherche participative en sciences cognitives, à propos du cerveau, de ses heuristiques ou automatismes, de ses algorithmes, des fonctions exécutives du cortex préfrontal (inhibition, flexibilité, mémoire de travail) avec des professeurs des écoles de France et de toute la francophonie. Ce fut un succès et beaucoup de professeurs intéressés par le cerveau des élèves étaient au rendez-vous ! Les élèves aussi d'ailleurs. En parallèle, nous avons rédigé pour eux un album jeunesse (dès 7 ans) intitulé *Mon cerveau* chez le même éditeur² à lire en famille ou à l'école. Son succès d'édition confirme que le « gout des neurosciences cognitives » existe bel et bien chez les enfants, leurs parents et les professeurs. C'est une réelle curiosité. Un désir de science pour l'école ; un désir aussi de connaissance de soi.

C'est donc tout naturellement que nous avons accepté la proposition de Pascaline Citron, créatrice et responsable de Lea.fr, ainsi que directrice de cette collection, de réunir ici parmi les meilleurs spécialistes français et internationaux de la question du cerveau et des apprentissages. C'est ce que

l'on peut appeler le nouveau domaine de la neuroéducation ou de la neuropédagogie³.

La naissance de la neuropédagogie ou neuroéducation

Rien n'est plus amusant et instructif pour comprendre la biologie réellement humaine que d'observer un enfant qui apprend à l'école ou ailleurs. Qu'est-ce que la connaissance ? Comment l'acquiert-on ? Voilà deux questions essentielles que se posent les sciences dites « cognitives » (de « cognition » ou fonction de connaissance : perception, apprentissage, mémoire, langage, raisonnement, intelligence, etc.). Comme le disait déjà le psychologue suisse Jean Piaget (1896-1980), le développement de l'intelligence chez l'enfant est la forme optimale de l'adaptation biologique. Mais il lui manquait toutefois, à l'époque, les moyens technologiques pour l'observer *in vivo*.

Aujourd'hui, avec les progrès fulgurants et combinés de l'informatique, des sciences cognitives et de l'imagerie cérébrale, on peut produire sur ordinateur des images numériques tridimensionnelles reliées à l'activité des neurones en tout point du cerveau de l'adulte ou de l'enfant. En particulier, au cours des apprentissages cognitifs. C'est l'une des plus importantes révolutions scientifiques survenues au tournant des xx^e et xxi^e siècles.

En France, dès les années 1980, c'est au neurobiologiste Jean-Pierre Changeux que l'on doit d'avoir anticipé avec *L'Homme neuronal* ce nouveau champ des sciences humaines « neurocognitives », en relation avec l'imagerie cérébrale⁴. L'ambition était grande : celle d'une science naturelle et cognitive de l'humain (le cerveau dans son corps et en contexte social). Nous en sommes encore aujourd'hui aux tout premiers pas de cette science de la pensée et des apprentissages, en particulier en matière d'éducation scolaire. En 2005, la revue américaine *Science* publiait un éditorial d'Elsbeth Stern intitulé « La pédagogie rencontre les neurosciences » et en 2014, la revue *Nature Neuroscience* publiait un article de Mariano Sigman et collègues intitulé « Neurosciences et éducation : Le meilleur moment pour construire le pont » !⁵

Il ne faut pas se méprendre sur le caractère matérialiste et prétendument

réductionniste qu'incarnerait cette approche neuroscientifique – ainsi dénoncée, souvent, par les sciences de l'éducation traditionnelles ou par la psychanalyse, toutes griffes dehors, qui « occupent la place » en France (et peut-être ailleurs aussi) dans les Instituts Nationaux Supérieurs du Professorat et de l'Éducation (INSPÉ). Au contraire, singularité (liberté, citoyenneté, etc.) et cerveau ne s'opposent pas, ni cerveau et histoire, sociologie, administration, organisation ou politique de l'éducation, ni même encore cerveau et didactique ou enseignement spécialisé. Le cerveau humain est social et culturel ! *C'est celui de l'enfant dans son corps et en contexte, c'est-à-dire dans son environnement*⁶.

Comme l'a très bien écrit Antonio Damasio : « en découvrant les secrets de l'esprit, nous le percevons comme l'ensemble des phénomènes biologiques le plus élaboré de la nature, et non plus comme un mystère insondable. L'esprit survivra à l'explication de sa nature [et l'éducation aussi], tout comme le parfum de la rose continue d'embaumer, même si l'on en connaît la structure moléculaire »⁷. Il faut toujours se rappeler cela en matière d'éducation et ne pas craindre le prétendu réductionnisme des neurosciences : (1) elles n'enlèvent rien mais, au contraire, ajoutent des informations à l'explication des phénomènes, à la compréhension de l'enfant et des apprentissages, (2) l'éducation n'est pas un processus insondable. Rappelons-nous Maria Montessori⁸ à propos de l'enfant : quel étonnement qu'on ait laissé dans la plus profonde obscurité le fonctionnement normal de l'âme de l'enfant ! Sans céder à une vision trop scientiste et naïve, voire idéologiquement dangereuse, d'une technoscience de l'éducation parfaitement contrôlée et contrôlable, on ne peut refuser l'idée qu'une recherche pédagogique nouvelle, exploitant les ressources actuelles de l'imagerie cérébrale et de la psychologie expérimentale, puisse éclairer certains mécanismes neurocognitifs élémentaires d'apprentissage dont dépendent des phénomènes éducatifs, sociaux et culturels plus complexes.

Le cerveau, angle mort de l'Éducation nationale

Avec l'imagerie cérébrale, ce que l'on découvre est la structure et le fonctionnement du cerveau qui apprend. Or ce cerveau, « théâtre de

l'éducation », lieu de toute synthèse individuelle ou collective, est l'angle mort de l'Éducation nationale. On éduque encore trop souvent aujourd'hui « en aveugle » des millions de cerveaux, c'est-à-dire en manipulant les entrées (rythmes scolaires, nombre d'élèves par classe, etc.) et en mesurant les sorties (résultats aux évaluations : contrôles, PISA⁹), sans bien connaître les mécanismes internes du cerveau humain qui apprend.

Toutefois, la neuroéducation ou neuropédagogie suscite déjà des réserves. En 2011, le neuropsychologue Xavier Seron¹⁰ a rédigé un texte critique sur la neuropédagogie à propos de son champ d'expertise : les mathématiques. Il y montre, de façon très documentée, que la complexité des interprétations cognitives et comportementales des activations cérébrales, ainsi que les contradictions entre chercheurs sur ces mêmes interprétations, rendent encore difficiles, voire risquées, les transpositions pédagogiques.

Le psychologue cognitiviste Michel Fayol a émis des réserves comparables, soulignant que l'analyse classique des comportements des élèves et des performances réalisées, en suivi transversal (par groupes d'âge) et (ou) longitudinal (les mêmes enfants à travers les âges) reste actuellement plus efficace que le passage, encore trop hypothétique, par le cerveau. Ces objections sont résumées, avec d'autres, dans une très bonne *Enquête sur la neuropédagogie* réalisée par la journaliste de sciences humaines, Martine Fournier¹¹.

Mais (et c'est son point de vue d'instituteur qu'un de nous prend ici), les professeurs des écoles, doués eux-mêmes d'esprit critique, ne prenant pas la (neuro)science pour « argent comptant », décelant les contradictions par rapport à leurs expériences de terrain (ou leurs lectures croisées), mais avides de formation, ont déjà le désir légitime d'éclairer leurs pratiques, de les améliorer, par les connaissances et théories scientifiques (c'est-à-dire validées, publiées) nouvelles sur le cerveau des élèves. Et cela en relation étroite avec l'analyse classique des comportements et des performances. Nous, psychologues et neuroscientifiques, avons dès lors le devoir de les éclairer en cette matière (en accord avec Ansari et Sigman¹²), tout en reconnaissant (1) la part d'incertitude de ces données nouvelles, (2) la nécessité d'une évaluation scientifique des dispositifs pédagogiques qui en

seraient déduits et, surtout, (3) en les mettant en perspective avec les connaissances et théories classiques que les professeurs ont déjà acquises (parfois, ici, confortées, nuancées ou au contraire invalidées) notamment en psychologie du développement de l'enfant, de l'apprentissage et de l'éducation. Il ne s'agit pas de tout réinventer ou révolutionner, mais de compléter l'édifice historique des sciences de l'éducation, au sens le plus solide du terme, c'est-à-dire aujourd'hui neuroscientifique.

Présentation de l'ouvrage

Comme le disait Maurice Merleau-Ponty au Collège de France au milieu du xx^e siècle, il s'agit « d'enseigner la science en train de se faire » (c'est devenu la devise de cette prestigieuse institution). Adoptons, en ce début de xxi^e siècle, la même démarche pour les sciences cognitives et du cerveau auprès des enseignants.

C'est l'objet de cet ouvrage que nous avons structuré en trois parties. Après un chapitre fondateur sur *l'Homme neuronal* qui apprend, intitulé *Apprendre avec ses neurones*, que Jean-Pierre Changeux nous a fait l'amitié d'écrire à propos des briques élémentaires du cerveau, de son organisation, de l'épigenèse neuronale et de l'évolution culturelle, se succèdent trois chapitres directement ciblés sur le cœur du programme scolaire : lire (Johannes Ziegler), écrire (Michel Fayol), compter et penser-raisonner (Olivier Houdé).

Ensuite, une deuxième partie porte sur les grandes fonctions du cerveau qui sont transversales à tous les apprentissages : l'attention (Jean-Philippe Lachaux), la mémoire (Francis Eustache), les fonctions exécutives (Grégoire Borst), la métacognition et l'auto-évaluation (Joëlle Proust).

Enfin, une dernière partie est consacrée à quelques exemples d'applications pédagogiques, déjà existantes, qui utilisent les apports des neurosciences et sciences cognitives à l'école, du primaire au secondaire : les cogni'-classes (Jean-Luc Berthier), la Main à la Pâte (Éléna Pasquinelli), la communauté pédagogique Lea.fr (Pascaline Citron et Marie Létang), le centre de référence pour l'évaluation de l'enfant en difficulté (Hervé Glasel).

Pour rendre cet ouvrage de référence très dynamique et qu'il reflète au mieux

– sans toutefois être exhaustif – les multiples facettes de la riche thématique du cerveau et des apprentissages, tant du point de vue de la recherche que du monde de l'éducation, nous avons commandé une série de focus d'une double page à des chercheurs, certains les plus renommés au monde dans leur domaine, d'autres juniors et abordant des thématiques très nouvelles, émergentes, mais aussi à une professeure des écoles, un directeur d'INSPÉ et un inspecteur général. Tous ont joué le jeu de la concision et nous les en remercions vivement. Ces focus sont distribués sur l'ensemble de l'ouvrage aux endroits que nous avons jugés les plus opportuns, émaillant les thématiques d'un éclairage original, souvent complémentaire. Nous les citons ici dans l'ordre de leur apparition.

Au début était l'action d'Alain Berthoz, où sont déclinés cinq principes qui président au fonctionnement du cerveau et qui sont essentiels à la pédagogie : le sens du mouvement, la simplicité, la vicariance, l'empathie et la décision. Ensuite, au gré des chapitres et parties, se succèdent :

Le point de vue d'un inspecteur général (Jean-Pierre Bellier), La lecture : au-delà de la querelle des méthodes (Roland Goigoux), Du sens du nombre au raisonnement mathématique (Jérôme Prado), La méditation pour les enfants (Christophe André), Le sommeil et les apprentissages (Philippe Peigneux), Facteurs socioéconomiques et cerveau (Teresa Luculano), Les émotions, les sentiments et l'éducation (Antonio et Hanna Damasio), Le cerveau et les sciences cognitives à l'INSPÉ (Alain Frugière), Le point de vue d'une professeure des écoles sur la communauté pédagogique Lea.fr (Laure Argouet-Stol), Des groupes de formation-action en créativité (Mathieu Cassotti) et, enfin, Mais QI sont vraiment les enfants surdoués ? (Jeanne Siaud-Facchin).

Voilà de quoi alimenter, avec douze chapitres très développés et des focus rapides, sur le cerveau et les apprentissages sous toutes leurs facettes, ou presque, votre curiosité à propos des neurosciences cognitives et de ce qu'elles peuvent apporter pour l'école et les élèves. Il y a aussi des planches du cerveau en début d'ouvrage et un lexique à la fin. Mais cela ne suffit pas ; ce n'est même que le tout début ! Car la pédagogie est un Art qui doit, certes,

s'appuyer sur ces connaissances scientifiques actualisées, mais elle reste un Art. À vous d'inventer la suite...

Olivier Houdé et Grégoire Borst

1. Laboratoire de Psychologie du Développement et de l'Éducation de l'enfant (UMR CNRS 8240), Sorbonne, Paris.
2. Houdé O., Borst G., *Mon cerveau*, coll. « Questions? /Réponses! », Nathan, 2018. Voir aussi, des mêmes auteurs, *Explore ton cerveau*, coll. « Kididoc », Nathan, 2019.
3. Houdé O., *L'école du cerveau. De Montessori, Freinet et Piaget aux sciences cognitives*, Le livre de poche, 2021.
4. Changeux J.-P., *L'homme neuronal*, Fayard, 1983 ; Changeux J.-P. et al., *L'homme neuronal, trente ans après*, Éditions Rue d'Ulm, 2016.
5. Stern E. (2005). Pedagogy meets neuroscience. *Science*, 310, 745 ; Sigman M. et al. (2014). Neuroscience and education: Prime time to build the bridge. *Nature Neuroscience*, 17, 497-502.
6. Berthoz A, *Le sens du mouvement*, Odile Jacob, 1997 ; *La simplicité*, Odile Jacob, 2009.
7. Damasio A. (2000). Le cerveau et l'esprit, In *La science en 2050, Pour la Science*, 267, 76-81.
8. Montessori M., *L'enfant*, Desclée de Brouwer, 2018 (Éd. originale, 1936).
9. *Program for International Student Assessment (PISA)*, enquête d'évaluation d'acquis scolaires menée tous les trois ans auprès de jeunes de 15 ans dans les 34 pays membres de l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) et dans de nombreux pays partenaires.
10. Seron X. (2011). Can teachers count on mathematical neurosciences?. In M. Della Sala and M. Anderson (Eds.), *Neuroscience in Education: The Good, the Bad and the Ugly*, Oxford University Press, p. 84-110.
11. Fournier M., Enquête sur la neuropédagogie. In M. Fournier (Ed.), *Éduquer et former*, Sciences Humaines Édition, 2016, p. 173-177.
12. Ansari D. et al. (2012). Neuroeducation: A critical overview of an emerging field. *Neuroethics*, 5, 105-117 ; *Ibid.*, Sigman et al. (2014).

Apprendre avec ses neurones

par Jean-Pierre Changeux

Nous vivons aujourd'hui à l'ère d'une neuroscience – que j'ai appelée celle de L'Homme neuronal – qui vise à étudier l'organisation du cerveau en tant qu'objet physique¹. Une première approche consiste à le découper en territoires, qu'il s'agisse « d'organes »², d'aires³, de modules⁴ ou d'ensembles fonctionnels, ou encore d'espaces de travail⁵. Reste que le passage du niveau de l'atome aux structures cognitives n'est ni simple, ni direct.

Or, ce qui est essentiel dans l'organisation du cerveau humain et qui pourrait donc expliquer la genèse des structures cognitives, ainsi que le vécu de ce que nous appelons penser, mais aussi percevoir, ou encore éprouver des sentiments et des émotions, c'est l'architecture hiérarchique du réseau cellulaire et moléculaire, et les activités qui l'investissent⁶, notamment les apprentissages. Cette architecture neuronale s'est développée progressivement, durant des millions d'années, au cours de l'évolution des espèces animales jusqu'à l'Homme et se met en place au cours de l'embryogenèse et du développement postnatal chez l'enfant. C'est sur elle, en effet, que reposent les traits propres à l'espèce qui signent l'humanité du cerveau.

I. Les briques élémentaires du cerveau

1 Neurones et cellules gliales

Depuis Santiago Ramon y Cajal, lauréat du Prix Nobel de Physiologie en 1906 et auteur de *L'Histologie du système nerveux de l'Homme et des vertébrés* (1909), nous savons que le cerveau se compose de cellules d'une organisation unique dans l'organisme, le neurone, qui présente à la fois unité et indépendance jusque dans l'ensemble de ses multiples appendices : axone, dendrites et leurs nombreuses ramifications. Les neurones diffèrent des autres types de cellules de l'organisme par leur capacité à former des réseaux discontinus au niveau de points d'articulation bien définis : les synapses. Ces structures synaptiques permettent d'établir des connexions fixes et stables avec un grand nombre d'autres cellules.

Dans le cerveau humain, on rencontre environ 80 milliards de neurones (entre 86 et 100 milliards selon les estimations) et 1 million de milliards de synapses ou connexions. Sur la base de leur aspect morphologique, on distingue également chez les vertébrés supérieurs plus d'un millier de types de cellules nerveuses. On peut même aller jusqu'à dire que chaque neurone présente une connectivité et des propriétés physiologiques particulières qui définissent son individualité. Il existe donc une grande variabilité parmi les cellules nerveuses de notre cerveau aussi bien qu'entre les cerveaux d'individus différents. En outre, le réseau neuronal du cerveau est inséré dans un tissu compact formé de cellules de soutien ou cellules gliales indispensables à son bon fonctionnement et à sa protection – c'est *L'Homme glial*⁷.

Figure 1. L'embryogenèse du cerveau humain.

De 25 jours (après la fécondation) à la naissance.

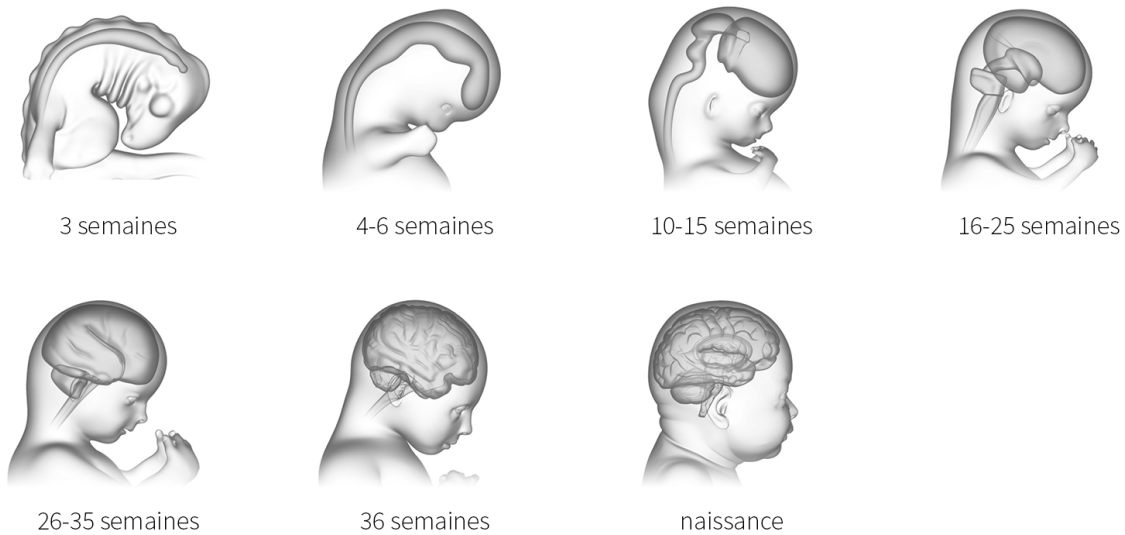
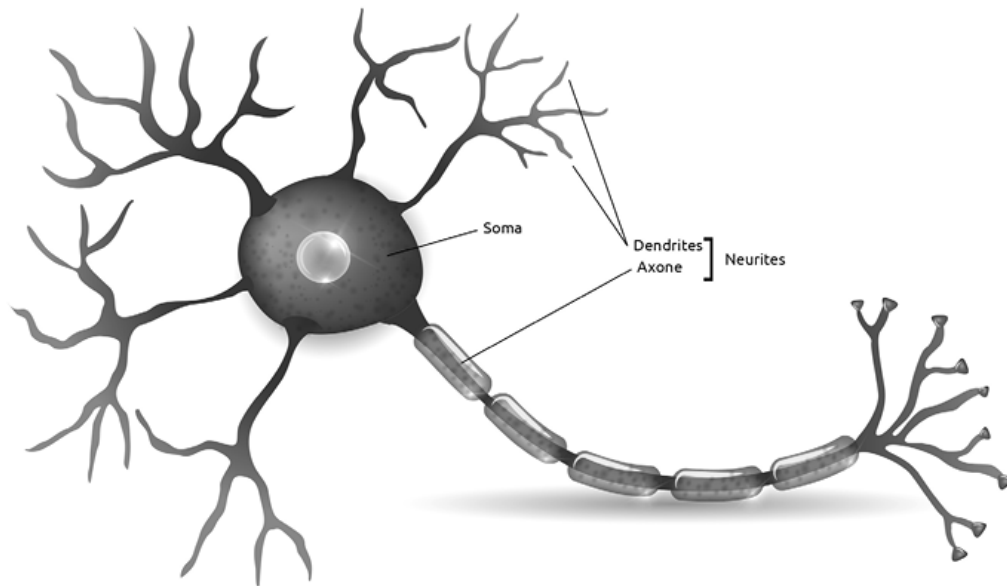


Figure 2. Schéma en gros plan du neurone.

On distingue le neurone, son corps cellulaire (soma) et ses multiples appendices : axone, dendrites et leurs nombreuses ramifications.



Face à une organisation anatomique aussi complexe, il ne faut pas oublier un trait essentiel du cerveau : son activité physiologique. Neurones et fibres nerveuses possèdent la propriété exceptionnelle

de produire des signaux électriques et chimiques et de réagir à ces signaux. Les physiologistes se sont d'abord intéressés aux signaux électriques. On sait que le cerveau produit une activité globale couramment enregistrée sous forme d'électroencéphalogramme (EEG). Celle-ci résulte en fait de la somme de signaux microscopiques qui ont lieu au niveau du neurone et de ses synapses. L'impulsion de base – ou influx nerveux – est une onde électrique qui dure environ 1 millième de seconde et qui se propage à des vitesses de 0.1 à 100 mètres par seconde (soit, la vitesse d'un TGV). Ces courants électriques résultent du passage transitoire d'ions répartis de manière inégale de part et d'autre de la membrane cellulaire. Des protéines-canaux interviennent, qui s'ouvrent ou se ferment et créent de ce fait des courants excitateurs ou inhibiteurs à l'origine du départ ou du blocage du signal nerveux.

« Dans le cerveau humain, on rencontre environ 80 milliards de neurones (entre 86 et 100 milliards selon les estimations) et 1 million de milliards de synapses ou connexions. »

Les performances des systèmes d'information dépendent toujours de celles de leurs maillons les plus faibles, c'est-à-dire les plus lents. La « pensée », en dépit de la vivacité qu'on lui attribue, n'échappe pas à cette règle : le traitement de l'information, depuis le niveau des neurones et des réseaux élémentaires de neurones jusqu'au niveau cognitif, se développe dans des échelles de temps qui vont de la milliseconde à quelques centaines de millisecondes et que l'on appelle les « temps psychologiques », bien loin de la vitesse de la lumière ! Cela vous paraît très court, mais pour un physicien ces temps sont longs. Notre cerveau n'utilise donc pas de façon optimale l'ensemble des forces disponibles dans le monde physique ; il se débrouille avec des composants hérités d'organismes biologiques aussi primitifs que les bactéries – les protéines-canaux –

qui ont perduré au travers de l'évolution biologique et qui lui imposent une lenteur irrémédiable.

Les millisecondes ou centaines de millisecondes sont toutefois à l'échelle de ce qu'un professeur peut observer de l'élève en classe des temps extrêmement rapides. Ce sont ceux que mesure le psychologue au laboratoire dans des dispositifs informatisés de chronométrie mentale.

2 Signaux chimiques et récepteurs

Les signaux électriques peuvent passer d'une cellule nerveuse à l'autre au niveau de structures spécialisées appelées parfois « synapses électriques », dont les membranes sont juxtaposées de manière suffisamment étroite pour qu'elles transmettent les signaux de manière rapide, pouvant par exemple contribuer à la synchronisation à grande échelle des activités neuronales.

Toutefois, dans beaucoup de synapses, la chimie prend le relais de l'électricité. Des substances chimiques simples, les *neurotransmetteurs*, sont employées comme signaux capables de franchir la fente synaptique. **Le cerveau fonctionne donc à la fois comme une machine électrique et comme une machine chimique.**

Les découvertes récentes ont révélé l'importante diversité des molécules impliquées dans la communication chimique entre neurones. On peut ainsi dénombrer plusieurs dizaines de neurotransmetteurs classiques. Le nombre des peptides jouant un rôle de messagers chimiques est encore plus élevé. Une même cellule nerveuse peut même synthétiser et libérer plusieurs neurotransmetteurs.

« Le cerveau se comporte naturellement comme un système autonome qui projette en permanence de l'information en direction du monde extérieur – c'est le cas du cerveau de l'élève – au lieu d'en recevoir

passivement son empreinte. »

Le neurotransmetteur est synthétisé et stocké dans les terminaisons nerveuses. Libéré dans l'espace synaptique, il atteint la cellule suivante en une fraction de milliseconde. Là, il déclenche un processus de conversion du signal chimique en un nouveau signal électrique (ou chimique), dans un intervalle de temps qui varie entre quelques millisecondes et quelques secondes. Parfois, le neurotransmetteur déborde de la synapse : il diffuse à des distances plus grandes et atteint de vastes populations de neurones. Ce processus peut concourir à des régulations de grande ampleur telles que celles qui se produisent à l'échelle du cerveau dans les phénomènes d'éveil ou de sommeil, dans l'effort mental ou les émotions.

C'est tout cela la chimie du cerveau ! Chaque jour, en classe, cette chimie opère, au cours des apprentissages, dans le cerveau de chaque élève.

Les neurotransmetteurs et les récepteurs moléculaires du cerveau

Au niveau de leurs cellules cibles, les neurotransmetteurs sont reconnus par des molécules spécialisées appelées, dès 1905, par John Newport Langley « substances réceptives » ou *récepteurs*. Toutefois, ces derniers sont restés mystérieux pendant plus d'un demi-siècle, jusqu'à ce que le premier de ceux-ci soit isolé : le récepteur de l'acétylcholine. Ces récepteurs sont des protéines de la membrane cellulaire, qui fonctionnent comme des commutateurs moléculaires. 5 % de nos gènes codent pour des récepteurs. Ces molécules ont la capacité de reconnaître sélectivement les neurotransmetteurs, les neuropeptides, des substances odorantes ou toutes substances telles que des médicaments et drogues qui viennent se loger dans des sites de fixation spécialisés. L'image devenue courante est celle de la serrure qui « reconnaît » la bonne clé et pas une autre. De plus, ces récepteurs convertissent la liaison du neurotransmetteur en activité biologique : ouverture d'un canal ionique ou activation d'une réaction enzymatique. Ces « serrures moléculaires » peuvent basculer d'un état moléculaire à l'autre, « actif » ou « inactif », de façon réversible, sur le mode du « tout ou rien ». En fonction de la nature de la « clé », la réponse de certains récepteurs est excitatrice (elle favorise l'émission d'un signal électrique ou chimique) ou au contraire inhibitrice (elle bloque alors l'excitation).

3 L'activité spontanée du cerveau et la plasticité neuronale

Curieusement, la neuroscience a été imprégnée pendant des dizaines d'années par une philosophie empiriste tacite (*du monde extérieur vers son impression dans le cerveau* ; pour la situation d'une classe, on dirait « de la leçon du professeur vers le cerveau passif de l'élève »). Cette conception empiriste était déjà présente dans les premières recherches sur l'arc réflexe qui ont conduit à l'identification des trajets nerveux qui relient un stimulus sensoriel à

la réponse motrice de l'organisme.

« La plasticité, cette propriété fondamentale va à l'encontre de l'impression naïve selon laquelle le cerveau serait une sorte d'automate rigide, constitué exclusivement de « roues et engrenages », fixés d'avance ; un automate que déclencherait le professeur en classe. »

Ce modèle semble aujourd'hui bien insuffisant et certainement trop simple. En réalité, le cerveau se comporte naturellement comme un *système autonome qui projette en permanence de l'information en direction du monde extérieur* – c'est le cas du cerveau de l'élève – au lieu d'en recevoir passivement son empreinte⁸. L'activité intrinsèque spontanée du cerveau est l'une de ses composantes majeures⁹. Elle se manifeste par des potentiels d'action produits spontanément par les cellules nerveuses. On connaît les mécanismes moléculaires impliqués dans leur genèse. Ces potentiels d'action spontanés sont produits par des dispositifs spéciaux qu'on appelle des *oscillateurs moléculaires* et qui se composent au minimum de deux protéines-canaux antagonistes, mais étroitement couplées. Ces *oscillateurs* sont responsables de fluctuations lentes du potentiel électrique de la membrane neuronale qui, au-delà d'un certain seuil, déclenchent des décharges spontanées. Les neurones se comportent ainsi comme des générateurs spontanés d'influx, et, une fois de plus, on peut rendre compte intégralement de cette activité intrinsèque par des mécanismes physico-chimiques relativement simples au niveau moléculaire.

L'activité électrique spontanée apparaît tôt au cours du développement embryonnaire du système nerveux. Elle est responsable de mouvements de l'embryon qui s'observent dans l'œuf après trois jours et demi d'incubation, par exemple chez le

poulet, et elle persiste dans les neurones embryonnaires en culture. Chez le fœtus humain, le cœur commence à battre trois à quatre semaines après la fécondation. Aux environs de la dixième semaine, le fœtus commence à bouger, mais la mère ne perçoit ses mouvements que sept semaines plus tard. L'activité électrique du cerveau peut être enregistrée chez le fœtus avant deux mois¹⁰. Classiquement, on l'enregistre chez l'adulte sous la forme d'ondes Électro-encéphalographiques (EEG) complexes, différentes à l'état de veille et pendant le sommeil¹¹. Comme nous allons le voir, une telle activité spontanée joue un rôle central dans plusieurs mécanismes cognitifs essentiels comme l'acquisition des connaissances ainsi que la mise à l'épreuve de leur vérité, cela chez l'adulte comme au cours du développement de l'enfant.

La plasticité du cerveau

Cette plasticité intervient dès les stades précoces du développement embryonnaire. Par exemple, de nombreuses cellules nerveuses issues des divisions cellulaires embryonnaires meurent avant de devenir des neurones adultes, et cette mort cellulaire peut être retardée ou même accélérée par l'activité nerveuse. Cette sélection est active, dynamique, donc plastique. De même, les synapses croissent et se divisent pendant le développement. Mais elles peuvent aussi être éliminées et même, par la suite, se régénérer par bourgeonnement ; ces phénomènes persistent d'ailleurs mais avec une moindre ampleur chez l'adulte. Parmi les mécanismes contribuant à cette stabilisation par l'activité, des signaux chimiques stimulant la croissance nerveuse peuvent par exemple être libérés sous l'influence de l'activité nerveuse. De plus, l'efficacité des contacts synaptiques à transmettre des signaux peut varier tant au niveau de la libération des neurotransmetteurs qu'à celui des récepteurs. Par exemple, lorsqu'un neurotransmetteur est brièvement mis en contact avec son récepteur, il déclenche d'abord l'évolution vers un état moléculaire actif, celui qui intervient dans la transmission du signal. Si ce contact se prolonge, le récepteur bascule spontanément vers une forme inactive, « désensibilisée ». Le contraire peut également se produire. Cette capacité d'adaptation est déterminée par une propriété physico-chimique intrinsèque de la molécule du récepteur. L'assemblage supra-macromoléculaire de récepteurs que nous avons évoqué ainsi que leur relation avec le cytosquelette (squelette de la cellule) peuvent également connaître des variations en fonction de l'état d'activité de la cellule.

Une autre caractéristique fondamentale du cerveau est sa *plasticité*¹². Ce terme désigne la capacité générale du neurone et de ses synapses à changer de propriétés en fonction de leur état d'activité. Cette propriété fondamentale va à l'encontre de l'impression naïve selon laquelle le cerveau serait une sorte

d'automate rigide, constitué exclusivement de « roues et engrenages », fixés d'avance ; un automate que déclencherait le professeur en classe.

La plasticité normale résulte donc du fait que les divers mécanismes de transmission de l'information dans le système nerveux sont eux-mêmes réglés par l'activité spontanée et/ou évoquée (en réaction à une stimulation extérieure), dont ils sont les médiateurs. C'est cette propriété qui confère aux réseaux de neurones à la fois leur flexibilité fonctionnelle, leur propriété de stockage des informations et leur capacité d'auto-organisation. Toute tentative pour modéliser les fonctions du cerveau doit prendre en compte ces processus élémentaires de plasticité.

II. Comment se construit un cerveau

En premier lieu, le neurone se caractérise par la propriété de conserver une forme stable avec une topologie définie du soma (corps cellulaire), des dendrites, de l'axone et des synapses. Cette forme est due essentiellement à un ensemble de tubules (structures en forme de petits tubes) et de filaments relativement rigide appelé « cytosquelette ». Les microtubules sont eux-mêmes issus de l'assemblage supra-macromoléculaire d'une protéine, la tubuline, et d'un ensemble de protéines associées. Ces tubules rigides servent également de voie de circulation à des « moteurs moléculaires » qui assurent des déplacements rapides entre le corps du neurone et les extrémités de ses prolongements.

Si l'on explore la surface de la cellule nerveuse, on y observe la distribution des récepteurs des neurotransmetteurs. Ainsi, des récepteurs spécifiques sont regroupés sous les sites où sont libérés les neurotransmetteurs correspondants. La structure de ces assemblages peut varier considérablement selon les dendrites, le soma ou l'axone, et selon la répartition des canaux ioniques et des

sites de libération. Le cytosquelette joue un rôle essentiel dans le positionnement et le maintien de ces molécules membranaires en des points spécifiques de la surface neuronale. Les assemblages supra-macromoléculaires ont ainsi une fonction importante dans l'acquisition et le maintien de l'« organisation chimique » de la cellule nerveuse, et par là de sa capacité à établir et maintenir la structure des réseaux de neurones définis. Des composants chimiques élémentaires aux assemblées supra-macromoléculaires, la cellule nerveuse se construit ! De proche en proche et d'un niveau à l'autre, la matière s'organise, du niveau moléculaire au niveau cellulaire, puis à celui des ensembles neuronaux qui contribuent aux niveaux cognitifs supérieurs.

1 Des règles d'organisation verticale et horizontale

Pour tenter de « construire » une fonction cognitive ou psychologique et, en fin de compte, un comportement, à partir des constituants élémentaires du cerveau qui viennent d'être décrits, il nous faut comprendre les règles d'organisation qui déterminent l'architecture générale des réseaux de neurones caractéristiques du cerveau humain. Le cerveau de l'élève par exemple.

La propriété la plus remarquable qui distingue le neurone d'une cellule du foie ou de la peau, c'est sa capacité à établir un grand nombre de contacts stables et bien définis avec de multiples autres neurones. Or les relations que les cellules nerveuses établissent entre elles ne sont ni simplement aléatoires, ni déterminées comme les circuits imprimés d'un ordinateur. Deux catégories principales d'organisation, *verticale et horizontale*, se trouvent imbriquées l'une dans l'autre. Des structures organisées hiérarchiquement se développent progressivement en réseaux emboîtés *verticalement*. Parallèlement, cartes et voies se multiplient de manière *horizontale* conjointement avec des systèmes d'interconnexion plus globaux, de grande échelle.

La notion d'organisation hiérarchique remonte à Aristote, mais sa formulation moderne appliquée aux « facultés de l'esprit » est due à Kant. Le grand philosophe allemand distinguait premièrement la *sensibilité*, définie par la capacité des organes des sens à recevoir des « impressions sensibles » du monde extérieur ; deuxièmement, *l'entendement*, faculté du concept qui permet la synthèse des éléments sensibles ; troisièmement, *la raison*, qui contient les principes grâce auxquels nous connaissons les choses et gouvernons les concepts produits spontanément par l'entendement.

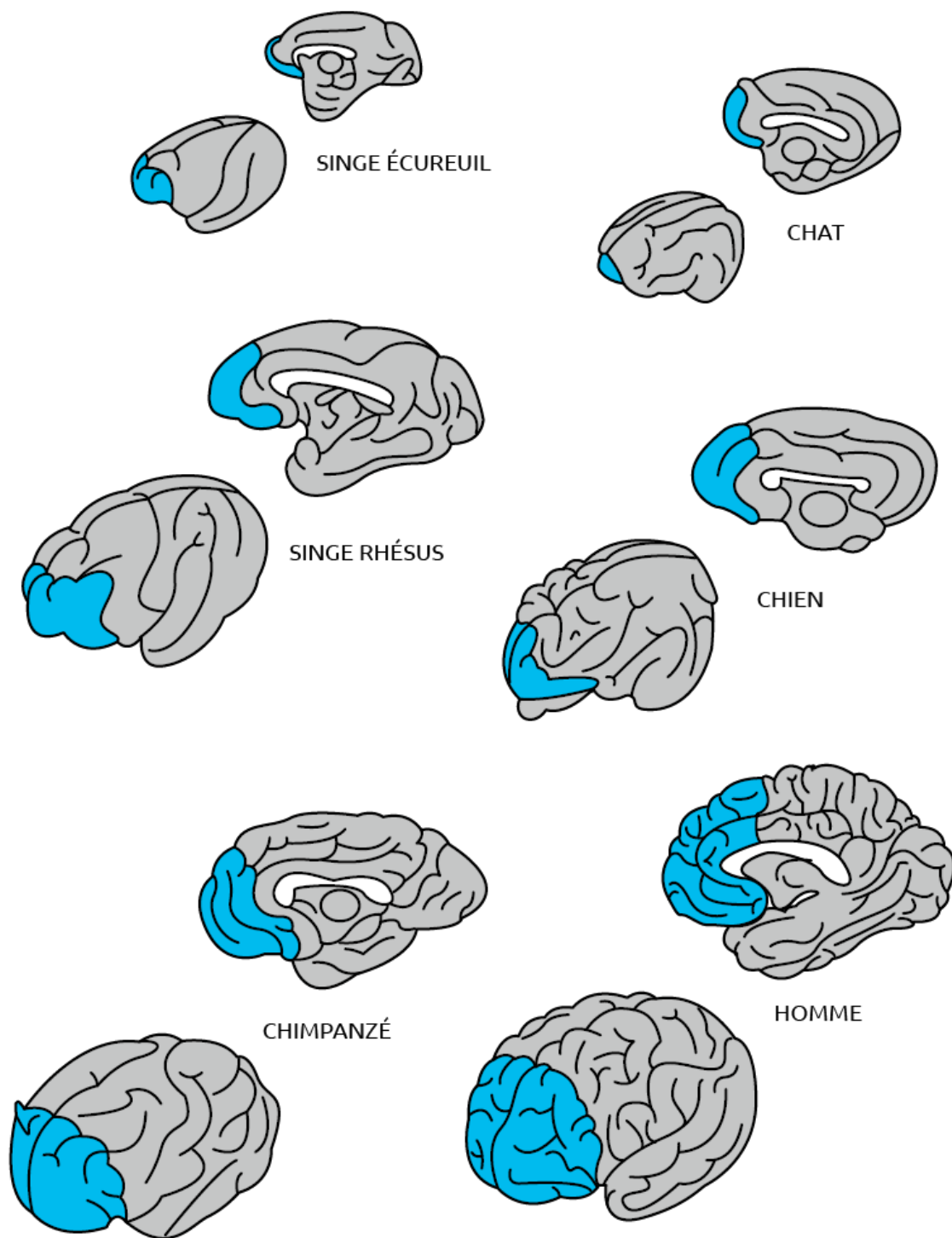
Ces niveaux fonctionnels ne correspondent pas à ceux qu'on invoque de façon courante pour décrire les machines qui traitent de l'information : on distingue en effet l'équipement matériel (*hardware*), le logiciel (*software*) et les algorithmes qui définissent la relation entre les entrées et les sorties (ou l'activité continue), ainsi que la théorie computationnelle (*le plan ou l'intention de l'organisme*). Ils ne coïncident pas non plus avec l'échelle des dimensions qui va de la molécule aux réseaux neuronaux complexes. En effet, les niveaux d'organisation qu'il nous faut aborder pour comprendre ce qu'est un cerveau sont à la fois anatomiques et fonctionnels : ils doivent permettre d'établir un lien causal entre anatomie et fonction. L'organisation fonctionnelle du système visuel représente à cet égard un excellent exemple : elle s'appuie sur quatorze niveaux superposés, de la rétine au cortex préfrontal ; six au moins sont situés parmi les trente-deux aires visuelles du cortex cérébral (dans le cas du singe) et contribuent au traitement à la fois de la forme, de la couleur et du mouvement des objets à trois dimensions, depuis leur capture dans le monde extérieur jusqu'à la perception et la manipulation consciente¹³. Plus remarquable encore est le fait que le système peut fonctionner de bas en haut (*bottom up*), par exemple lors de la perception d'un objet visuel, mais aussi de haut en bas (*top down*), comme lors du rappel en mémoire de l'image de cet objet.

En plus de cette stratification verticale en niveaux hiérarchiques imbriqués, des organisations parallèles se développent

horizontalement. Nous devons à Franz Josef Gall, au ^{xix}^e siècle, l'idée que le cortex cérébral n'est pas un manteau uniforme, mais une mosaïque de territoires qu'il appelait « organes » et qui seraient chacun le siège de facultés innées, essentielles et irréductibles.

Figure 3. Expansion du cortex cérébral chez l'Homme.

On observe l'expansion du cortex préfrontal (en bleu) chez l'Homme comparé à d'autres espèces animales.¹⁴



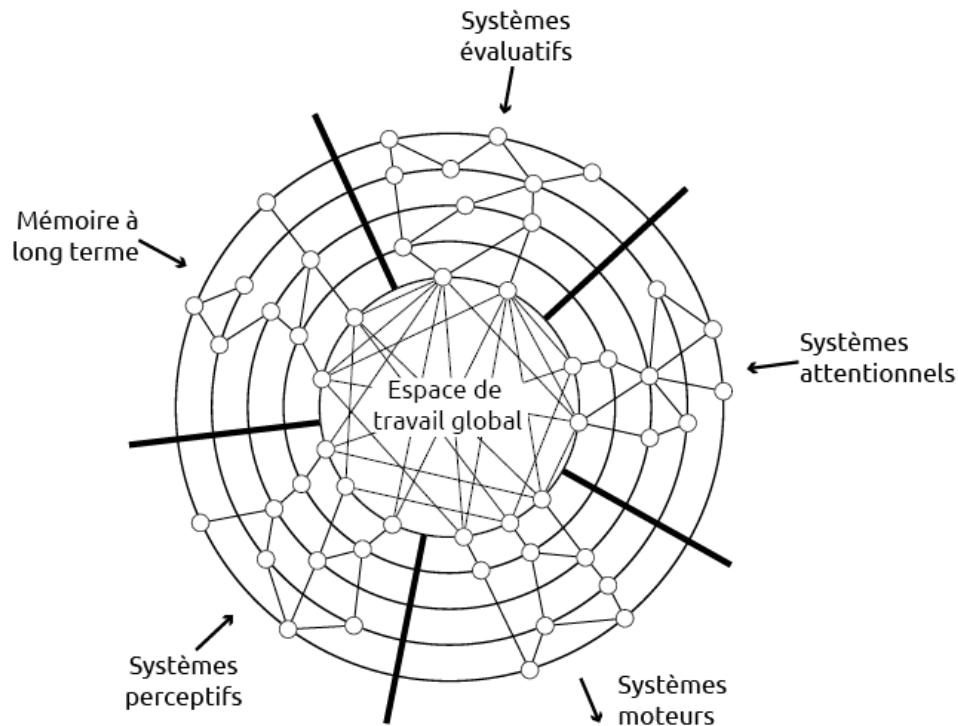
Même si cette conception paraît aujourd'hui simpliste, un examen

attentif de l'anatomie du cortex cérébral des vertébrés révèle qu'il existe bel et bien une distribution des aires corticales propre à chaque espèce et possédant des fonctions très spécialisées. Comme le nombre de niveaux hiérarchiques augmente au cours de l'évolution des vertébrés, le nombre de cartes parallèles à chaque niveau s'accroît lui aussi, et de ce fait le nombre total de représentations neurales. Dans le cas de la vision, par exemple, le nombre de représentations de la rétine ne dépasse pas 3 ou 4 chez les mammifères primitifs ; il est situé entre 15 et 20 chez les primates et les carnivores ; il atteint 32 chez le macaque et pourrait être plus élevé encore chez l'Homme. L'évolution du lobe frontal suit la même tendance chez les ancêtres de l'Homme¹⁵. Il joue un rôle essentiel dans les fonctions cognitives supérieures telles le raisonnement et l'abstraction logique¹⁶.

Il existe des composants architecturaux qui interviennent dans des processus intégrateurs à grande échelle et permettent de regrouper des traitements locaux à l'échelle du cerveau tout entier. L'hypothèse proposée avec Stanislas Dehaene est que des connexions horizontales entre aires corticales distinctes du même hémisphère ou d'hémisphères différents interviennent dans l'accès conscient au sein d'un *espace neuronal de travail global*¹⁷. La diffusion de signaux chimiques à longue distance peut également jouer un rôle central.

Figure 4. Le modèle de l'espace de travail neuronal global.

De nombreux processeurs spécialisés y convergent ; les systèmes attentionnels contribuent à la focalisation du cerveau sur un « objet de conscience ».¹⁷



Au total, des règles simples d'architecture du réseau permettent de créer *à la fois* une grande diversité de structures de traitement des signaux et la capacité d'intégrer et de globaliser les activités locales du cerveau de haut en bas (*top down*) et de bas en haut (*bottom up*). Ces composantes intégratrices de l'architecture neuronale du cerveau doivent donc être prises en considération si l'on veut comprendre comment se construisent les fonctions supérieures de notre cerveau.

Au-delà de la conception localisationniste de Gall

La conception localisationniste et innéiste de Gall a été remise au goût du jour par la psychologie cognitive – Jerry Fodor, par exemple, parle de « modules » – et par l'imagerie cérébrale. Toutefois, contrairement à ce que pensait Gall, les différentes aires cérébrales n'ont pas une autonomie fonctionnelle stricte. De même, les niveaux hiérarchiques de Kant (sensibilité, entendement, raison) ne correspondent pas à des entités entièrement indépendantes d'un point de vue anatomique ou fonctionnel. Au contraire, comme l'affirmait déjà Auguste Comte dans son *Cours de philosophie positive*, des mécanismes intégrateurs doivent relier ces différents « territoires » pour que soient assurées les « fonctions sociales supérieures » du cerveau. Certains dispositifs spécialisés de l'architecture neuronale pourraient rendre compte de cette intégration fonctionnelle. Parmi les interactions entre cellules nerveuses, outre les connexions latérales avec les proches voisines, on a observé dès les années 1930 des *connexions réciproques* de plus longue distance ; certains auteurs ont mentionné à ce propos des circuits réverbérants et plus récemment des boucles de rétroaction ou des connexions réentrantes. Ces connexions jouent verticalement *entre* niveaux superposés, mais aussi horizontalement, *entre* les cartes.

2 Un système nerveux « ouvert » et « motivé »

On dit rarement des systèmes neuronaux artificiels ou d'un quelconque ordinateur aussi puissant soit-il – y compris aujourd'hui en Intelligence Artificielle – qu'ils sont « ouverts » et « motivés ». Le mot « ouvert » doit être entendu ici dans une double acception, à la fois psychologique et thermodynamique. Tout d'abord, le cerveau ne peut plus être conçu aujourd'hui comme une boîte noire dont on néglige les états internes. Ensuite, il est le siège d'une importante activité spontanée et se trouve continuellement en train d'échanger

de l'énergie et de l'information avec le monde extérieur. L'échange réciproque de signaux avec l'environnement par les organes des sens et *via* des actions motrices peut contribuer à la mise en place d'états physiques internes stables qui relèvent de ce que Prigogine, Prix Nobel de chimie en 1977, définit comme des « structures dissipatives » (celles d'un système qui évolue dans un environnement avec lequel il échange de l'énergie ou de la matière¹⁸), structures ouvertes sur le monde extérieur. L'ouverture constante du cerveau à son environnement pourrait même lui permettre d'accéder à ces états globaux exigés par la perception consciente, établissant de ce fait un lien naturel avec la « phénoménologie de la conscience »¹⁹.

Outre « l'ouverture » du système nerveux, le cerveau se caractérise par ce que j'ai appelé sa « motivation ». Il opère comme un producteur de représentations qu'il projette sur le monde extérieur. L'activité spontanée d'ensembles spécialisés de neurones pousse l'organisme à continuellement explorer et tester l'environnement physique, social et culturel, à se saisir des réponses et à les confronter à ce qu'il possède en mémoire. En conséquence, le cerveau développe d'étonnantes capacités d'« auto-activation » et, par-là, d'auto-organisation, d'où le terme de « motivation » – on pourrait même dire de curiosité. Système ouvert et motivé, le cerveau fonctionne en permanence sur le mode de l'exploration organisée.

« L'activité spontanée d'ensembles spécialisés de neurones pousse l'organisme à continuellement explorer et tester l'environnement physique, social et culturel, à se saisir des réponses et à les confronter à ce qu'il possède en mémoire. »

Ces propriétés d'ouverture et de motivation relèvent sans ambiguïté de l'organisation matérielle et du fonctionnement spontané du

réseau neuronal. Or celui-ci n'est pas apparu un beau jour sur notre planète mais s'est construit progressivement au cours d'une longue évolution. Parmi les philosophes de la Grèce antique, Empédocle d'Agrigente avait imaginé une « genèse » des espèces vivantes qui préfigurait de façon étonnante, bien que sous une forme encore métaphorique, nos conceptions actuelles de l'évolution biologique. Pour Empédocle, les « éléments » qui, selon lui, composaient le monde se mêlaient et s'échangeaient au hasard des forces attractives et répulsives. Des monstres se forment par assemblage de membres « au hasard des rencontres ». Certains résistaient, les autres disparaissaient. Ainsi « se produisit la race des Hommes ». En termes contemporains, on parlerait d'une genèse par variation et sélection. Diderot reprit l'idée.

Il a fallu cependant près de deux millénaires pour que cette théorie de l'évolution par sélection puisse être formulée en termes biologiquement acceptables par Charles Darwin. L'un des fondements de la théorie darwinienne de l'évolution est le concept de variations qui apparaissent de façon spontanée et aléatoire – aveugle – au niveau des individus composant une population et se transmettent d'emblée par la descendance. L'autre fondement est celui de la sélection naturelle. Ne peuvent se multiplier et pérenniser l'espèce que les individus dont la composition héréditaire est telle qu'ils parviennent à survivre et à se reproduire dans un environnement particulier.

Ces notions de variation et de sélection peuvent aussi s'appliquer, à l'intérieur même du cerveau humain, aux populations de neurones dans une forme de darwinisme que j'ai appelé neuronal ou neural-mental²⁰.

III. Épigenèse neuronale et évolution culturelle

Notre équipement génétique, avec ses 20 000 gènes, confère à notre cerveau les traits universels qui font de nous des êtres humains (en 2002 ont été publiées les premières données sur la séquence complète du génome humain). Les grandes lignes de l'architecture du cerveau se trouvent encadrées par une « enveloppe génétique » qui inclut les gènes de développement. L'analyse comparée des génomes d'hominidés révèle qu'un très petit nombre de déterminants génétiques, vraisemblablement localisés dans des séquences régulatrices ou des facteurs de transcription, ont conduit au développement du cerveau d'*Homo sapiens* au cours des derniers millions d'années. Une non-linéarité remarquable s'est produite dans la morphogenèse et le développement de la complexité connexionnelle du phénotype cérébral sur un fond génétique dont l'évolution reste modeste. Elle a conduit pour une part au développement fulgurant de l'espace de travail conscient. Ce développement a rendu possible l'accès à un nouvel « univers » intérieur de représentations mentales, à leur enchainement, à leur combinatoire sans limite et surtout à l'examen critique de leur pertinence à représenter le monde avec vérité. L'espèce humaine se caractérise en outre par la capacité à apprendre et à conserver des traces stables de l'expérience passée – à l'école en particulier. Au cours de l'évolution, cette aptitude a connu un développement considérable, unique dans le monde vivant. Du reste, certaines traces de ce passé évolutif sont encore perceptibles aux premiers stades du développement du cerveau.

1 L'hypothèse épigénétique : variabilité, essais-erreurs et sélection

Mon hypothèse est la suivante²¹ : la formation d'un million de milliards de synapses que comprend le cerveau adulte échappe dans une certaine mesure au contrôle absolu des gènes. Elle peut être considérée comme un processus évolutif *épigénétique* avec variation

aléatoire et sélection qui se produit pendant le développement embryonnaire et se poursuit après la naissance chez l'enfant. Le mot « épigénétique » est composé de deux racines grecques : *epi*, qui signifie « sur, au-dessus de », et *genesis*, qui veut dire « naissance ». « Epigénétique », au sens où je l'emploie, combine deux significations : l'idée de superposition à l'action des gènes, suite notamment à l'apprentissage et à l'expérience, et celle de développement coordonné et organisé. De fait, je le répète parce que c'est un point important, le réseau cérébral ne s'assemble pas comme on construit un ordinateur avec des pièces détachées suivant un plan prédéterminé qui définirait exactement la nature et la disposition de chaque circuit et de chaque commutateur. Si tel était le cas, une erreur de détail même minime dans la réalisation de ce programme pourrait avoir des conséquences catastrophiques.

À la différence de ce schéma du « tout génétique » – le cerveau comme réalisation d'un patrimoine génétique strictement prédéterminé –, le modèle épigénétique postule que les connexions entre neurones se mettent en place progressivement avec une importante marge de variabilité et sont sujettes à une sélection par le jeu d'essais et d'erreurs. D'où le grand rôle de l'éducation et de l'expérience, en famille, puis à l'école. À certains moments critiques du développement, une « mise au point » de la connectivité du réseau aurait lieu qui exploiterait les propriétés élémentaires de plasticité décrites plus haut. Qu'elle soit spontanée ou évoquée (en réaction à une stimulation extérieure), l'activité nerveuse qui investit le réseau au cours du développement réglerait ce processus.

Les variations de taille, de forme et de poids du cerveau humain représentent un fait bien établi, même si la signification fonctionnelle et comportementale de cette diversité n'est pas évidente²². Des études anatomiques et fonctionnelles minutieuses menées sur les aires de Brodman (du nom du neurologue et physiologiste qui a délimité toutes les aires du cortex sur une base cytoarchitectonique ou de composition cellulaire) montrent que,

d'un individu à l'autre, la topologie du cortex cérébral n'est pas strictement identique. Par exemple, les dimensions de l'aire visuelle primaire mesurées par imagerie fonctionnelle révèlent des variations de l'ordre de 5 mm²³. On attribue souvent cette variabilité individuelle à l'hérédité.

« Le réseau cérébral ne s'assemble pas comme on construit un ordinateur avec des pièces détachées suivant un plan prédéterminé qui définirait exactement la nature et la disposition de chaque circuit et de chaque commutateur. »

Pour s'en assurer, des études ont été réalisées sur des individus génétiquement identiques : des jumeaux monozygotes, ou « vrais jumeaux » (issus du même œuf fécondé, appelé « zygote »). Or ces études, qu'elles soient anatomiques ou comportementales²⁴, mettent clairement en évidence le fait que les cerveaux de deux vrais jumeaux ne sont pas identiques. On a découvert d'abord qu'il existe des différences de préférence manuelle (droitiers ou gauchers) entre jumeaux monozygotes, ce qui constitue déjà un signe de variance comportementale. Par ailleurs, deux méthodes d'investigation qui donnent des résultats convergents ont été employées pour mettre en évidence cette variance de manière plus précise : d'une part, les mesures *in vivo*, par résonance magnétique, de la surface de l'aire du langage nommée *planum temporale* et, d'autre part, des tâches manuelles spécifiques chez des jumeaux monozygotes droitiers et gauchers. On constate que les droitiers présentent une asymétrie hémisphérique avec dominance à gauche qui n'existe pas chez les gauchers. D'une manière plus générale, une variabilité « épigénétique » s'observe d'un vrai jumeau à l'autre, même si celle-ci est parfois moindre que d'une paire de jumeaux à l'autre.

À l'échelle des neurones et des synapses, chez le petit crustacé *Daphnia magna*, la puce d'eau que tous les aquariophiles connaissent, le nombre de cellules sensorielles de l'œil (175) et de neurones compris dans le ganglion optique (110) sont conservés, ainsi que les principales catégories de contacts synaptiques, d'un animal isogénique (même patrimoine génétique) à l'autre. Cependant, le nombre exact de synapses et la forme précise des branches axonales varient entre de vrais jumeaux. Une composante aléatoire s'introduit donc dans le détail des connexions au cours du développement du réseau adulte.

« Les variations de taille, de forme et de poids du cerveau humain représentent un fait bien établi, même si la signification fonctionnelle et comportementale de cette diversité n'est pas évidente. »

Il existe ainsi une variabilité significative de l'anatomie du cerveau, de la topologie des aires corticales et du détail des connexions qui échappe au pouvoir des gènes. C'est très important à dire ici, scientifiquement, dans un ouvrage qui porte sur le cerveau, les apprentissages et l'éducation.

2 Le développement

De la formation du tube neural (système nerveux primitif) aux premiers stades du développement embryonnaire jusqu'à la maturation du cerveau adulte, de nombreuses transformations morphologiques et fonctionnelles se produisent, principalement sous le contrôle de gènes de développement. Initialement, la paroi du tube neural est constituée d'une seule couche de cellules. Rapidement, les cellules se divisent et, en quelques mois, elles produisent plusieurs dizaines de milliards de cellules. À certains moments, il se forme jusqu'à 250 000 cellules nouvelles par minute.

Cette séquence très organisée du développement des couches corticales et des synapses qui s'y forment pourrait coïncider avec la mise en place des niveaux hiérarchiques (aspect vertical) et des organisations parallèles (aspect horizontal) du réseau cérébral.

Plusieurs études quantitatives menées au microscope électronique montrent que chez l'Homme, près de 50 % des synapses de l'adulte se forment *après* la naissance, et leur nombre continue d'évoluer en plus, ou en moins, jusqu'à la mort. Si la durée de la gestation est à peu près comparable chez le chimpanzé et chez l'Homme (respectivement 224 et 270 jours), celle du développement postnatal du cerveau est considérablement plus longue chez l'Homme. La capacité crânienne augmente 4,3 fois après la naissance, contre 1,6 fois chez le chimpanzé. Ce trait caractéristique du développement cérébral de l'Homme est d'une grande importance dans la mesure où l'apprentissage du langage ainsi que l'imprégnation par les conventions sociales et les règles morales ont lieu pendant les premières années qui suivent la naissance. Il prédispose notre cerveau à l'acquisition de connaissances et à leur mise à l'épreuve, bref, il « humanise » notre cerveau.

L'évolution globale de la densité totale de synapses dans le cortex cérébral du singe et dans celui de l'Homme inclut une phase « rapide » : 90 % des synapses se forment alors au rythme de l'ordre du million par seconde. De plus, toutes les synapses ne se forment pas en même temps mais par de *multiples vagues successives* et emboîtées de synapses qui diffèrent avec les couches du cortex et mettent à la disposition de l'enfant un nombre considérable de combinaisons synaptiques possibles qui peuvent être modelées par les interactions « épigénétiques » avec son environnement social et culturel. Voilà qui peut expliquer l'imbrication de multiples périodes sensibles en relation avec les divers aspects de l'environnement physique, social et culturel que le nourrisson et le jeune enfant rencontrent au cours du développement jusqu'à l'âge adulte. Voilà aussi qui peut contribuer à la « non-linéarité » entre l'organisation du

génomique et la complexité du cerveau.

« Plusieurs études quantitatives menées au microscope électronique montrent que chez l'Homme, près de 50 % des synapses de l'adulte se forment après la naissance, et leur nombre continue d'évoluer en plus, ou en moins, jusqu'à la mort. »

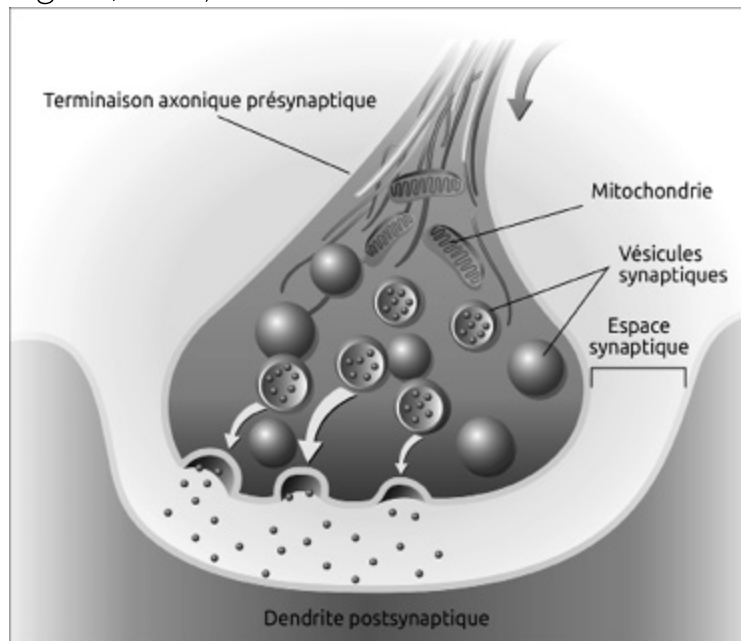
Au cours de périodes sensibles du développement, on assiste temporairement à une diversification exubérante de contacts synaptiques, suivie de la stabilisation sélective de certains de ces contacts labiles et de l'élimination (ou de la rétraction) des autres. Concomitamment, des phénomènes de croissance et de régénération des connexions peuvent se poursuivre à l'échelon local. Ces « allées et venues » des contacts synaptiques se maintiennent chez l'adulte. Mais l'équilibre se déplace au cours du vieillissement, et la régression finit par l'emporter avant la mort.

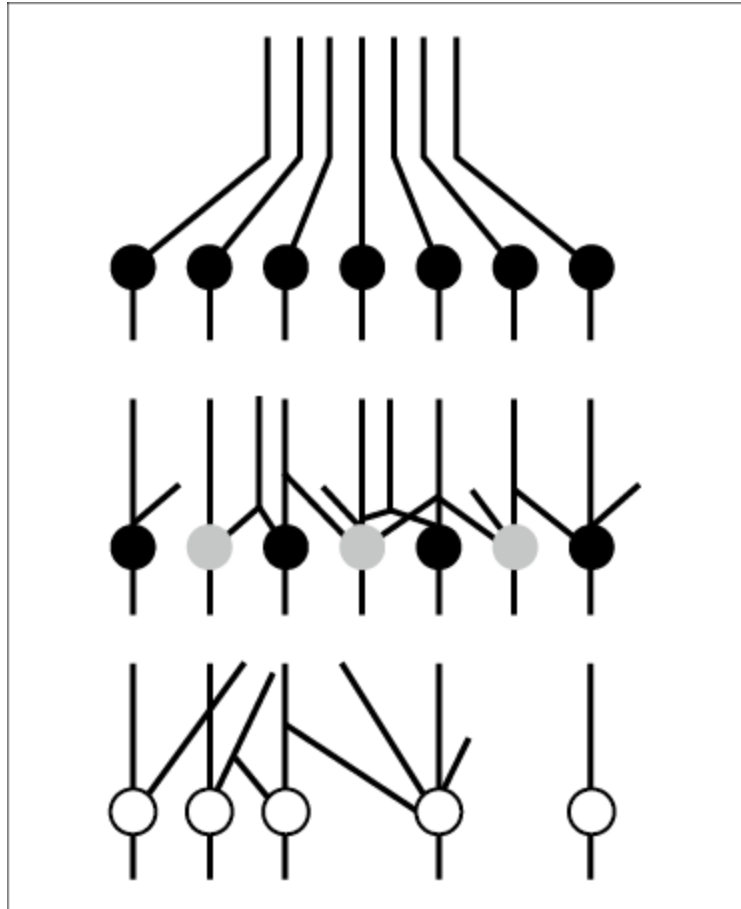
Le modèle simple que Philippe Courrège, Antoine Danchin et moi-même avons proposé dans les années 1970²⁵ décrit l'évolution synaptique au stade de la diversité maximale des contacts synaptiques sous au moins trois états formels : labile, stable et dégénéré. L'hypothèse cruciale ici est que l'évolution de l'état de chaque contact synaptique est contrôlée globalement et à l'intérieur d'une fenêtre temporelle précise par la totalité du message de signaux – activités spontanée et évoquée incluses – présents dans la cellule sur laquelle il se termine. En d'autres termes, l'activité de la cellule postsynaptique règle la stabilité, la régression et l'éventuelle repousse de la terminaison nerveuse par un « signal trophique » (pour la nutrition des tissus) qui se propage dans une direction opposée à celle de l'influx nerveux, c'est-à-dire de manière *rétrograde*. La connectivité particulière et la composition biochimique propre à chaque cellule nerveuse – ce que j'ai appelé sa

« singularité » ou son individualité²⁶ – seraient ainsi le résultat de la stabilisation sélective par l'activité d'une distribution particulière de contacts synaptiques parmi ceux qui sont présents au stade où la diversité est maximale.

Figure 5. Développement épigénétique des contacts entre neurones *via* les synapses.

Dessin d'une synapse et en dessous les trois lignes du schéma représentent, de haut en bas, la croissance, quelque peu au hasard des contacts entre neurones, l'exubérance transitoire et la sélection de distributions (ou géométries) particulières de contacts synaptiques (d'après Changeux, 1983).





En parallèle, des règles microscopiques d'apprentissage ont été formulées, en termes mathématiques et biochimiques, pour spécifier davantage les changements élémentaires intervenant dans l'efficacité synaptique en fonction de l'expérience. C'est à l'origine le psychologue canadien Donald Hebb qui a introduit la plus classique de ces règles en 1949. Elle stipule que la « force » d'une connexion augmente quand il y a coïncidence temporelle des activités pré- et postsynaptique. C'est une manière de remettre au goût du jour un des principes avancés dès le milieu du XVIII^e siècle par le philosophe écossais David Hume, dans un contexte empiriste, comme mécanisme de l'association des idées. Pour lui, la *gentle force* qui combine ou associe les idées repose sur « la qualité de la contiguïté dans le temps et dans l'espace » des stimuli : ce n'est rien de moins que la règle de Hebb.

À une plus grande échelle, des tentatives de modélisation concernent la formation de cartes fonctionnelles, en particulier la spécification des traits d'architecture qui caractérisent les aires visuelles. Nous savons que dans le cerveau, d'une manière générale, les neurones inhibiteurs coexistent avec les neurones excitateurs. Les neurones inhibiteurs équilibrent par leur nombre et leur importance physique les neurones excitateurs dont on pense souvent, à tort, qu'ils sont dominants dans le cerveau (de même que l'inhibition cognitive est aussi importante que l'activation-excitation des représentations ou stratégies dans le développement logique et conceptuel de l'enfant²⁷). Les modèles informatiques de populations mixtes de neurones excitateurs et inhibiteurs, dont la connectivité est fixée au départ de façon largement stochastique (par l'effet du hasard), peuvent développer des changements de forme remarquables en fonction de l'excitation qu'ils reçoivent. Autrement dit, les règles de la morphogenèse formulées par le mathématicien britannique Alan Turing²⁸ et appliquées initialement au développement embryonnaire peuvent légitimement être étendues à la formation d'ensembles organisés de connexions neuronales.

« Nous savons que dans le cerveau, d'une manière générale, les neurones inhibiteurs coexistent avec les neurones excitateurs. Les neurones inhibiteurs équilibrent par leur nombre et leur importance physique les neurones excitateurs dont on pense souvent, à tort, qu'ils sont dominants dans le cerveau. »

Les conséquences théoriques des modèles formels, un peu techniques, que je viens de présenter me semblent importantes à spécifier et à développer plus en détail dans la perspective très générale de la compréhension du développement du système nerveux central et tout spécialement de ses fonctions cognitives et

d'apprentissage.

3 L'exemple de l'apprentissage du langage

Pour mieux étayer cette réflexion théorique, encore bien incomplète, j'ai choisi quelques exemples se rapportant principalement à l'apprentissage du langage. Ils montrent clairement comment peuvent se mettre en place, et même être sélectionnées, des traces neuronales de manière épigénétique. Le premier exemple est classique : il s'agit de l'apprentissage du chant chez certaines espèces d'oiseaux. Peter Marler et ses collègues avaient démontré chez le moineau des marais (*Melospiza gregaria*) que la fixation du chant adulte, laquelle comporte environ deux syllabes, s'accompagne de la perte de plus des trois quarts des syllabes produites par le « babillage » initial du jeune oiseau²⁹. À cette attrition ou perte syllabique s'ajoute la variabilité du chant définitif de l'adulte. Les moineaux peuvent en outre apprendre à « imiter » des chants « artificiels » synthétisés par ordinateur.

On note un phénomène similaire d'attrition dans le cas de l'apprentissage du langage chez l'humain. Sur le plan perceptif par exemple, il y a le cas des phonèmes « ra » et « la » qui n'existent pas en japonais. Les bébés japonais de deux ou trois mois sont toutefois parfaitement capables de les distinguer, mais les Japonais adultes ont de grandes difficultés à y parvenir. L'acquisition du langage adulte s'accompagne donc d'une perte de capacités perceptives au cours du développement. La psychologue américaine Patricia Kuhl et ses collègues ont montré que ce phénomène s'étendait à la discrimination des voyelles chez les bébés américains et suédois³⁰. Selon eux, avant six mois, l'espace auditif des bébés est découpé selon des critères psycho-acoustiques universels. Après six mois, cet espace se réorganise et se simplifie pour s'accommoder aux langues particulières auxquelles les bébés sont exposés. Au moyen d'un processus de « stabilisation sélective », un tri s'effectue en fonction

de l'environnement linguistique entre des structures cérébrales engendrées de manière endogène. *Apprendre, c'est éliminer*, thèse que j'ai défendue dans *L'Homme neuronal*³¹.

Le babillage des enfants commence entre six et dix mois. Le babillage dit « canonique » est caractérisé par des syllabes simples produites par la plupart des enfants. Mais, même à l'intérieur d'une communauté linguistique, on remarque des différences individuelles. L'écoute attentive du babillage d'enfants de sept ou huit mois originaires de pays différents met déjà en lumière, en plus des ressemblances évidentes, certaines différences liées à l'environnement linguistique : attaques dures et syllabes accentuées chez les enfants arabes, modulations plus douces en français, nombreuses variations de hauteur en cantonais³². Ces évolutions suivent celle de la perception des sons. L'interaction entre la performance motrice (production) et la perception contribuerait à l'organisation du babillage par sélection jusqu'à douze mois.

« L'écoute attentive du babillage d'enfants de sept ou huit mois originaires de pays différents met déjà en lumière, en plus des ressemblances évidentes, certaines différences liées à l'environnement linguistique : attaques dures et syllabes accentuées chez les enfants arabes, modulations plus douces en français, nombreuses variations de hauteur en cantonais. »

Le second exemple est celui de l'illettrisme, handicap désastreux qui sévit toujours et à des niveaux étonnamment élevés dans les populations occidentales, auxquelles nous nous cantonnerons ici. Sur le plan comportemental, l'usage du langage parlé est très semblable chez les sujets illettrés et chez les sujets sachant lire et écrire. Pourtant, les illettrés présentent une particularité étonnante, qui concerne une tâche spécifique de traitement phonologique de la

parole. S'ils répètent avec facilité des mots ayant un sens, ils éprouvent des difficultés considérables à le faire face à des mots qui en sont dépourvus, ou pseudomots. La Tomographie par Émission de Positrons (TEP) révèle des différences très nettes entre les cerveaux de personnes alphabétisées et de personnes illettrées à qui l'on demande de répéter des pseudomots, alors que les différences ne sont pas significatives lorsqu'on leur fait répéter des mots ayant un sens³³. Parmi les territoires corticaux plus fortement activés par des mots réels que par des pseudomots chez les sujets alphabétisés par rapport aux illettrés, on compte notamment l'opercule frontal droit et l'insula antérieure, le cortex cingulaire antérieur gauche, le putamen/pallidum gauche, le thalamus antérieur et l'hypothalamus, ainsi que le cervelet médian. De même, le corps calleux, région de passage des fibres reliant un hémisphère à l'autre, paraît à certains niveaux plus mince chez les sujets illettrés³⁴. Le fait d'apprendre ou non à lire et à écrire au cours de l'enfance a donc un impact considérable sur l'organisation fonctionnelle du cerveau adulte.

L'acquisition de la lecture et de l'écriture par l'enfant exploite les capacités épigénétiques du cerveau à mémoriser de nouvelles compétences au cours de son développement. L'étude des lésions, notamment, a permis de mettre en évidence une interaction forte entre le traitement, par l'adulte, du langage oral et du langage écrit³⁵. Tout se passe comme si l'acte d'écrire mobilisait de façon tacite les voies du langage oral. De même, la lecture mobilise les voies de traitement du langage oral et, parmi elles, celles qui sont concernées par le traitement phonologique de mots nouveaux. Fait intéressant, l'absence d'expérience de la lecture altère la « stabilisation sélective » de cette voie phonologique spécifique aux mots nouveaux (tels les pseudomots dans l'expérience ci-dessus). Apprendre à lire et à écrire laisse donc dans le cerveau de l'enfant des traces épigénétiques profondes qui persisteront jusqu'à l'âge adulte.

L'apprentissage de la lecture : recyclage neuronal ou épigenèse synaptique ?

L'imagerie cérébrale a permis de découvrir que l'apprentissage de la lecture à l'école est rendu possible grâce à une région occipito-temporale gauche du cerveau, dite « aire de la forme visuelle des lettres et des mots » (ou « boîte aux lettres » du cerveau), initialement spécialisée dans la reconnaissance des objets. Il s'agit d'une région spécifique de la voie visuelle dite « ventrale » ou occipito-temporale, confirmée dans une méta-analyse d'IRMf (Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle) du réseau multi-aires de la lecture portant sur plusieurs centaines d'enfants³⁶. Selon Dehaene³⁷, dans l'histoire de l'humanité, avant l'apparition de l'écriture et de la lecture, comme au début du développement de l'enfant (avant 5-6 ans), les neurones de cette région étaient d'abord dédiés exclusivement à la reconnaissance visuelle des objets (domaine 1), puis sous l'effet de l'éducation, de l'école notamment, et de la pratique intense de la lecture, ces mêmes neurones se sont recyclés pour identifier les lettres et les mots de la langue de l'enfant (domaine 2). Ce serait l'un des plus élégants phénomènes de plasticité cérébrale provoqué par un apprentissage culturel selon Dehaene³⁸.

Mais en fait, il suffit de se référer, plutôt qu'au recyclage, à l'épigenèse synaptique³⁹, c'est-à-dire à la stabilisation et à la sélection des contacts entre neurones après la naissance. En effet, pendant l'apprentissage de la lecture et de l'écriture chez l'enfant, le rythme de formation des synapses est de l'ordre de 10 millions par seconde ! Ce serait donc, par ces contacts foisonnants, une *nouvelle empreinte neuronale*, un « circuit neuro-culturel » qui se formerait (se stabiliserait) lors de l'apprentissage de l'écriture et de la lecture⁴⁰, plutôt qu'un réel recyclage des neurones eux-mêmes. L'idée d'une telle empreinte culturelle dans le cerveau humain avait déjà été avancée, concernant l'écriture, par le neurologue Jules Dejerine en 1902 et démontrée pour la première fois en imagerie

cérébrale chez l'adulte, à propos de la lecture, un siècle plus tard⁴¹. Quoi qu'il en soit, empreinte nouvelle (Dejerine, Changeux) ou recyclage neuronal (Dehaene), la lecture provoque, de façon certaine, la signature d'un apprentissage culturel intense, en l'occurrence scolaire, dans le cerveau.

« La Tomographie par Émission de Positrons (TEP) révèle des différences très nettes entre les cerveaux de personnes alphabétisées et de personnes illettrées à qui l'on demande de répéter des pseudomots, alors que les différences ne sont pas significatives lorsqu'on leur fait répéter des mots ayant un sens. »

Un autre problème social important, soulevé notamment par l'Abbé de l'Épée à l'époque de la Révolution française, est celui de la communication avec les aveugles ou les sourds au moyen de nouvelles formes de langage utilisant les mains. La stratégie de lecture inventée en France par Louis Braille pose un problème difficile dans la mesure où elle exige une sensibilité et une précision extrêmes du bout des doigts pour distinguer la répartition de points en relief et transformer un code spatial en informations douées de sens. Dans certains cas de cécité précoce, les techniques d'imagerie cérébrale révèlent une extension significative du cortex pariétal somato-sensoriel de l'hémisphère gauche, après un an d'entraînement intensif au braille⁴². Cette aire est concernée en particulier par la perception tactile de l'espace. La trace est stable et persiste pendant plusieurs années. Mais l'imagerie cérébrale fonctionnelle révèle également un phénomène très inattendu : une forte activation des aires visuelles primaires et secondaires du cortex occipital, dont on sait qu'elles sont spécialisées dans la vision chez les sujets voyants. C'est un bel exemple de plasticité cérébrale. À la suite de l'acquisition du braille, les aires visuelles des sujets aveugles

deviennent donc capables de recevoir et de traiter des informations tactiles ! De plus, la Stimulation Magnétique Transcrânienne (SMT), nouvelle technique utilisée pour inactiver de façon réversible des aires délimitées du cortex, perturbe considérablement la lecture en braille quand on l'applique au niveau du cortex somato-sensoriel et aussi au niveau du cortex visuel strié chez le malvoyant⁴³. Le modèle le plus plausible, sinon le seul, pour rendre compte de ces résultats remarquables, pose qu'à la naissance des connexions fonctionnelles existent déjà entre les cortex somato-sensoriel et visuel ainsi qu'entre le thalamus non visuel et le thalamus visuel. L'apprentissage du braille aurait pour effet de sélectionner mais aussi d'amplifier par bourgeonnement les branchements terminaux des axones de ces voies préexistantes au bénéfice de la lecture tactile.

« À la suite de l'acquisition du braille, les aires visuelles des sujets aveugles deviennent capables de recevoir et de traiter des informations tactiles ! »

Cette analyse ne met pas fin au débat entre nature et culture ou inné/acquis, mais elle le replace dans une perspective nouvelle. On ne peut plus désormais parler d'inné et d'acquis sans prendre en compte à la fois les données du génome, leur mode d'expression au cours du développement, l'évolution épigénétique de la connectivité sous ses aspects anatomiques, physiologiques et comportementaux. Cela remet en cause (a) des formulations excessives qui ont un impact social très fort : comme les « gènes de telle ou telle capacité, aptitude ou trait de personnalité » ou (b) au contraire, la conception erronée, incomplète, de « la nature strictement constructive du développement mental ». Dans le premier cas, on omet l'épigenèse, dans le second, la génétique.

4 Cerveau, culture, environnement social et éducation

Le développement du cerveau humain se caractérise fondamentalement par cette « ouverture de l'enveloppe génétique » à la variabilité épigénétique et à l'évolution par sélection, celles-ci étant rendues possibles par l'incorporation dans le développement synaptique d'une composante aléatoire au sein des enchainements de croissance synaptique en cascade qui vont des débuts de l'embryogenèse jusqu'à la puberté. De plus, l'épigénèse rend possible le développement de la culture, sa diversification, sa transmission et son évolution.

Une bonne éducation devrait tendre à accorder ces schémas de développement avec le matériel pédagogique approprié que l'enfant doit apprendre et expérimenter. Petit à petit se met en place ce que le sociologue Pierre Bourdieu appelait l'« habitus » de chaque individu, qui varie avec l'environnement social et culturel, mais aussi avec l'histoire particulière de chacun. Le caractère unique de chaque *personne* se construit ainsi comme une synthèse singulière de son héritage génétique, des conditions de son développement et de son expérience personnelle dans l'environnement social et culturel qui lui est propre. La durée exceptionnellement longue de l'évolution épigénétique dont dispose le cerveau humain a permis une « incorporation » dans le cerveau de caractéristiques du monde extérieur sous forme de « savoirs épigénétiques », dont les savoirs scolaires. Inversement, c'est aussi ce qui a rendu possible la production d'une *mémoire culturelle* qui ne dépende pas directement des limites intrinsèques du cerveau humain et qui puisse être transmise de manière épigénétique au niveau du groupe social. Reste à comprendre comment il est possible qu'une recherche de « vérités universelles » ait pu voir le jour en dépit de la multiplicité des expériences et de la diversité des cultures. Cela renvoie aux invariants cognitifs du cerveau.

L'épigénèse connexionnelle crée un « medium » de stabilité intermédiaire entre (a) les gènes, dont la mutabilité s'exprime à

travers les générations et (b) l'espace conscient du cerveau dont la fugacité et la versatilité se manifestent dans les temps psychologiques. L'évolution jointe de ces deux dispositions a conduit à l'apparition de la pensée consciente et des transformations qu'elle suscite tant sur les conduites humaines que sur l'environnement terrestre dans lequel nos ancêtres ont évolué et nous évoluons. Un va-et-vient entre inné et acquis, une coévolution entre les gènes et les produits de l'activité cérébrale, a sans doute dû être sélectionné du fait du pouvoir d'exploration-expansion considérable qu'elle confère à l'espèce humaine tant par la démultiplication des fonctions cérébrales à connaître le monde que par sa capacité à agir sur celui-ci. Les mécanismes mis en jeu par cette évolution sociogénétique sont encore mal connus. Reste que la différenciation des aires et voies du langage, de l'espace de travail neuronal conscient et des réseaux de la théorie de l'esprit (comprendre et imaginer le point de vue d'autrui) a enrichi les fonctions cérébrales de dimensions nouvelles en apportant une « solidarité » de la réflexion et de l'action au niveau du groupe social. Somme toute, quelques changements essentiellement quantitatifs dans le génome et le phénotype connexionnel cérébral ont pu suffire pour déterminer une évolution que l'on peut juger comme *qualitativement* nouvelle des fonctions du cerveau de l'Homme.

IV. De la matière à la pensée consciente

Les éléments constitutifs du cerveau, les neurones, leurs connexions, les signaux qu'ils produisent et propagent, leur plasticité, de même que l'architecture et la dynamique évolutive de ces composants dans un système ouvert et motivé, devraient pouvoir être décrits, en dernière analyse, en termes moléculaires⁴⁴. Autrement dit, le

langage de la physique et de la chimie, dans lequel le philosophe des sciences allemand Rudolf Carnap voyait « le langage universel de la science » pourrait suffire pour décrire les fonctions supérieures du cerveau et en particulier celles qui permettent de rendre compte de l'acquisition des connaissances. À la condition, comme le soulignait déjà Diderot, que leur *organisation* soit prise en compte explicitement dans cette description. C'est peut-être une des propriétés les plus caractéristiques de la matière que de s'organiser de façon spontanée en assemblages à la fois multiples et définis, pour devenir, étape après étape, une « matière pensante », selon le terme de Voltaire.

La théorie de l'évolution permet, me semble-t-il, de répondre au paradoxe souvent soulevé par la capacité que possède notre cerveau de pouvoir comprendre le monde. Einstein, comme encore nombre de physiciens, trouvait « mystérieux » le simple fait que le monde soit compréhensible par l'Homme, que celui-ci soit capable d'en connaître les lois. En fait, la problématique doit être posée en sens inverse. Il s'agit de comprendre la dynamique bien terre à terre qui, au cours de l'évolution des espèces, a permis au cerveau des espèces qui nous ont précédés d'explorer le monde de manière à la fois plus vaste et plus précise jusqu'à l'exploration du cerveau de l'Homme lui-même. Au niveau le plus élémentaire, l'organisme unicellulaire, comme la bactérie ou la paramécie, est une « structure dissipative » (système qui évolue dans un environnement avec lequel il échange de l'énergie ou de la matière) qui maintient sa forme et se reproduit. L'éminent zoologiste anglais John Zachary Young (1964), poursuivant la réflexion du physiologiste français Claude Bernard, avait déjà suggéré que les organismes vivants sont des « homéostats » (l'homéostasie étant le maintien subtil de l'équilibre interne pour la survie de l'organisme⁴⁵). Pour cela, selon Young, les organismes vivants doivent contenir une « représentation » de l'environnement, appropriée à leur survie. Au niveau de la cellule, il s'agira des structures moléculaires nécessaires à la capture et au

métabolisme des substances chimiques élémentaires présentes dans l'environnement. Avec les organismes supérieurs, multicellulaires, se différencie un organe spécialisé dans la régulation des fonctions internes de l'organisme, dans la représentation du monde extérieur et dans leur « accord » mutuel : c'est le système nerveux.

Avec l'évolution, l'organisation du système nerveux devient de plus en plus complexe, sur les modes à la fois hiérarchique et parallèle. Ses capacités d'exploration et de représentation évoluent également et s'élargissent de l'environnement physique et biologique à l'environnement social et culturel. En parallèle, la plasticité du réseau et ses capacités d'apprentissage augmentent. Le monde que se représente la mouche diffère de celui de la souris, du singe et de l'Homme. Les dispositions innées s'enrichissent désormais d'une flexibilité qui démultiplie les capacités du cerveau à comprendre le monde et celles de l'Homme à agir sur celui-ci, à créer une culture, à la propager et à la transmettre d'une génération à la suivante, notamment, pour les professeurs des écoles de chaque pays, en apprenant à leurs élèves à lire, écrire, compter et penser ou raisonner. Ainsi se diversifient au sein de populations humaines des « individus » d'expérience et de culture différentes.

« Avec l'évolution, l'organisation du système nerveux devient de plus en plus complexe, sur les modes à la fois hiérarchique et parallèle. Ses capacités d'exploration et de représentation évoluent également et s'élargissent de l'environnement physique et biologique à l'environnement social et culturel. »

La beauté dans le cerveau : musique, peinture et circuits « neuroculturels »

Aujourd'hui, l'éducation artistique et culturelle est encouragée à l'école, de la maternelle au lycée, par les textes officiels. Mais, dans la réalité, les parents sont quelquefois surpris que le cours de dessin de leur enfant soit supprimé ou réduit à une portion congrue. Le français et les maths dominant... Tout se passe comme si l'art et la beauté étaient une variable d'ajustement dans l'agenda scolaire. Or ils sont essentiels au cerveau. La neuroscience de l'Art⁴⁶ révèle aujourd'hui que la contemplation d'un dessin ou d'une peinture par l'œil et l'écoute de la musique par l'oreille correspondent à des phénomènes physico-chimiques : des communications moléculaires *via* des protéines spéciales (dites « allostériques ») dans nos récepteurs sensoriels rétiniens ou auditifs. Cette physicochimie déclenche de véritables trains d'impulsions nerveuses qui se propagent, de manière ascendante, jusqu'au cortex cérébral où s'opère un travail d'analyse, puis de resynthèse ultime de l'œuvre. En outre, on sait aujourd'hui que les motifs d'activation des neurones dans le cortex visuel ressemblent aux motifs géométriques des images observées (*via* la rétinitopie⁴⁷), parfois de façon quasi mimétique, et il en est de même pour le cortex auditif avec les sons (*via* la tonotopie⁴⁸). Ainsi, des traces de l'environnement, en l'occurrence artistique et culturel, s'impriment quasi directement (*via* les molécules et impulsions nerveuses) dans le cerveau des enfants !

Dans un second temps, la « vérité » de l'œuvre s'enrichit, pour chacun, de l'accès conscient au sens et à la mémoire. Plus précisément, je fais l'hypothèse d'un espace de travail neuronal global⁴⁹, terme qui désigne ici la synchronisation de l'activité de plusieurs aires cérébrales sollicitées par la contemplation d'une œuvre d'art – des aires visuelles ou auditives, mais aussi d'autres zones impliquées dans le raisonnement, le souvenir et l'émotion. Sous la supervision de la partie antérieure du cerveau, le cortex préfrontal, cette synchronisation aurait pour effet de mêler

émotion et raison, une alchimie neuronale qui serait à la base du sentiment du beau. Cette synthèse répond à trois critères cognitifs : (a) la nouveauté associée à la surprise, (b) l'équilibre entre les parties et le tout – la cohérence ou *consensus partium* – et (c) la parcimonie. Rare est leur conjonction. La dernière, la parcimonie, est commune à la science et à l'art. En effet, la beauté d'une proposition scientifique tient au fait qu'elle explique beaucoup à partir de peu. De même, lorsque Rembrandt pose la touche de blanc qui illumine un regard ou que Matisse, ou Picasso, réalise un portrait ressemblant d'un simple trait continu, c'est de la parcimonie.

L'éducation en famille ou à l'école doit dès lors veiller à exposer en priorité le cerveau des enfants à la beauté, par la découverte assidue et approfondie des œuvres les plus riches et par la créativité de chacun car l'exploration incessante de l'environnement conduit à la sélection progressive⁵⁰ de « circuits neuroculturels » propres à chaque individu.

Dans la *Philosophie zoologique* de 1809, Lamarck distinguait déjà « une faculté singulière dont certains animaux et l'Homme même sont doués », qu'il nommait « sentiment intérieur ». Ses propriétés et ses fonctions sont celles que l'on attribue à l'espace conscient : ce nouveau monde intérieur de la subjectivité et des représentations qui y sont associées. En dépit de la singularité du monde intérieur de chaque « personne », le cerveau produit aussi des connaissances, élabore une pensée « universelle », telle la science, qui se communique au niveau de la société par le langage. Il crée aussi l'Art et perçoit, même produit, la beauté⁵¹.

Conclusion

Les fonctions cérébrales d'abord consacrées à la survie de l'individu s'étendent à celle du groupe social, avec un souci d'« exactitude » dans la représentation du monde qui va croissant. L'évolution

culturelle, qui a pris le relais de l'évolution biologique, engendre finalement en son sein l'Art, la philosophie, la pensée scientifique et la recherche de la vérité, devenues cruciales pour les sociétés contemporaines. Dès lors, le « mystère » de la capacité du cerveau à comprendre le monde et à le maîtriser (Einstein) est à rechercher non pas au niveau d'une quelconque instance « supérieure », mais au niveau très concret de ses origines biologiques, de son évolution et de son activité d'exploration, avec les erreurs mais aussi les succès que nous connaissons.

Enfin, avec les acquis d'un savoir scientifique universel, l'Homme devrait s'engager à utiliser les facultés créatrices qu'il possède dans son cerveau pour donner du sens à ce qui en demande le plus : l'Homme lui-même. Il lui revient, de toute urgence, d'inventer un « modèle éthique » qui tranche avec les violences, les intolérances et les crimes de notre passé culturel, et assure plus efficacement la survie et le « bien-vivre » de l'humanité. C'est dès l'école, par le vivre ensemble et l'apprentissage du respect d'autrui, que l'épigenèse du cerveau doit y être éveillée. Les neurones sont autant sociaux que cognitifs.

Les Essentiels

- Dans le cerveau humain, on rencontre environ 80 milliards de neurones (entre 86 et 100 milliards selon les estimations) et 1 million de milliards de synapses ou connexions. Il existe une grande variabilité parmi les cellules nerveuses de notre cerveau aussi bien qu'entre cerveaux d'individus différents. Neurones et fibres nerveuses possèdent la propriété exceptionnelle de produire des signaux électriques et chimiques et de réagir à ces signaux.
- Une caractéristique fondamentale du cerveau est son activité spontanée. On peut en rendre compte par des mécanismes physico-chimiques au niveau moléculaire. Une autre caractéristique est sa plasticité, terme qui désigne la capacité générale du neurone et de ses synapses (ainsi que des réseaux de neurones) à changer de propriétés en fonction de leur état d'activité. Cette propriété fondamentale va à l'encontre de l'impression naïve selon laquelle le cerveau serait une sorte d'automate rigide, constitué exclusivement de « roues et engrenages », fixés d'avance.
- Le cerveau est continuellement ouvert à l'environnement tant physique et social que culturel, et motivé pour l'explorer, le tester et se saisir des réponses (feedback) pour les confronter (test) à ce qu'il possède déjà en mémoire.
- Au cours du développement, dans l'épigenèse (au-dessus de ou après la naissance), l'apprentissage neuronal se fait par (a) la croissance, quelque peu au hasard des contacts entre neurones, (b) l'exubérance transitoire et (c) la sélection de distributions (ou géométries) particulières de contacts synaptiques. C'est le darwinisme neuronal.
- À la différence du schéma du « tout génétique » (où le cerveau serait la réalisation d'un patrimoine génétique strictement prédéterminé), le modèle épigénétique actuel du cerveau montre, au contraire, que les connexions entre neurones se

mettent en place progressivement avec une importante marge de variabilité et sont sujettes à une sélection par le jeu d'essais et d'erreurs dans l'environnement. Apprendre, c'est éliminer. D'où le grand rôle de l'éducation et de l'expérience individuelle ou sociale, en famille, puis à l'école.

1. Changeux J.-P., *L'Homme neuronal*, Fayard, 1983 ; Changeux J.-P. et al., *L'homme neuronal, trente ans après*, Éditions Rue d'Ulm, 2016.
2. Gall J.F., *Sur les fonctions du cerveau et sur celles de chacune de ses parties*, Baillière, 6 vol., 1822-1825.
3. Brodman K., *Vergleichende Lokalisationslehre der Groshirnrinde*, Barth, 1909 ; Garey L., *Brodman's Localisation in the Cerebral Cortex*, Springer Verlag, 2006.
4. Fodor J., *La Modularité de l'esprit*, Éditions de Minuit, 1983.
5. Baars B., *A Cognitive Theory of Consciousness*, Cambridge University Press, 1988.
6. Changeux J.-P. (2012). Synaptic epigenesis and the evolution of higher brain functions, In Sassone-Corsi P., Christen Y. (Eds.), *Epigenetics, Brain and Behavior, Research and Perspectives in Neurosciences*, Springer-Verlag, 11-22 ; Changeux J.-P. (2017). Climbing brain levels of organisation from genes to consciousness. *Trends in Cognitive Sciences*, 21, 168-181 ; Mesulam M., (2017). From sensation to cognition. *Brain*, 121, 1013-1052.
7. Agid Y., Magistretti P., *L'Homme glial. Une révolution dans les sciences du cerveau*, Odile Jacob, 2018.
8. Berthoz A., *Le sens du mouvement*, Odile Jacob, 1997 ; Berthoz A., *La décision*, Odile Jacob, 2003.
9. *Ibid.*, Changeux, 1983.
10. Bergstrom R. (1969). Electrical parameters of the brain during ontogeny, In R. J. Robinson (Ed.), *Brain and Early Behavior*, Academic Press, p. 15-42.
11. Houdé O., Mazoyer B., Tzourio-Mazoyer N., *Cerveau et psychologie. Introduction à l'imagerie cérébrale anatomique et fonctionnelle*, PUF, 2002, pour une présentation de toutes les techniques d'imagerie cérébrale, électriques dont l'EEG ou hémodynamiques.
12. Bear M., Connors B., Paradiso M., *Neuroscience: Exploring the Brain* (3rd Ed.), Lippincott Williams & Wilkins, 2007.
13. *Ibid.*, Bear et al., 2007. Zeki S., *A Vision of the Brain*, Blackwell, 1993.
14. D'après Fuster J., *The Prefrontal Cortex*, Raven Press, 1997.
15. *Ibid.*, Fuster, 1997 ; *Cortex and Mind*, Oxford University Press, 2003.
16. Houdé et al. (2000). Shifting from the perceptual brain to the logical brain: The neural impact of cognitive inhibition training. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, 721-728 ; *Ibid.*, Houdé, Mazoyer, Tzourio-Mazoyer, 2002.
17. Dehaene S., Kerszberg M., Changeux J.-P. (1998). A neuronal model of a global workspace in effortful cognitive tasks. *PNAS*, 95, 14529-14534 ; Dehaene S., Changeux J.-P. (2011). Experimental and theoretical approaches to conscious processing. *Neuron*, 70, 200-227.
18. Prigogine I., Kondepudi D., *Thermodynamique*, Odile Jacob, 1999.
19. Pacherie E., *Naturaliser l'intentionnalité*, PUF, 1993.
20. Changeux J.-P., *L'Homme de vérité*, Odile Jacob, 2002 ; *Gènes et culture*, Odile Jacob, 2003 ; *Du vrai, du beau, du bien. Une nouvelle approche neuronale*, Odile Jacob, 2008.
21. *Ibid.*, Changeux, 2003.
22. Gould S., *La Mal-Mesure de l'Homme*, Odile Jacob, 1997.
23. Hasnain M. et al. (1998). Intersubject variability of functional areas in the human visual cortex. *Human Brain Mapping*, 6, 301-315.
24. Kee D. et al. (1998). Multi task analysis of cerebral hemisphere specialization in monozygotic twins discordant for handedness. *Neuropsychology*, 12, 468-478 ; Steinmetz H. et al. (1995). Brain asymmetry in monozygotic twins. *Cerebral Cortex*, 5, 296-300 ; Traino M. et al. (1998). Brain size, head size and intelligence quotient in monozygotic twins. *Neurobiology*, 50, 1246-1252.
25. Changeux J.-P., Courrèges P., Danchin A. (1973). A theory of the epigenesis of neural networks by selective stabilisation of synapses. *PNAS*, 70, 2974-2978 ; voir aussi *Ibid.*, Changeux, 1983 et 2003.
26. *Ibid.*, Changeux, 1983.
27. Houdé O. (2000). Inhibition and cognitive development: Object, number, categorization, and reasoning. *Cognitive Development*, 15, 63-73 ; *Apprendre à résister*, Le Pommier, 2017 ; et chapitre 4 de cet ouvrage.
28. Prochiantz A., *Qu'est-ce que le vivant ?*, Le Seuil, 2012.

29. Marler P., Peters S. (1982). Developmental overproduction and selective attrition: New process in the epigenesis of bird song. *Developmental Psychobiology*, 15, 369-378.
30. Kuhl P. et al. (1992). Linguistic experience alters phonetic perception in infants by six months of age. *Science*, 255, 606-608.
31. *Ibid.*, Changeux, 1983.
32. Boysson-Bardies B. (de), *Comment la parole vient aux enfants*, Odile Jacob, 1997.
33. Castro-Caldas A. et al. (1998). The illiterate brain: Learning to read and write during childhood influences the functional organisation of the adult brain. *Brain*, 121, 1053-1063.
34. Castro-Caldas A., Reis A. (2000). Neurological substrates of illiteracy. *The Neuroscientist*, 6, 475-482.
35. Shallice T., *From Neuropsychology to Mental Structure*, Cambridge University Press, 1988.
36. Houdé O. et al. (2010). Mapping numerical processing, reading, and executive functions in the developing brain: An fMRI meta-analysis on 52 studies including 842 children. *Developmental Science*, 13, 876-885.
37. Dehaene S., *Les neurones de la lecture*, Odile Jacob, 2007.
38. Dehaene S. (2008). Cerebral constraints in reading and arithmetic: Education as a “neuronal recycling” process. In Battro A., Fischer K., and Léna P. (Eds.), *The Educated Brain: Essays in Neuroeducation*, Cambridge University Press, p. 232-247.
39. *Ibid.*, Changeux, 2012, 2017.
40. Changeux J.-P. (2007). Préface In Dehaene S., *Les neurones de la lecture*, Odile Jacob.
41. *Ibid.*, Castro-Caldas et al., 1998.
42. Sadato N. et al. (1996). Activation of the primary visual cortex by Braille reading in blind subject. *Nature*, 380, 526-528.
43. Hamilton R., Pascual-Leone A. (1998). Cortical plasticity associated with Braille learning. *Trends in Cognitive Sciences*, 2, 168-174.
44. *Ibid.*, Changeux, 2012, 2017.
45. Voir aussi Damasio A., *L'ordre étrange des choses. La vie, les sentiments et la culture*, Odile Jacob, 2017.
46. *Ibid.*, Changeux, 2016.
47. Tootell R. et al. (1998). From retinotopy to recognition: fMRI in human visual cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 2, 174-83 ; Wang Q., Burkhalter A. (2007). Area map of mouse visual cortex. *Journal of Computational Neuroscience*, 502, 339-357.
48. Humphries C. et al. (2010). Tonotopic organization of human auditory cortex. *NeuroImage*, 50, 1202-1211 ; Talavage T. et al. (2004). Tonotopic organization in human auditory cortex revealed by progressions of frequency sensitivity. *Journal of Neurophysiology*, 91, 1282-1296.
49. *Ibid.*, Dehaene et Changeux, 2011.
50. Changeux J.-P., Danchin A. (1972). Selective stabilisation of developing synapses as a mechanism for the specification of neuronal networks. *Nature*, 264, 705-712.
51. *Ibid.*, Changeux, 2016.

Au début était l'action

par Alain Berthoz

Cinq principes président au fonctionnement du cerveau et sont essentiels pour la pédagogie : le sens du mouvement, la simplicité, la vicariance, l'empathie et la décision.

Le sens du mouvement

L'intelligence du bébé est d'abord celle de l'action comme l'avait bien vu Jean Piaget. Nous pensons toujours – les élèves en particulier – avec notre corps ! Il ne faut pas imaginer le cerveau séparé du corps en mouvement¹. C'est une vision des neurosciences qui serait réductrice, formelle et artificielle. À l'école, comme ailleurs, les mécanismes physiologiques du sens du mouvement anticipent l'orientation d'un regard, la trajectoire d'une balle ou la perte de l'équilibre. Le cerveau n'est pas un calculateur isolé, prudent qui nous adapte – froidement, immobile – au monde ; c'est un simulateur prodige, en mouvement lui-aussi, qui invente des hypothèses, modélise et trouve des solutions qu'il projette au-dehors. Mais pour cela, il a dû inventer ou se conformer à la « simplicité ».

Conseil pédagogique : toujours prendre en compte et penser le sens du mouvement. Le cerveau dans le corps et dans l'espace est certes important pour l'éducation physique et sportive dans le programme scolaire, de la maternelle au lycée, mais aussi pour les

aspects dits « cognitifs », telles la géométrie et la construction mentale 3D de l'espace en mathématiques. Il faut faire se déplacer les élèves pour qu'ils comprennent les concepts. C'est une pédagogie du corps dans l'espace.

La simplicité

« La simplicité » est l'ensemble des solutions trouvées par les organismes vivants pour que, malgré la complexité des processus naturels, le cerveau puisse préparer l'acte (le geste ou mouvement, l'action, la réponse) et en projeter les conséquences². Ces solutions sont des principes simplificateurs qui permettent de traiter des informations ou des situations, en tenant compte de l'expérience passée et en anticipant l'avenir. Ce ne sont ni des caricatures, ni des raccourcis ou des résumés. Ce sont de nouvelles façons de poser les problèmes, parfois au prix de quelques détours, pour arriver à des actions plus rapides, plus élégantes, plus efficaces.

Conseil pédagogique : il faut apprendre la simplicité aux enfants. Faire simple n'est jamais facile ; cela demande d'inhiber, de sélectionner, de lier, d'imaginer pour pouvoir ensuite agir au mieux. Cela crée de la vicariance.

La vicariance

Lorsqu'un de nos sens en remplace un autre qui fait défaut (lorsque nous tâtonnons dans le noir, ou lorsque nous devons, suite à un accident, suppléer un organe défaillant), lorsque nous utilisons plusieurs stratégies pour parvenir à un même but, lorsque nous multiplions nos identités, avec des avatars par exemple, pour naviguer dans le monde virtuel d'Internet ou des jeux vidéo, nous nous en remettons à des processus vicariants mis en place au cours de l'évolution³. Cette vicariance, possibilité de remplacer une fonction par une autre ou de déléguer une fonction ou une action à un avatar virtuel, est bien une stratégie essentielle qui permet à

notre cerveau d'appréhender le monde extérieur et de nous y adapter en permanence.

Car tout acte créatif implique un changement de point de vue offrant une perspective nouvelle sur les choses, un décentrement que seule la vicariance est à même de provoquer. D'où son importance cruciale pour la pédagogie et l'enseignement.

Conseil pédagogique : il faut éduquer la vicariance à l'école en encourageant l'enfant, en fonction de ses dispositions, à prendre des chemins différents pour atteindre un même but, que ce soit au niveau spatial (en éducation physique et sportive) ou cognitif, lors de la résolution d'un problème de logique, de mathématiques ou autre en classe. Trouver des chemins de pensée, des raisonnements différents pour une même solution finale. C'est exercer la flexibilité du cortex préfrontal et le fait que les enfants usent de stratégies cognitives très différentes.

L'empathie

L'empathie, c'est pour le cerveau la capacité à prendre le point de vue des autres et à ressentir leurs émotions, *tout en restant soi-même*⁴. Elle permet de deviner leurs intentions, de comprendre leurs motivations et de leur attribuer des croyances ou pensées sur les choses et les êtres. Elle est distincte de la sympathie, qu'elle doit parfois inhiber, qui n'est qu'imitation et contagion émotionnelles, ne supposant pas de changement de point de vue.

Conseil pédagogique : il faut éveiller très tôt, dès la maternelle, cette capacité sociale dans le cerveau et les comportements des enfants. C'est essentiel pour le « respecter autrui » dans le programme scolaire, pour interagir avec les autres, socialiser dans la cour de récréation et nouer des liens affectifs durables. En primaire, comme au collège et au lycée, l'empathie est une garantie de compréhension et de respect des autres. Si l'empathie est bien stimulée chez l'enfant, par des jeux de rôle par exemple (prendre la

place d'autrui, regarder et imaginer les choses de son point de vue), le travail de groupe, la coopération qui exigent de coordonner les points de vue des uns et des autres, alors elle s'inscrira durablement dans la personnalité de l'enfant. Etant liée, dans le cerveau, aux régions émotionnelles qui nous font ressentir l'aversion à faire souffrir autrui, l'empathie est aussi un garde-fou efficace contre la violence à l'école – y compris les micro-violences quotidiennes – et devrait, par des « citoyens empathiques », servir la paix de l'humanité. C'était déjà le but ultime des pédagogies de l'éducation nouvelle de Montessori et Freinet au début du xx^e siècle. On en connaît à présent les circuits et mécanismes dans le cerveau. Ils sont objectivés et il faut les exercer. C'est l'une des façons de lutter pour la tolérance et contre la radicalisation violente qui touche aujourd'hui, notamment *via* Internet, des adolescents et jeunes adultes.

La décision

L'école doit aussi préparer les futurs décideurs dans notre société. Et, même sans être grands dirigeants nécessairement, chacun d'entre nous – déjà chaque élève durant son enfance – prend de multiples décisions par jour⁵. Mais comment prend-on une décision ? En calculant le pour et le contre ? En gardant la tête froide pour évaluer ses chances de succès ou ses risques d'échec ? En faisant taire ses passions ? Des découvertes sur le cerveau montrent que la décision n'est rien de tout cela. Elle n'est pas seulement raison, mais aussi motivation, et admet l'arbitrage de l'émotion qui attribue des valeurs. Le cerveau cognitif et le « cerveau limbique » (ou émotionnel) coopèrent et sont aussi parfois en conflit. Le cerveau est parieur, joueur, il dialogue avec le corps sensible et est ému.

Conseil pédagogique : il faut éveiller la capacité de prise de décision par l'action des élèves, ce qui est contraire au cours magistral classique, mais au cœur des pédagogies comme *La Main à la Pâte*

soutenue par l'Académie des sciences ou le travail de groupe, actif et coopératif, déjà préconisé par Freinet. À l'école, le raisonnement et la décision doivent être associés à la simulation de l'action, assortie d'une émulation des actions possibles – incluant celles des autres – pour toujours maintenir un lien fort et intime entre le corps et la pensée. ●

1. Berthoz A., *Le sens du mouvement*, Odile Jacob, 1997.
2. Berthoz A., *La simplicité*, Odile Jacob, 2009.
3. Berthoz A., *La vicariance*, Odile Jacob, 2013.
4. Berthoz A., *L'empathie*, Odile Jacob, 2004.
5. Berthoz A., *La décision*, Odile Jacob, 2003.

Le point de vue d'un inspecteur général de l'Éducation nationale

par Jean-Pierre Bellier

« Une civilisation évolue par ses mutins et ses mutants »¹

Chainons manquants de la liste des sujets devant nécessairement inspirer la réflexion de l'inspection générale de l'Éducation nationale, les sciences cognitives² comme les neurosciences³ ne faisaient jusqu'ici l'objet que d'un regard aussi exploratoire que confidentiel. Seuls quelques inspecteurs généraux illuminés, conscients que le sujet, du fait de sa transversalité et de son potentiel, était suffisamment d'importance pour qu'il soit sérieusement investigué puis partagé par toutes les disciplines et spécialités, s'en étaient jusqu'ici – dans une quasi-clandestinité – emparés.

Inspecteur général à l'initiative de la création du corps de psychologues de l'Éducation nationale, comment ne pas me réjouir, donc, de l'actualité ministérielle : naguère encore considérées dissidentes dans le monde de la psychologie clinique et pire, parfois, sans qu'il en soit fait même mention dans celui des sciences de l'éducation⁴, sciences cognitives et neurosciences se voient enfin investies au point d'être mobilisées en avant-poste des leviers de transformation des pratiques éducatives. Et tout ceci par l'entremise de celui qui préside à la destinée de l'Éducation nationale française, son ministre, Jean-Michel Blanquer. Qu'espérer de mieux ?

Pourtant, la déferlante de commentaires ayant accompagné ses premières initiatives en la matière, le débat provoqué par la nomination à la tête du Conseil scientifique de l'Éducation nationale d'un psychologue cognitiviste et neuroscientifique⁵ particulièrement « photosensible à la lumière médiatique » ont rapidement ému la communauté scientifique. Les neurosciences viendraient discréditer les apports des sciences de l'éducation. D'aucuns annonceraient même un prochain tsunami sur cette question dans l'École de la République. C'est en tout état de cause le message véhiculé par les médias friands de déclarations en tous genres sur les soi-disant méfaits du « pédagogisme » voire du « sociologisme ».

Quoi qu'il en soit, en première analyse, nous serions mal inspirés de boudier notre plaisir : le cerveau, cet « attracteur étrange » dont tous les êtres humains sont dotés, méritait mieux que l'omerta dans laquelle nombre de caciques de la pédagogie l'avaient confiné depuis la quasi nuit des temps. Et parce qu'il ne fut longtemps considéré que comme une boîte noire ne méritant au mieux qu'une approximative cartographie à peine fonctionnelle, le monde de l'éducation ne s'en empara que dans le cadre des enseignements des sciences de la vie pour le traiter comme un objet d'étude dont la simple description était censée se suffire à elle-même. Tout s'est longtemps passé comme si l'école s'évertuait à maintenir d'un côté ce qui relève de la structure du système nerveux central dans sa dimension strictement neurobiologique et, de l'autre, ce qui traite de l'intelligence, des apprentissages et de la « philosophie de l'âme ». Entre les deux un vide abyssal dont l'effet fut de maintenir à distance tout ce que les sciences cognitives comme les neurosciences, dont la psychologie, pouvaient apporter de déterminant dans la compréhension des mécanismes d'apprentissage. Parler du cerveau, de cognition, de prise et de traitement de l'information, d'encodage en mémoire, de rappel ou de reconnaissance fut longtemps considéré comme ésotérique voire hérétique face à l'aura philosophique et humaniste des sciences de

l'éducation. La propension du système à s'opposer pendant 70 années à la création d'un corps de psychologues, réfutant ainsi sans autre forme d'expertise les conclusions du plan Langevin-Wallon sur l'apport de la psychologie dans le monde éducatif, est à cet égard édifiante.

« Science sans conscience n'est que ruine de l'âme »⁶

Qui dit première analyse sous-entend qu'il y en aurait au moins une seconde. En effet, ne nous y trompons pas : s'il est vrai que les sciences cognitives comme les neurosciences seront de plus en plus influentes dans le perfectionnement des gestes pédagogiques comme dans celui de l'acte d'enseigner en général, il n'en est pas moins que notre cerveau, outre qu'il est le siège de nos acquisitions, de nos apprentissages, de notre mémoire, de nos connaissances – et l'opérateur de nos compétences, etc... – est aussi le réceptacle de notre « conscience ».

Peut-on en effet raisonner comme si la science se suffisait à elle-même pour expliquer tout ce qui relève des apprentissages, de la connaissance et du développement de l'intelligence humaine ? L'étude du cerveau a en effet engendré des représentations pour le moins contrastées entre sciences cognitives, neurosciences, cognitivisme voire connexionisme au point que les sciences humaines – dont les sciences de l'éducation – ont souvent eu tendance à se limiter à un rapprochement avec l'une ou l'autre d'entre elles... Pour leur part, outre le fait qu'elles ont des origines distinctes quoique des accroches communes avec certains de leurs fondements scientifiques, sciences cognitives et neurosciences se distinguent souvent par la représentation qu'elles suggèrent des relations de l'individu avec son environnement, donc par ce qu'elles disent chacune de la construction et de l'usage de l'intelligence humaine tels qu'elles les véhiculent. Les neurosciences s'intéressent prioritairement à relier l'atlas neuro-fonctionnel du cerveau aux

mécanismes qui lui sont associés. De leur côté en revanche, les sciences cognitives s'attachent en outre et prioritairement à établir des corrélations entre cet atlas, ces mécanismes *ET* le contexte social et émotionnel dans lequel ces derniers se structurent. Car c'est à un enjeu de cette nature que l'éducation est soumise : certes considérer l'enfant dans ses apprentissages, dans la façon dont il utilise son cerveau pour construire son ou ses intelligences, etc... mais en considérant cet enfant comme un tout *EN* interaction, dépendant de facteurs endogènes ou exogènes propices – ou au contraire nuisibles – à sa plasticité cérébrale, donc à son développement cognitif, social et émotionnel.

Car ne nous y trompons pas : cette approche est d'autant plus opportune que nous nous situons à un moment de l'exploration de la machine humaine où la question de l'intrication entre intelligence (s), plasticité cérébrale et mécanismes épigénétiques⁷ devient un champ de recherche en soi, fortement exploré par la psycho-neuro-immunologie⁸. Ainsi, sciences cognitives et épigénétique semblent s'attacher à des préoccupations communes en matière d'effets de contexte⁹ (équilibre en alimentation, maîtrise du stress, exercice physique, style de vie et épanouissement personnel). L'une comme l'autre de ces deux sciences semblent considérer combien ces facteurs sont déterminants pour permettre à tout un chacun d'apprendre, de se développer et de construire sa vie d'humain.

Le travail du LaPsyDÉ¹⁰ et de l'équipe d'Olivier Houdé est à cet égard exemplaire. Par sa pluridisciplinarité, l'agrégation de chercheurs venus de différents horizons qui le caractérise, nous rappelle que psychologues comme pédagogues doivent savoir se prémunir des risques de distinction entre science et conscience. Ces risques sont d'autant plus facilement encourus que notre connaissance encore fragile du fonctionnement cérébral encourage aisément le néophyte qui sommeille en chacun de nous à des raccourcis, voire des interprétations pour le moins excessives.

Pour cette raison, les enjeux philosophiques et humains des sciences

cognitives et des neurosciences doivent occuper une place centrale dans les préoccupations éducatives. Le rôle de l'éducateur consiste *en même temps* à faire prendre conscience que, si chacune pour ce qui la concerne, science et conscience constituent nos meilleures alliées pour relever les défis à venir de l'Humanité, cela ne peut se réaliser sans dégâts collatéraux que dans un cadre éthique parfaitement maîtrisé. L'avenir se jouera dans la capacité qu'auront les générations futures à les articuler de sorte qu'elles puissent renforcer leur « interpénétration ». Cette fonction intégratrice devrait devenir le projet global de la culture générale de tout citoyen tant l'avenir de l'Humanité pourrait en dépendre...

Comme le monde de l'éducation, celui de la recherche doit se souvenir qu'il n'est jamais aussi performant que lorsqu'il sait se rappeler qu'il marche sur deux jambes : science et humanités. ●

1. Citation initialement attribuée à Henri Laborit reprise par Edgar Morin et mentionnée par Albert Jacquard sous la forme « La richesse d'un groupe est faite de ses mutins et ses mutants ».

2. Discipline scientifique intégratrice associant la psychologie, la linguistique, l'intelligence artificielle, les neurosciences mais aussi l'anthropologie, la sociologie, la neuropsychologie et la psychologie sociale.

3. Discipline scientifique transdisciplinaire qui associe neurobiologie, neuropsychologie, mathématique, informatique et neuroimagerie, et qui porte sur l'étude de l'organisation et du fonctionnement du système nerveux.

4. <http://www.cahiers-pedagogiques.com/Verite-et-neurosciences>.

5. Stanislas Dehaene, docteur en psychologie cognitive, professeur au collège de France.

6. Expression de Rabelais tirée de *Pantagruel*, 1532.

7. Spécialité de la biologie qui étudie la nature des mécanismes adaptatifs de l'expression des gènes après la naissance sans en changer la séquence nucléotidique (ADN).

8. Voir les travaux de Rita Levi-Montalcini, Nobel 1986 de physiologie et de médecine.

9. Rosnay J. (de), *La symphonie du vivant. Comment l'épigénétique va changer votre vie*, Éditions les liens qui libèrent, 2018.

10. Laboratoire de Psychologie du Développement et de l'Éducation de l'enfant regroupant chercheurs en psychologie sociale et du développement, en sciences cognitives, en neurosciences ainsi que des spécialistes du monde de l'éducation.

2

Lire

par Johannes Ziegler et Anaïs Deleuze

En lisant ces lignes, vous profitez de l'une des plus belles inventions de l'humanité. Votre cerveau transforme les symboles sur la page – un ensemble de lettres restreint – en une immensité et une infinité de sens. Un océan de mots s'ouvre à vous, les symboles sur la page deviennent des sons du langage, et ces sons, porteurs de sens, vous font comprendre et apprendre. Grâce à l'écriture, le langage est devenu intemporel. Comme disait Francisco de Quevedo « Je converse avec les défunts et écoute les morts avec les yeux ». L'automatisme et la rapidité de ce processus – un lecteur expert parvient à lire 200 mots par minute – nous fait oublier son apprentissage laborieux et parfois périlleux et la machinerie complexe qui se cache derrière cet extraordinaire pouvoir du cerveau humain.

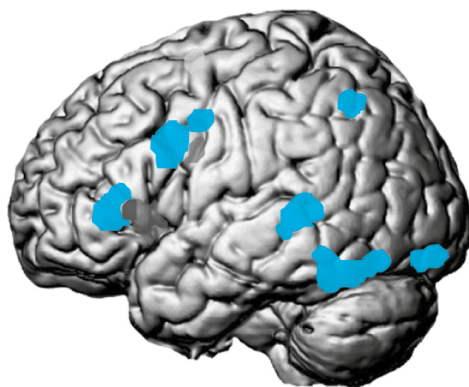
I. Les mécanismes d'apprentissage de la lecture

1 La découverte du réseau de la lecture

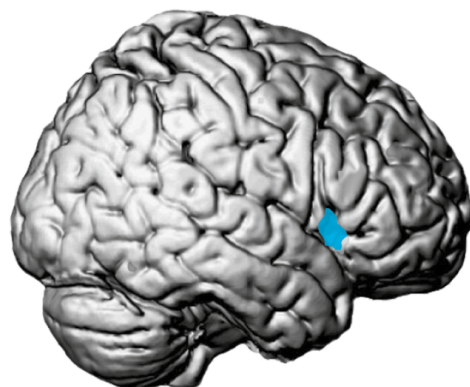
En 1994, Michael Posner et Marcus Raichle, un psychologue et un neurologue américains de renommée internationale, publient l'ouvrage *L'esprit en images*¹. L'imagerie cérébrale de la lecture y est au premier rang. Grâce à la tomographie par émission de positrons

(TEP) et l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), deux techniques qui permettent d'étudier *in vivo* les réseaux neuronaux qui sous-tendent les fonctions cognitives, le monde découvre un vaste réseau dédié à la lecture allant du cortex visuel aux aires du langage dans le cortex frontal inférieur, le cortex temporal et le gyrus angulaire (cf. figure 2). Depuis, des centaines d'études se sont consacrées à l'exploration de ce réseau auprès de différentes populations (adultes, enfants, dyslexiques, illettrés, sourds) et dans différents systèmes d'écriture². Plusieurs résultats-phares ressortent de ces études.

Figure 1. Le réseau cérébral de la lecture chez l'enfant, dans l'hémisphère gauche essentiellement, découvert en IRMf par Olivier Houdé dans une méta-analyse portant sur plusieurs centaines d'élèves de pays différents³.



Hémisphère gauche



Hémisphère droit

Tout d'abord, comme le montre une étude récente⁴, le réseau de la lecture est extrêmement similaire au travers des différents systèmes d'écriture, que ceux-ci utilisent des lettres, des caractères ou qu'ils transcrivent les phonèmes (plus petites unités de son), les syllabes ou encore les morphèmes (plus petites unités de sens). Deuxièmement, dans toutes les langues, une région précise à l'interface entre le cortex occipital et temporal de l'hémisphère gauche (figure 2 : en noir) fonctionne comme une porte d'entrée de

la lecture : il s'agit de l'aire de la forme visuelle des mots, la « boîte aux lettres du cerveau ». Elle se trouve au même endroit dans toutes les cultures, se développe au cours de la première année d'apprentissage de la lecture et répond spécifiquement aux ensembles de lettres ou de caractères. Chez les illettrés, elle s'active massivement face à des visages et des outils et sa réponse aux visages décroît à mesure que l'enfant apprend à lire⁵. Cela suggère que l'apprentissage de la lecture pousse le traitement des visages dans l'hémisphère droit du cerveau. Troisièmement, dans toutes les langues, le réseau de la lecture comprend les aires du langage (figure 2 : en bleu foncé), l'aire de Broca en charge de la production des mots dans le cortex frontal inférieur et l'aire de Wernicke en charge de la compréhension des mots dans le cortex temporal et le gyrus angulaire. Il est intéressant de noter que les zones bleues foncées répondent aussi bien à la parole qu'à la lecture, alors que seules les zones bleues claires autour du cortex auditif répondent spécifiquement à la parole mais pas à la lecture. Cela montre que la lecture est rendue possible par la mise en place d'une nouvelle interface, d'une nouvelle autoroute, du cortex visuel vers le langage oral. Comme le disait Alvin Liberman, un psychologue américain spécialiste de la perception de la parole « *reading is speech written down* » : la lecture, c'est la parole mise à l'écrit.

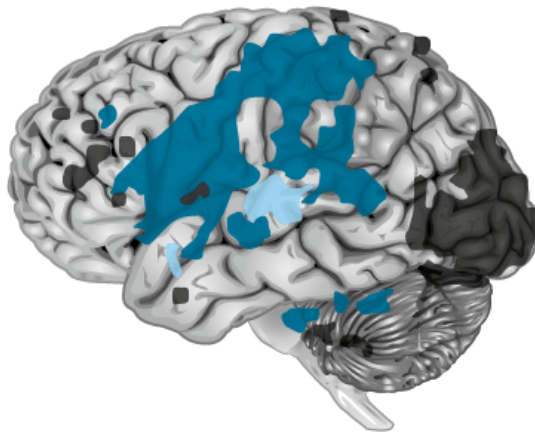
Quatrièmement, pour comprendre le sens des mots, le réseau sollicite d'autres zones cérébrales qui traitent nos sensations ou nos actions. L'idée selon laquelle la compréhension du monde, par l'entremise ou non de la lecture, fait appel à nos sensations physiques, est aujourd'hui connue sous le nom de « cognition incarnée ». À titre d'exemple, nous avons récemment montré que s'il est demandé à un sujet de lire des mots qui font référence au dégoût, comme par exemple le mot *vomir*, le cortex insulaire s'active et c'est exactement la même zone qui est activée lorsqu'un sujet renifle des odeurs écœurantes ou voit des images d'un acteur exprimant du dégoût⁶. De même, lorsqu'un sujet lit un mot comme

cannelle, on constate une activation dans le cortex gustatif⁷. Et lorsqu'il lit des verbes d'action, comme *tirer*, *cueillir* et *lécher*, ce sont des zones du cortex moteur commandant les mouvements du pied, de la main et de la bouche qui s'allument⁸. Comprendre les mots d'un autre, c'est donc activer les parties de notre cerveau qui traitent nos propres émotions, sensations ou actions. Ainsi, le cerveau ne crée pas un nouveau réseau spécifiquement dédié à la lecture mais il réutilise celui du langage oral qui lui-même réutilise une multitude de circuits, certains très anciens, en lien avec nos sensations, actions et émotions.

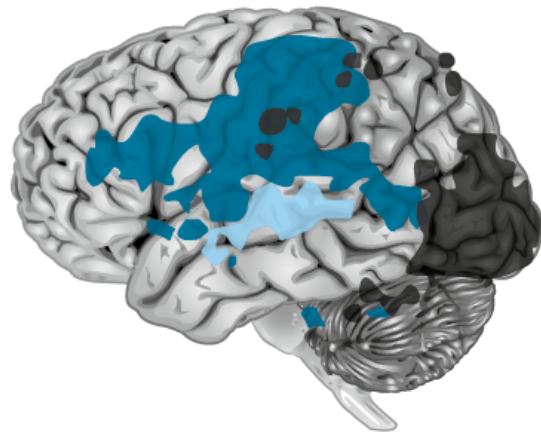
Figure 2. Quelles sont les régions cérébrales conjointement activées par le langage écrit et le langage oral ?⁹

La figure 2 présente l'activation cérébrale de l'hémisphère gauche lors de la lecture et de la perception de la parole dans quatre langues. La zone noire est activée uniquement par la lecture. Elle traite des ensembles de lettres et représente la porte d'entrée du réseau de la lecture. La zone bleue claire, proche du cortex auditif, est active uniquement lors de l'écoute de la parole. La zone bleue foncée est activée conjointement lors de la lecture et l'écoute de la parole. Elle comporte les aires du langage (aires de Broca et de Wernicke à gauche).

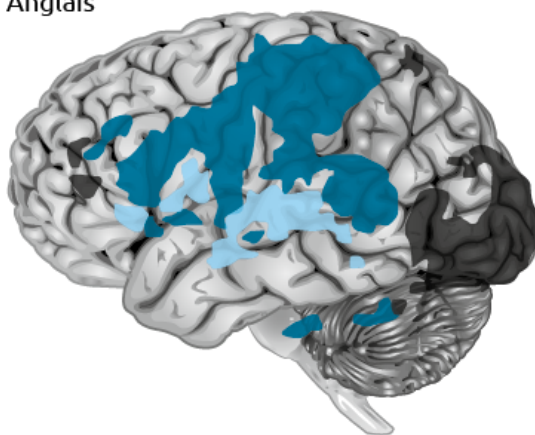
Espagnol



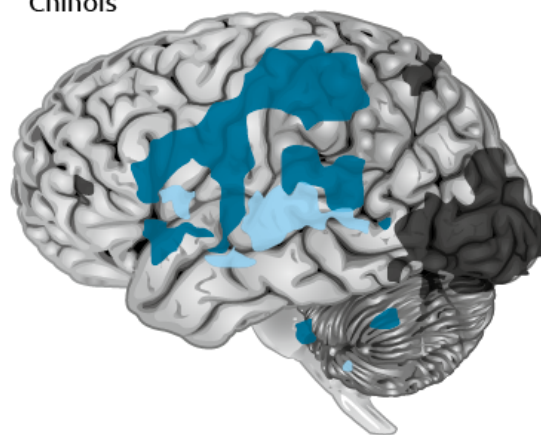
Hébreu



Anglais



Chinois



● Écouter

● Lire et écouter

● Lire

2 Apprendre à lire

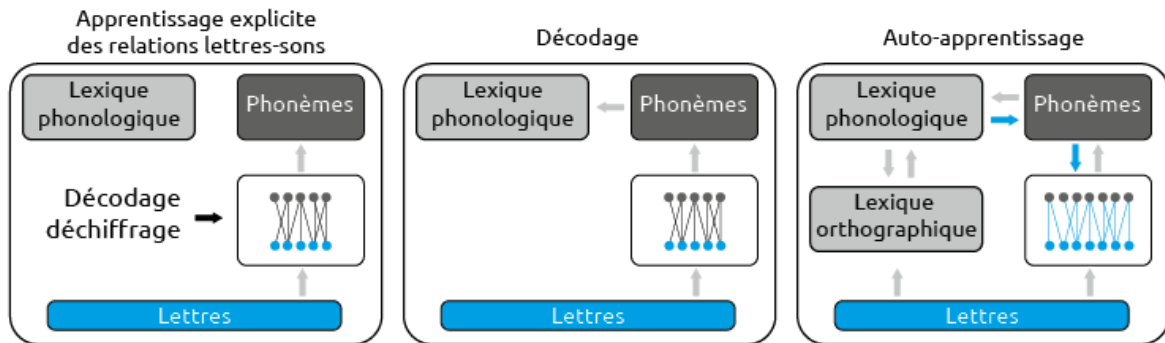
Mais comment ce système se met-il en place ? Pourquoi est-ce si long et pourquoi certains enfants rencontrent-ils des difficultés ? Rappelons deux faits importants. Premièrement, à part les hiéroglyphes égyptiens qui ne se sont pas imposés au cours de l'histoire, les systèmes d'écriture actuels transcrivent les sons de la parole et non pas leur sens (« *reading is speech written down* »). Dans un alphabet, les lettres ou groupes de lettres (graphèmes) représentent les sons de la parole (phonèmes) et non pas la signification du mot. Par exemple, savoir qu'un mot commence avec la lettre T ne dit absolument rien sur sa signification. Deuxièmement, le langage oral précède la lecture. Avant d'apprendre à lire, l'enfant possède en mémoire un « lexique mental » dans lequel sont stockées la forme sonore (phonologique) des mots et leur(s) signification(s) (sémantique). À juste titre, Wilhelm Wundt appelait ce lexique « le trésor des mots » (*Wortschatz*). Comme nous l'avons vu plus haut, l'apprentissage de la lecture ne fait que créer un nouveau chemin d'accès vers ce « trésor des mots ». Mais comment ?

Malin comme un singe. Mais peut-il apprendre à lire ?¹⁰

Que serait l'apprentissage de la lecture sans le langage oral ? Pour répondre à cette question, nous avons entraîné six babouins à apprendre des mots. La tâche précise consistait à apprendre à distinguer des mots anglais (par exemple, BANG) de chaînes de lettres sans signification (KANG), que nous appelons des « pseudo-mots » (Grainger, Dufau, Montant, Ziegler et Fagot, 2012). Les mots se répétaient jusqu'à ce que les singes les aient appris alors que les pseudo-mots ne se répétaient pas. Lors de l'entraînement, ils recevaient une récompense (un grain de céréale) pour chaque bonne réponse. Au bout d'un mois et demi, Dan, notre meilleur élève, avait appris 308 mots. Mais pour y arriver, il avait eu besoin de milliers d'essais corrigés et renforcés. Malgré un système visuel très similaire et de bonnes capacités de mémorisation visuelle, Dan n'est pas parvenu à apprendre aussi efficacement qu'un enfant qui apprend des milliers de mots en une année scolaire. Pourquoi ? Les mots sont composés d'un petit nombre d'éléments – les lettres dans les systèmes alphabétiques –, ce qui les rend visuellement peu distincts. Apprendre par cœur nécessiterait la mémorisation de milliers de combinaisons de ces mêmes éléments, combinaisons susceptibles d'être confondues. Ce type d'apprentissage serait comparable à la mémorisation d'un annuaire téléphonique : à moins de composer chacun des chiffres correctement et dans le bon ordre, la connexion échouerait. Il se peut que quelques rares individus soient capables de mémoriser des annuaires téléphoniques entiers, mais la tâche semble gigantesque pour un enfant qui doit apprendre des milliers de mots à l'école primaire.



L'apprentissage de la lecture : du décodage à l'auto-apprentissage¹¹



Modèle d'apprentissage de la lecture basé sur le décodage phonologique et l'auto-apprentissage des représentations orthographiques.

Avant l'apprentissage de la lecture, l'enfant possède un lexique phonologique, c'est à dire qu'il a mémorisé les formes sonores des mots qu'il connaît. Au moment d'apprendre à lire, il doit apprendre les associations entre les lettres et les sons, aussi appelées règles de correspondances graphèmes-phonèmes. Cet apprentissage est explicite et supervisé (avec maitre). Par la suite, quel que soit le système orthographique, l'enfant applique ces connaissances pour décoder de nouveaux mots et retrouver leur entrée dans son lexique phonologique. Chaque fois que l'enfant réussit à décoder un mot, c'est-à-dire chaque fois que le déchiffrage active en mémoire la forme orale d'un mot déjà connu, le mécanisme du décodage est renforcé (flèches bleues), et une représentation orthographique du mot peut être créée dans le lexique orthographique. L'apprentissage explicite (avec maitre) bascule alors vers l'apprentissage implicite (sans maitre). On parle alors d'un « mécanisme d'auto-apprentissage », car c'est alors l'acte même de la lecture qui renforce la lecture.

Le secret d'un apprentissage réussi de la lecture repose sur la maîtrise du « décodage ». Puisque le système d'écriture est un code

(où les sons correspondent à des ensembles de lettres qui ont eux-mêmes des positions préférentielles dans les mots), il est nécessaire que l'enfant apprenne la systématique, c'est-à-dire la constance et la prévisibilité de ce code.

Dans un système alphabétique, le code reflète « le principe alphabétique », qui veut que chaque graphème (lettres, ex. [a] ou ensemble de lettres, ex. [eau]) représente un phonème (ici, /a/et/o/) et *vice versa*. En apprenant ce code (le b.a.-ba), l'enfant peut décoder des mots qu'il n'a jamais vus auparavant mais qui se trouvent dans son lexique mental. L'apprentissage explicite, par le biais de l'enseignement d'un adulte, d'un petit nombre de règles de correspondances graphèmes-phonèmes suffit alors pour retrouver les milliers de mots stockés dans sa mémoire. Chaque décodage réussi – c'est-à-dire à chaque fois que l'enfant réussit à retrouver dans son lexique le bon mot en le lisant – permet alors de renforcer les connexions à l'origine de ce décodage, ce qui constitue un cercle vertueux d'apprentissage. L'apprentissage explicite (avec le soutien d'un maître) devient alors un auto-apprentissage sans maître. C'est ainsi que l'enfant, lisant seul, parfait sa compréhension du code écrit de sa langue de façon autonome et lit de façon de plus en plus précise et rapide. À titre d'exemple, *Harry Potter à l'école des sorciers* comporte 77 523 mots, qui constituent autant d'événements d'auto-apprentissage au service de la construction de cette autoroute du cortex visuel vers le langage oral. Vu comme ça, l'apprentissage de la lecture n'est pas sorcier !

Étant donné l'importance cruciale du décodage, on peut s'attendre à ce que l'apprentissage de la lecture soit ralenti dans les langues pour lesquelles ce décodage est particulièrement difficile à cause des irrégularités entre graphèmes et phonèmes (pour une revue, Ziegler, 2018¹²). En anglais, par exemple, la lettre « a » peut avoir cinq prononciations différentes dans des mots aussi fréquents que « *cat* », « *was* », « *saw* », « *made* », et « *car* ». Enseigner le code devient alors un casse-tête didactique. Rien à voir avec le finnois, l'italien ou

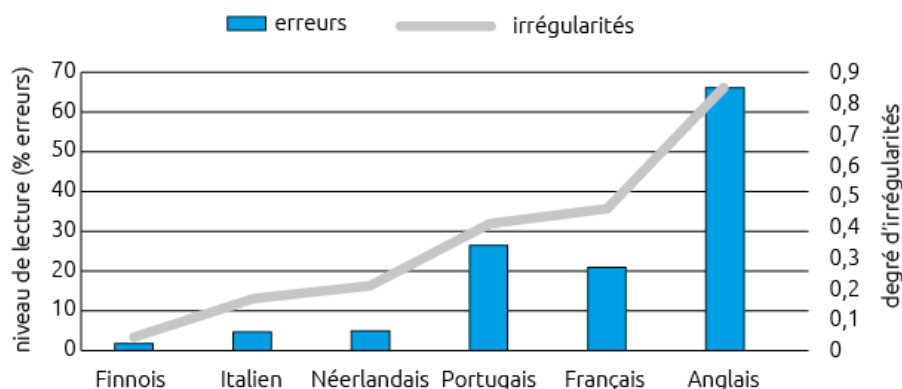
l'espagnol, où une lettre correspond typiquement à un seul phonème et *vice versa*. Dans ces langues, apprendre le code est une affaire de quelques semaines. Comme le montre la figure 3, le niveau de lecture à la fin du CP est directement prédit par le degré d'irrégularité de la langue.

C'est à cause de cette forte irrégularité de l'orthographe de l'anglais que certains chercheurs et didacticiens anglo-saxons avaient condamné la méthode du décodage au profit d'une méthode globale, qui interdisait toute forme de décodage et mettait en avant les vertus de deviner les mots dans leur contexte. Comme disait Kenneth Goodman, l'un des défenseurs de cette approche, « *Reading is a psycholinguistic guessing game* ». L'utilisation de la méthode globale dans les pays anglo-saxons s'est avérée néfaste, avec une chute importante du niveau de lecture à la fin des années 1980. Le gouvernement américain demanda alors un rapport au National Reading Panel¹³, qui fit état d'une centaine d'études montrant que l'enseignement systématique du décodage était plus efficace que son enseignement non systématique, notamment pour les enfants à risque de difficultés d'apprentissage de la lecture.

Quelles leçons tirer de ces résultats pour l'enseignement ? Premièrement, c'est la facilité avec laquelle le décodage peut être enseigné qui détermine le niveau de lecture à la fin du CP. Dans une écriture alphabétique, cela nécessite un enseignement des correspondances graphèmes-phonèmes qui doit être précoce (dès le début du CP), intensif et systématique. Deuxièmement, pour apprendre à lire des langues moins régulières, comme le français, il faut plus de temps. Or, une analyse du temps scolaire effectuée par Bruno Suchaut et collègues montre qu'un élève de primaire en France n'est activement engagé dans le code que 20 heures par an. Dans son article intitulé « 7 minutes pour apprendre à lire : À la recherche du temps perdu »¹⁴, il estime que plus du double serait nécessaire pour « craquer le code ». Il constate que « ces 20 heures annuelles éventuelles pendant lesquelles l'élève serait réellement

engagé sur l'apprentissage du code apparaissent bien dérisoires face au défi que représente l'apprentissage de la lecture pour les élèves les plus fragiles ».

Figure 3. Relation entre le niveau de lecture (% d'erreurs à la fin de la première année scolaire) et le degré d'irrégularités d'une langue¹⁵.



3 Lire c'est comprendre

La finalité de la lecture est la compréhension. Quid de l'enfant qui maîtrise le décodage mais n'arrive pourtant pas à comprendre un texte ? D'après les travaux de recherche¹⁶, le niveau de compréhension du langage écrit dépend de la maîtrise de deux compétences : le niveau de compréhension du langage oral et le degré d'automatisation des procédures d'identification des mots écrits. Quand ces procédures sont automatisées, le lecteur peut consacrer ses ressources cognitives à la compréhension de ce qu'il lit. Chez des adultes ayant automatisé ces procédures, les corrélations entre compréhensions écrite et orale sont très élevées : ceux qui comprennent bien à l'oral comprennent également bien à l'écrit et vice-versa. Il en est de même pour les enfants. Contrairement à une idée encore fort répandue, les élèves « bons décodeurs » ayant des problèmes de compréhension en lecture ont typiquement des problèmes généraux de compréhension, non spécifiques à la lecture.

Quand « lire c'est comprendre », les problèmes deviennent bien plus complexes. Prenons l'exemple suivant¹⁷ :

« Léo est coincé dans un bouchon. Il est très inquiet et se demande ce que son patron va encore dire, voire faire ».

Pour comprendre le texte ci-dessus, il faut en effet d'abord identifier chaque mot correctement, et bien avoir lu, par exemple, « Léo » (et non « Léa ») afin de pouvoir mettre en relation ce prénom avec sa reprise par le pronom « il », du genre masculin. Il faut aussi activer, dans le contexte de la première phrase, le sens approprié du mot « bouchon », qui n'est pas son sens littéral. Il faut, de plus, être capable d'établir des liens entre les deux phrases pour comprendre pourquoi Léo est très inquiet et pourquoi il se demande ce que son patron « va encore dire, voire faire ». C'est sur la base de ses connaissances générales que le lecteur peut *inférer* que l'inquiétude de Léo est due au fait qu'il se rend à son travail et qu'il va, en raison des embouteillages, arriver en retard, ce qui pose problème. Le « encore » permet en outre au lecteur de penser que ce n'est pas la première fois que cela arrive à Léo et que, cette fois, il risque fort d'avoir une sanction, et pas une simple remontrance.

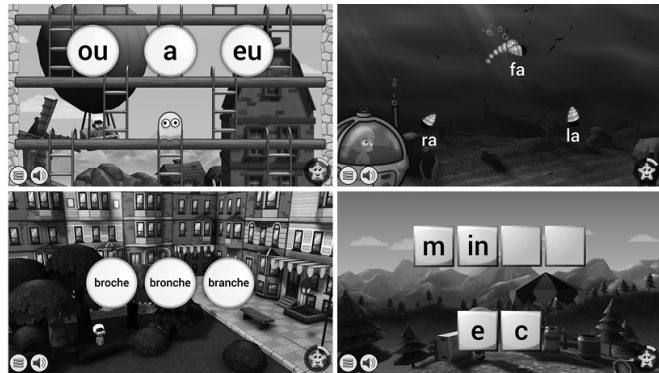
« Pour cerner les raisons qui font que les élèves (ou certains d'entre eux) ne comprennent pas bien ce qu'ils lisent, il est donc nécessaire d'évaluer d'abord leur degré de maîtrise des procédures d'identification des mots écrits. »

Ce texte, pourtant très court, illustre la complexité des processus engagés dans la compréhension. Cette complexité est accrue quand le texte doit être lu par une personne qui ne maîtrise pas bien les procédures d'identification des mots écrits. En dehors de ces procédures spécifiques à la lecture, les autres compétences nécessaires pour comprendre ce texte ne dépendent pas de son

mode de présentation, écrit ou oral. Pour cerner les raisons qui font que les élèves (ou certains d'entre eux) ne comprennent pas bien ce qu'ils lisent, il est donc nécessaire d'évaluer d'abord leur degré de maîtrise des procédures d'identification des mots écrits. Il faut, en plus, évaluer leur degré de maîtrise des procédures impliquées dans le traitement du langage oral, du niveau lexical (le vocabulaire) au niveau supra-lexical (de la phrase au texte).

Les outils numériques d'aide à l'apprentissage de la lecture

Comprendre le « principe alphabétique » (le b.a.-ba) est une chose mais encore faut-il automatiser ces connaissances pour atteindre une lecture fluide et libérer les ressources cognitives au service de la compréhension. Pour répéter inlassablement les mêmes correspondances graphèmes-phonèmes sans perdre la motivation de l'enfant, rien ne vaut un jeu sérieux informatisé. En effet, au fond d'une salle de classe ou en demi-groupe, une tablette numérique peut présenter des stimuli auditifs et visuels de très bonne qualité : phonèmes, lettres, syllabes, mots. La présentation simultanée des stimuli visuels et auditifs permet la synchronisation des aires visuelles et langagières du cerveau, ce qui favorise la mise en place des circuits propices à l'apprentissage de la lecture. La tablette suit les enfants individuellement, corrige leurs erreurs et adapte son contenu à leur progression. Plusieurs de ces outils d'aide à l'apprentissage de la lecture sont actuellement en cours d'expérimentation dans des écoles, comme le logiciel GraphoGame, qui est désormais disponible sur GooglePlay et Apple Store (voir www.grapholearn.fr).



II. Pratiques d'enseignement de la

lecture basées sur les données probantes

On constate aujourd'hui un fort consensus quant aux stratégies d'enseignement et de remédiation les plus efficaces¹⁸. Voici un bref résumé des résultats basés sur des données probantes.

1 Le style pédagogique

Un style structuré et directif démontre des effets positifs forts tant pour l'enseignement de la conscience phonémique, du décodage que de stratégies métacognitives de compréhension en lecture.

2 La conscience phonémique

La conscience phonémique représente une habileté fondamentale pour l'apprentissage de la lecture. Certains programmes d'entraînement de la conscience phonologique visent toutes les unités (rimes, syllabes, phonèmes) et intègrent une grande variété de manipulations (segmentation, fusion, allitération, isolation, etc.). Cependant, il semble que les programmes se concentrant sur seulement une à deux habiletés phonémiques sont plus efficaces que ceux intégrant un plus grand nombre d'activités. L'habileté à segmenter des mots en phonèmes (ex./ch/-/a/-/p/-/o/pour/chapeau/) est connue pour être l'habileté phonologique pivot du développement de la lecture. De fait, les programmes d'entraînement les plus efficaces intègrent des activités de segmentation phonémique en appui sur des mots écrits, c'est-à-dire en lien direct avec l'enseignement des correspondances graphèmes-phonèmes (CGP).

3 L'enseignement systématique des correspondances graphèmes-phonèmes

Pour garantir un apprentissage optimal, le code doit être explicité afin que l'enfant en saisisse la systématique, c'est-à-dire la constance et la prévisibilité. Le français est en effet une langue relativement transparente en lecture, avec des degrés de consistance de ses CGP allant de 80 % à 96 %, selon leur position dans les mots¹⁹. La recherche suggère ainsi d'enseigner les CGP de façon progressive et hiérarchisée, en privilégiant en premier lieu les CGP les plus fréquentes et les plus consistantes – c'est-à-dire les plus transparentes (voir Sprenger-Charolles, 2017 pour une proposition de progression pédagogique adaptée au français²⁰). Respectant ces principes, l'outil GraphoGame (voir pistes de pratiques ci-dessus) a été spécifiquement conçu pour soutenir l'apprentissage et l'automatisation des CGP du français en complément de l'enseignement explicite reçu en classe²¹.

4 L'automatisation du décodage et la construction du lexique orthographique

Une fois le code maîtrisé, les occasions de lecture authentique agissent comme autant d'expositions à sa systématique et à sa constance. Le niveau de vocabulaire acquis en amont de l'apprentissage de la lecture joue alors un rôle crucial. Les connaissances de l'enfant sur le monde lui permettent en outre de vérifier et de prédire le sens de ce qu'il lit, confirmant ainsi l'efficacité de son décodage, et permettant la construction de son lexique orthographique. L'exposition répétée à des textes (lors d'activités de lecture partagée à l'âge préscolaire ou de façon autonome une fois lecteur) constitue ainsi la clé de l'accès à une lecture experte et même du perfectionnement des habiletés de langage oral.

5 La conscience morphologique

Le français est une langue morphologiquement riche et complexe.

Ainsi, 80 % des mots du français sont constitués d'au moins deux morphèmes. Un nombre croissant d'études démontrent que les connaissances morphologiques dérivationnelles – c'est-à-dire les connaissances des relations unissant les bases des mots et les affixes (préfixes et suffixes) – soutiennent le développement de la lecture et de l'écriture, contribuent à enrichir le vocabulaire, facilitent l'accès au sens des mots inconnus et augmentent la compréhension de textes. Les enfants normo-lecteurs comme ceux présentant des difficultés d'apprentissage de la lecture profiteraient ainsi d'un enseignement explicite à ce niveau²². En situation de classe, des activités de décomposition (reconnaitre la base d'un mot morphologiquement complexe ; ex. [animal] dans [animalerie]) et de dérivation (dériver un mot à partir de la base présentée ; ex. « un homme qui danse est un... ») peuvent notamment être proposées. Idéalement, les premières phases d'enseignement de la morphologie dérivationnelle doivent s'appuyer sur des mots morphologiquement complexes transparents, c'est-à-dire dont la base ne subit aucun changement orthographique ou phonologique par ajout d'un affixe (ex. [antivol ou animalerie] versus [banquier] ou [chaton]).

6 Fluence de lecture

Une lecture fluente (ou fluide) est habituellement définie comme une lecture à voix haute à la fois précise, rapide et expressive (respectant la ponctuation et appliquant une intonation appropriée). La fluence n'est cependant pas une composante spécifique de la lecture mais plutôt un sous-produit de son automatisation. En cas de difficulté d'apprentissage de la lecture, les ressources cognitives du lecteur seront en effet prioritairement dévouées au maintien d'un bon décodage (précision), aux dépens de la vitesse. De fait, bien que les performances à des tâches de fluidité en lecture soient fortement corrélées à celles en compréhension en lecture ainsi

qu'aux performances académiques ultérieures²³, l'atteinte d'une lecture fluide est dépendante de l'automatisation des habiletés de décodage et de la constitution d'un lexique orthographique conséquent. Les habiletés de compréhension (notamment le niveau de connaissances sur le monde et de vocabulaire) participent également à l'atteinte d'une bonne fluidité de lecture. Des activités de lecture orale répétée peuvent cependant s'avérer efficaces pour accompagner l'enfant dont la lecture est déjà précise (donc dont le décodage est maîtrisé ou en cours d'automatisation) à accroître la vitesse et l'expressivité de sa lecture.

7 Compréhension en lecture

Comme décrit précédemment, la compréhension en lecture est une activité complexe et multidimensionnelle souvent définie comme le produit des habiletés de décodage et de la compréhension langagière générale du lecteur. Ainsi, même si en début d'apprentissage, les capacités de compréhension en lecture de l'enfant sont principalement expliquées par son niveau de décodage, plus il avance en âge, et plus ses capacités de compréhension en lecture s'expliquent davantage par son niveau langagier et cognitif général.

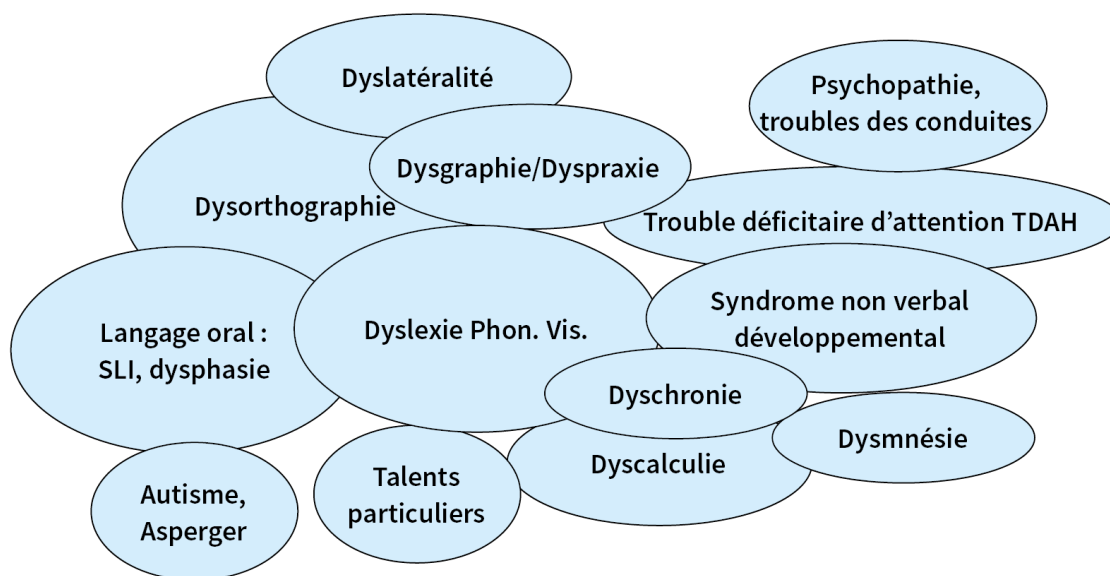
L'amélioration de la compréhension en lecture doit donc être stimulée de différentes façons selon le profil de l'enfant : par le renforcement, au besoin, des habiletés de décodage, sa maîtrise garantissant le dégagement des ressources mnésiques et attentionnelles nécessaires à l'accès au sens ; par l'enseignement de stratégies de contrôle de la compréhension en cours de lecture (comme la gestion des inférences textuelles ou encore la déduction du sens d'un mot en appui sur le contexte) ; et parfois, par le renforcement spécifique des habiletés de langage oral s'avérant déficitaires. Notamment, l'enseignement de mots de vocabulaire pour soutenir la compréhension en lecture a fait l'objet de

nombreuses études. À noter que bien qu'il s'agisse d'une méthode pédagogique répandue, enseigner des listes de vocabulaire s'avère peu efficace pour améliorer la compréhension en lecture, tant il s'agit d'une tâche infinie que de combler les lacunes d'un enfant à ce niveau. L'enseignement de stratégies d'ajustement en cours de lecture s'avérerait plus efficace.

III. Les « troubles dys »

En France, on utilise de plus en plus souvent le terme de « troubles dys » ou « constellation des dys »²⁴ pour se référer aux difficultés que rencontrent certains enfants dans leurs acquisitions scolaires alors même que leur intelligence est strictement normale, voire supérieure, et qu'aucune autre cause neurologique, psychologique ou environnementale ne peut être décelée (voir le rapport de l'INSERM²⁵ ; DSM-5, 2016²⁶). Une des représentations les plus répandues est celle schématisée sur la figure 4.

Figure 4. Constellation « dys » selon Habib et Ziegler (2016)¹⁶.



Parmi ces troubles, le plus connu est le trouble d'apprentissage de la lecture, que l'on appelle aussi dyslexie-dysorthographe. C'est en effet lors de l'apprentissage de la lecture que ce trouble est repéré : l'enfant dyslexique rencontre souvent des difficultés sévères à entrer dans la procédure de décodage et un déficit de la conscience phonémique. Le trouble de la lecture se trouve fréquemment associé à d'autres troubles qui sont parfois au second plan, mais en général bien visibles si investigués adéquatement : trouble développemental du langage, mais aussi trouble de l'orthographe, trouble du graphisme, troubles de la cognition mathématique, troubles de la motricité oculaire, trouble de l'attention et/ou trouble de la mémoire.

1 Prévalence et interdépendance du milieu socioéconomique

La prévalence de la dyslexie et des troubles dys varie de façon importante selon les études, de 5 % à 15 %, de sorte qu'on avance en général des chiffres moyens tenant compte de cette variabilité, soit de 6 à 8 % des enfants d'âge scolaire. Fluss et al. (2009)²⁷, après une vaste étude auprès de plus de 1000 enfants répartis dans 20 écoles de la ville de Paris, concluent que l'incidence de la dyslexie varie de 3,3 % à 24,2 % selon le milieu socioéconomique. En effet, l'enquête internationale PISA a montré qu'en France un enfant issu d'un milieu socioéconomiquement faible a quatre fois plus de risque de rencontrer des difficultés d'apprentissage qu'un enfant issu d'un milieu socioéconomique normal.

« Il est important de souligner que la qualité de l'environnement familial et les expériences de lecture précoces contribuent à l'émergence de compétences préalables à la lecture et que les compétences phonologiques sont plus faibles chez les enfants issus de milieux défavorisés. »

Quant aux facteurs génétiques, les études réalisées sur des jumeaux estiment de 50 à 60 % la part de l'hérédité dans les troubles de l'apprentissage de la lecture. Ainsi, les enfants dont un membre de la famille directe (parent, frère ou sœur) est dyslexique sont largement plus à risque de présenter eux-mêmes des difficultés au moment d'apprendre à lire. Les fragilités chez ces enfants « à risque » sont pour certaines observables dès l'âge préscolaire, principalement au niveau de leurs habiletés phonologiques²⁸. Il est important de souligner que la qualité de l'environnement familial et les expériences de lecture précoces contribuent à l'émergence de compétences préalables à la lecture et que les compétences phonologiques sont plus faibles chez les enfants issus de milieux défavorisés.

2 Les théories explicatives de la dyslexie

Nombreuses sont les théories qui tentent d'expliquer les origines causales de la dyslexie. Historiquement, parce que la lecture est un acte qui implique tant le langage que la vision, les théories explicatives de la dyslexie s'ancrent dans l'un ou l'autre, et parfois à l'interface de ces deux domaines. Les premières descriptions de symptômes et les hypothèses explicatives ont ainsi d'abord été visuelles (« cécité congénitale aux mots ») puis ont dominé le domaine de la recherche sur la dyslexie pendant la majeure partie du xx^e siècle.

Cependant, depuis les années 1970, le développement de méthodes d'observation plus fines des processus neurocognitifs impliqués dans l'acte de lire a permis d'étudier l'apprentissage de la lecture et ses troubles sous des angles nouveaux. Notamment, les progrès de la recherche en perception de la parole ont permis de réinterpréter certaines erreurs de lecture dites visuelles comme étant plutôt d'origine phonologique. Depuis ce virage de la recherche, la théorie phonologique, qui constate qu'un déficit dans le traitement

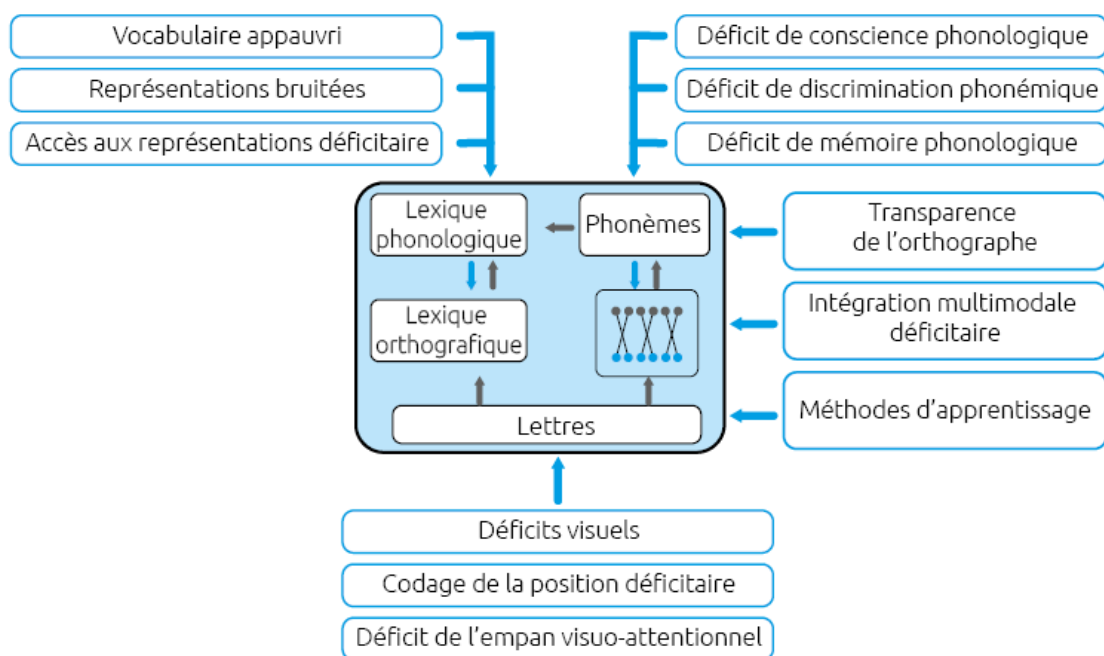
phonologique est responsable du fait que l'enfant peine à mettre en place le mécanisme de décodage, est graduellement devenue la théorie la plus influente et la plus étayée par les données empiriques. Ce déficit phonologique est habituellement observé au niveau de la conscience phonémique, de l'accès aux représentations phonologiques (c'est-à-dire de la capacité à coupler ce qui est lu aux formes sonores correspondantes au sein de notre vocabulaire) ou de la mémoire phonologique²⁹.

« Les enfants dyslexiques ont des difficultés à discriminer des phonèmes proches, comme le/b/du/p/, et ils ont du mal à isoler et à manipuler des phonèmes, comme par exemple enlever à l'oral le premier son d'un mot »

D'autres théories suggèrent un dysfonctionnement du cervelet, « l'autopilote » du cerveau, du fait que l'enfant dyslexique a des difficultés à automatiser des procédures d'apprentissages. Plus récemment, la notion de déficit rythmique a fait l'objet d'études préliminaires tendant à utiliser le rythme comme outil thérapeutique dans la rééducation des enfants dyslexiques. Citons enfin un ensemble de travaux tendant à démontrer l'existence d'un trouble des processus attentionnels, en tant que processus transversal, potentiellement impliqué dans tous les apprentissages initiaux, ou plus spécifiquement dans l'apprentissage de la lecture, à travers la notion de processus visuo-attentionnels ou de traitement attentionnel de la forme visuelle des lettres et des mots. Bien plus souvent, cependant, le déficit attentionnel est une association comorbide de la dyslexie plutôt qu'une cause, tant il est vrai que nombre d'enfants souffrant de troubles attentionnels sévères apprennent pour autant à lire, écrire et compter sans grande difficulté.

Revenons à notre modèle fonctionnel d'apprentissage de la lecture (encadré décodage et auto-apprentissage) pour comprendre où et comment un déficit potentiel peut perturber le processus d'apprentissage. Comme le montre le schéma ci-dessous (figure 5), les déficits visuels et visuo-attentionnels perturbent le niveau de traitement de lettres, que cela soit au niveau de l'identification ou du codage de la position des lettres. Sur le plan de la lecture, on constate des inversions de lettres et des plaintes que les lettres sont floutées. L'encombrement perceptif, c'est-à-dire le « masquage » d'un élément visuel par les éléments qui l'entourent, se situe également à ce niveau. Il est parfois plus élevé chez les enfants dyslexiques ou les enfants en début d'apprentissage et peut être réduit par l'écartement des lettres (voir pistes de pratiques ci-dessus).

Figure 5. La nature multifactorielle de la dyslexie.



L'un des déficits les plus fréquemment observés dans les études concerne le traitement des phonèmes. Les enfants dyslexiques ont des difficultés à discriminer des phonèmes proches, comme

le/b/du/p/, et ils ont du mal à isoler et à manipuler des phonèmes, comme par exemple enlever à l'oral le premier son d'un mot (conscience phonémique déficitaire). Bien que ces déficits parfois très subtils n'aient aucune importance pour la compréhension de la parole dans nos vies de tous les jours (on a par exemple l'habitude d'écouter la parole dans du bruit), c'est seulement lors de l'apprentissage de la lecture à l'école que ces déficits deviennent gênants car le cerveau d'un enfant ne peut pas apprendre les relations graphèmes-phonèmes correctement s'il « entend » deux phonèmes pour la même lettre ! En sciences cognitives, on appelle cela « l'apprentissage catastrophique ». Les enfants dyslexiques en savent quelque chose !

Certaines difficultés concernent spécifiquement la mise en relation des graphèmes avec les phonèmes. Tout d'abord, comme précédemment discuté, la transparence de l'orthographe rend ce processus plus difficile. Bien que la dyslexie existe dans toutes les langues, les troubles sont plus sévères dans les langues peu transparentes et un enfant dyslexique risque de renoncer plus rapidement et ses difficultés pourraient s'avérer plus persistantes dans une langue irrégulière. Puis, une mauvaise méthode d'enseignement, c'est-à-dire ne mettant pas en lumière la systématisme du code, peut aggraver les troubles de la lecture. Enfin, il a été montré que les enfants dyslexiques présentent des troubles spécifiques à gérer de façon intégrée les deux modalités nécessaires à la lecture, soit les modalités visuelle et auditive. Cela expliquerait les problèmes dans l'association des lettres (vision) aux sons (audition).

Enfin, si l'accès au « trésor des mots » est déficitaire soit parce qu'il manque des mots (vocabulaire appauvri ou représentations du sens des mots déficitaires) soit parce que les représentations phonologiques des mots sont dégradées ou difficilement accessibles, l'enfant ne parviendra pas facilement à apprendre à lire. Il décodera correctement mais ne trouvera aucune entrée dans son

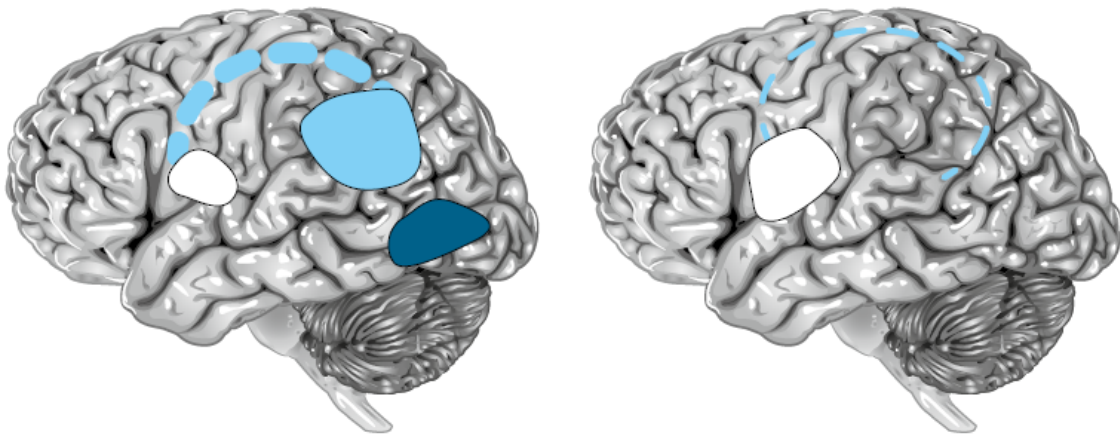
lexique phonologique, ce qui empêchera le mécanisme d'auto-apprentissage de faire son travail. C'est pour cela qu'un langage oral déficitaire entraîne très souvent des difficultés de lecture à long terme, notamment de compréhension, et ce bien que le décodage puisse être suffisamment précis.

3 Neuroanatomie de la dyslexie

Depuis les années 2000, un nombre considérable de travaux en imagerie cérébrale fonctionnelle (IRMf) a établi les bases de ce qu'on peut aujourd'hui appeler une « neuroanatomie de la dyslexie ». Sur ce schéma de la figure 6, on observe que les trois régions qui différencient le fonctionnement du cerveau d'un dyslexique par rapport aux normo-lecteurs sont des aires corticales de l'hémisphère gauche. Deux d'entre elles sont connues pour leur implication dans le langage : il s'agit de l'aire de Broca (ou cortex pré-frontal inférieur) et du carrefour temporo-pariétal (ou aire de Geschwind). La troisième est une région correspond à l'aire de la forme visuelle des mots, la « boîte aux lettres du cerveau », dont nous avons parlé précédemment. C'est la partie du cerveau la plus significativement sous-activée chez les enfants et adultes dyslexiques mais aussi chez les personnes illettrées. Toutefois, dire que ces zones dysfonctionnent n'a pas nécessairement valeur de mécanisme causal, puisque cela pourrait être seulement le fait d'une sous-utilisation de ces régions, qui serait elle-même la conséquence d'une faible expérience de lecture plutôt que la cause du problème.

Figure 6. Activations corticales de l'hémisphère gauche lors de la lecture de mots chez un sujet dyslexique (à droite) ; chez un sujet témoin (à gauche)³⁰.

En bleu foncé : aire de la forme visuelle des mots (VWFA) ; en blanc : cortex frontal latéral inférieur (aire de Broca) ; en bleu clair : carrefour temporo-pariétal (aire de Geschwind). Le trait pointillé montre le trajet sous-cortical du faisceau arqué.



Adaptations typographiques des textes

Plusieurs polices d'écriture dites « spécialisées » sont parfois suggérées pour soutenir la lecture des personnes dyslexiques (ex. *Dyslexie*, *OpenDyslexic*). Il n'existe à ce jour aucune démonstration scientifique de leur avantage sur d'autres polices d'écriture. Les données actuelles suggèrent cependant de préférer des polices d'écriture sans empattement (sans serif) et d'éviter l'usage de l'italique. Concernant la taille, les résultats sont peu nombreux mais suggèrent généralement une augmentation de la taille de la police, à un minimum de 14 points, selon les caractéristiques de la police utilisée et le confort subjectif de la personne.

Les résultats les plus prometteurs des dernières années quant à l'adaptation des textes portent sur l'écartement des lettres et des mots. Il a en effet été constaté qu'écarter davantage les lettres et les mots d'un texte améliore instantanément, sans aucun entraînement nécessaire, la précision de la lecture de personnes dyslexiques³¹. D'ailleurs, la police d'écriture *Dyslexie* présente par défaut un écartement des lettres supérieur aux autres polices d'écriture, ce qui pourrait expliquer pourquoi elle est rapportée comme plus confortable par certaines personnes dyslexiques, au-delà de la forme de ses lettres³².

(1) **Apprendre à lire puis lire pour apprendre.**

(2) **Apprendre à lire puis lire pour apprendre.**

Polices *Dyslexie* (1) et *Arial* (2), à taille égale.

Enfin, il n'est pas démontré que les feuilles de couleurs ou les filtres transparents colorés améliorent spécifiquement la lecture des personnes dyslexiques et leur usage a même été officiellement déconseillé par les associations de pédiatres, ophtalmologistes et orthoptistes américains³³. Quelles que soient les adaptations considérées, il apparaît indispensable de procéder à des essais et de prendre en considération le confort

subjectif du lecteur.

En conclusion

Nous avons vu que, quelle que soit la langue, la lecture n'est rien d'autre que la mise en place d'une nouvelle porte d'entrée vers le langage oral. L'enseignement explicite du décodage joue un rôle capital et la facilité avec laquelle il peut être enseigné et appris varie selon la transparence de la langue, ce qui explique par exemple qu'il faut plus de temps pour apprendre à lire le français que l'italien. Une fois le décodage maîtrisé, l'auto-apprentissage agit comme un mécanisme implicite qui renforce le décodage grâce à la compréhension de ce qui est lu, permettant ainsi l'automatisation de la lecture. Cette automatisation, à son tour, libère les ressources cognitives (ex. mémoire, attention) pouvant être dédiées à la compréhension. Ainsi, sans surprise, la compréhension d'un texte s'explique tant par le degré d'automatisation des procédures d'identification des mots écrits (précision et vitesse) que par le niveau de compréhension du langage oral (mots et phrases). Contrairement à des croyances très répandues, les enfants ayant des difficultés de compréhension écrite ne s'expliquant pas par des problèmes d'identification de mots (décodage) et/ou de compréhension orale constituent des cas exceptionnels³⁴ (autour de 1 %). Pour réduire ces difficultés, il est nécessaire d'évaluer les compétences liées à ces processus (décodage, vocabulaire, langage oral) dès le CP si nécessaire et de mettre en place des stratégies individualisées de renforcement des capacités repérées comme fragiles. Il faut aussi que l'enseignant évalue à intervalles réguliers les progrès de l'enfant, ce qui lui permet de savoir si les stratégies mises en place sont efficaces ou si l'enfant a besoin d'une prise en charge plus intensive et individualisée.

Les Essentiels

- Le décodage étant au cœur de l'apprentissage de la lecture dans toutes les langues alphabétiques, les enseignants français doivent être plus astucieux pour enseigner la systématique des relations graphèmes-phonèmes que certains de leurs collègues européens, et ce à cause de la plus forte irrégularité du français. Ainsi, l'apprentissage de la lecture exige plus de temps en français que dans des langues plus transparentes.
- Pour automatiser sa lecture, l'enfant doit entrer dans le cercle vertueux de l'auto-apprentissage, où la compréhension de ce qui est lu renforce et automatise les mécanismes sous-jacents. Pour cela, il faut multiplier et encourager les occasions de lecture authentique et s'assurer que les mots soient lus dans différents contextes.
- La compréhension d'un texte s'explique par le degré d'automatisation des procédures d'identification des mots écrits (précision et vitesse) et par le niveau de compréhension du langage oral. L'enseignant a donc au moins ces deux leviers d'action pour améliorer la compréhension.
- Les enfants ayant des difficultés de compréhension écrite ne s'expliquant pas par des problèmes d'identification de mots (décodage) et/ou de compréhension orale constituent des cas exceptionnels.
- L'évaluation systématique des compétences liées à ces processus (décodage, vocabulaire, langage oral) est nécessaire dès le CP pour mettre en place des stratégies individualisées de renforcement des capacités repérées comme fragiles.
- Les difficultés des enfants dyslexiques s'expliquent souvent par une fragilité au niveau phonologique (conscience phonémique) qui empêche la mise en route du décodage et qui, à son tour, ne permet pas de rentrer dans l'auto-apprentissage. Le cercle vertueux devient alors un cercle vicieux impactant le développement des habiletés langagières écrites comme

orales. Des interventions précoces et intensives au sein de l'école comme à l'extérieur restent les meilleures armes pour soutenir le développement du plein potentiel de ces enfants.

1. Traduction en français en 1998 : Posner M.L., Raichle M.E, *L'esprit en images*, De Boeck Supérieur, 1998.
2. Dehaene S., *Les neurones de la lecture*, Odile Jacob, 2007.
3. D'après Houdé et al. (2010). Mapping numerical processing, reading, and executive functions in the developing brain: An fMRI meta-analysis on 52 studies including 842 children. *Developmental Science*, 13, 876-885.
4. Rueckl J. G., Paz-Alonso P. M., Molfese P. J., Kuo W. J., Bick A., Frost S. J., Frost R. (2015). Universal brain signature of proficient reading: Evidence from four contrasting languages. *Proceedings of the National Academy of Sciences U S A*, 112(50), 15510-15515.
5. Dehaene S., Cohen L., Morais J., Kolinsky R. (2015). Illiterate to literate: behavioural and cerebral changes induced by reading acquisition. *Nature Review Neuroscience*, 16(4), 234-244.
6. Ziegler J. C., Montant M., Briesemeister B. B., Brink T. T., Wicker B., Ponz A., Braun M. (2018). Do Words Stink? Neural Reuse as a Principle for Understanding Emotions in Reading. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 1-10.
7. González J., Barros-Loscertales A., Pulvermüller F., Meseguer V., Sanjuán A., Belloch V., Ávila C. (2006). Reading cinnamon activates olfactory brain regions. *Neuroimage*, 32(2), 906-912.
8. González J., Barros-Loscertales A., Pulvermüller F., Meseguer V., Sanjuán A., Belloch V., Ávila, C. (2006). Reading cinnamon activates olfactory brain regions. *Neuroimage*, 32(2), 906-912. ; Pulvermuller F. (2005). Brain mechanisms linking language and action. *Nature Review Neuroscience*, 6(7), 576-582.
9. Rueckl et al. (2015). Figure reproduite avec la permission de Jay Rueckl.
10. Grainger J., Dufau S., Montant M., Ziegler J. C., Fagot J. (2012). Orthographic Processing in Baboons (*Papio papio*). *Science*, 336 (6078), 245-248.
11. Ziegler J. C., Perry C., Zorzi M. (2014). Modelling reading development through phonological decoding and self-teaching: implications for dyslexia. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 369(1634).
12. Ziegler J. C. (2018). Différences inter-linguistiques dans l'apprentissage de la lecture. *Langue Française*, 35-49.
13. National Institute of Child Health and Human Development. (2000). Report of the National Reading Panel. Teaching children to read : An evidence-based assessment of the scientific research literature on reading and its implications for reading instruction (NIH Publication No. 00-4769). *US Government Printing Office*.
14. Suchaut B., Bougnères A., Bouguen A. (2014). Sept minutes pour apprendre à lire. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01062065/>
15. *Ibid.*, Ziegler, 2018.
16. Castles A., Rastle K., Nation K. (2018). Ending the Reading Wars: Reading Acquisition From Novice to Expert. *Psychological Science in the Public Interest*, 19(1), 5–51.
17. Traduit de Castles, Rastle et Nation (2018) et adapté au français par Liliane Sprenger-Charolles.
18. *Ibid.*, Ziegler, 2018.
19. Peereman R., Sprenger-Charolles L., Massaoud-Galusi S. (2013). The contribution of morphology to the consistency of spelling-to-sound relations: A quantitative analysis based on French elementary school readers. *L'année psychologique/Topics in Cognitive Psychology*, 113, 3–33.
20. Sprenger-Charolles L. (2017). Une progression pédagogique construite à partir de statistiques sur l'orthographe du français (d'après manulex-morpho) : pour les lecteurs débutants et atypiques. *Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant*, 29(148), 247-262.
21. Ruiz J.P., Lassault J., Sprenger-Charolles L., Richardson U., Lyytinen H. Ziegler J. (2017). GraphoGame: un outil numérique pour enfants en difficultés d'apprentissage de la lecture. *Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant*, 29(148), 333-343.
22. Goodwin A.P., Ahn A. (2013). A Meta-Analysis of Morphological Interventions in English: Effects on Literacy Outcomes for School-Age Children. *Scientific Studies of Reading*, 17(4), 257-285 ; Apel K., Werfel K. (2014.). Using morphological awareness instruction to improve written language skills. *Language, Speech, and Hearing Services in Schools*, 45, 251-260.
23. Ehri L.C., Nunes S.R., Stahl S.A., Willows D.M.M. (2001). Systematic phonics instruction helps students learn to read: Evidence from the National Reading Panel's meta-analysis. *Review of Educational Research*, 71, 393-447, 2001.
24. Habib M., Ziegler J. C. (2016). Dyslexie et troubles apparentés : une revue critique de 15 ans de recherche scientifique Perspectives thérapeutiques. In Pinto S., Sato L. (Eds.), *Traité de neurolinguistique*, De Boeck Supérieur, p. 329-336.
25. Inserm (dir.). Dyslexie, dysorthographe, dyscalculie : bilan des données scientifiques. Rapport. Les éditions Inserm,

2007, XV- 842 p. - (Expertise collective).

26. American Psychiatric Association, *Diagnostic and statistical manual of mental disorders DSM-5* (5^e éd.), American Psychiatric Publishing, 2013.

27. Fluss J., Ziegler J. C., Warszawski J., Ducot B., Richard G., Billard C. (2009). Poor reading in french elementary school: The interplay of cognitive, behavioral, and socioeconomic factors. *Journal of Developmental and Behavioral Pediatrics*, 30(3), 206-216.

28. Snowling M. J., Melby-Lervåg M. (2016). Oral language deficits in familial dyslexia: A meta-analysis and review. *Psychological Bulletin*, 142(5), 498-545.

29. Vellutino F.R., Fletcher J.M., Snowling M.J., Scanlon D.M. (2004). Specific reading disability (dyslexia): What have we learned in the past four decades?. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 45, 2-40 ; Landerl K., Ramus F., Moll K., Lyytinen H., Leppänen P.H.T., Lohvansuu K., Schulte-Körne G. (2013). Predictors of developmental dyslexia in European orthographies with varying complexity. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 54, 686–694.

30. Habib M., Ziegler J. C. (2016). Dyslexie et troubles apparentés : une revue critique de 15 ans de recherche scientifique Perspectives thérapeutiques. In Pinto S., Sato L. (Eds.), *Traité de neurolinguistique*, De Boeck Supérieur, p. 329-336.

31. Zorzi M., Barbiero C., Facoetti A., Lonciari I., Carrozzi M., Montico M., Ziegler J.C. (2012). Extra-large letter spacing improves reading in dyslexia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109, 11455–11459 ; Hakvoort B., Van den Boer M., Leenaars T., Bos P., Tijms J. (2017). Improvements in reading accuracy as a result of increased interletter spacing are not specific to children with dyslexia. *Journal of Experimental Child Psychology*, 164, 101-116.

32. Marinus E., Mostard M., Segers E., Schubert T. M., Madelaine A., Wheldall K. (2016). A special font for people with dyslexia: Does it work and, if so, why?. *Dyslexia*, 22(3), 233-244.

33. Handler S.M., Fierson W.M. (2011). Learning Disabilities, Dyslexia, and Vision. *Pediatrics*, 127(3), e818-e856.

34. Gentaz E., Sprenger-Charolles L., Theurel A. (2015). Differences in the predictors of reading comprehension in first graders from low socio-economic status families with either good or poor decoding skills. *PLoS ONE*, 10(3), e0119581 ; Gentaz E., Sprenger-Charolles L., Theurel A., Colé P. (2013). Reading comprehension in a large cohort of French first graders from low socio-economic status families: a 7-month longitudinal study. *PLoS ONE*, 8(11), e78608.

La lecture : au-delà de la querelle des méthodes

par Roland Goigoux

La théorie : les méthodes d'enseignement

Si on appelle « méthode » l'ensemble des principes qui sous-tend l'action des professeurs, on peut distinguer deux grands types d'approches.

Dans les approches centrées sur la maîtrise du code alphabétique, on procède en deux temps successifs : on enseigne d'abord les correspondances entre les lettres et les sons du langage puis la compréhension et la production de textes. C'est l'option retenue dans la méthode syllabique qui s'attache à la conversion des graphèmes en phonèmes (le décodage) et la méthode phonémique qui privilégie la transcription des phonèmes (l'encodage). La première exclut toute mémorisation de mots entiers et propose aux élèves des phrases constituées exclusivement de graphèmes préalablement étudiés (« 100 % déchiffrables »). La seconde en revanche inclut l'apprentissage de quelques mots entiers fréquents. Dans les deux cas, les phrases à lire sont inventées pour servir la progression de l'étude du code, sans grande cohérence narrative ou ambition littéraire.

Dans les approches intégratives¹, on vise le développement simultané et en interaction de toutes les compétences prescrites par

les programmes scolaires : maîtriser le code alphabétique et lire à haute voix, comprendre et produire des textes, s'approprier la culture de l'écrit (ses œuvres patrimoniales, ses codes linguistiques et ses pratiques sociales). On est attentif à articuler décodage et accès à la compréhension tout en accordant une grande place aux activités d'écriture et de production de textes. On prend appui sur des textes narratifs issus de la littérature de jeunesse, intégrés ou non dans un manuel, et quelques textes documentaires. L'enseignement explicite de la compréhension repose aussi sur des lectures à haute voix réalisées par l'enseignant.

La pratique : l'enseignement de la lecture et de l'écriture au cours préparatoire (CP)

Près de 40 000 enseignants ont pour mission d'apprendre à lire et à écrire aux élèves de cours préparatoire. Les trois-quarts utilisent l'un des manuels en usage dans les écoles françaises, soit une centaine de titres différents. D'autres professeurs des écoles, parmi les plus expérimentés, n'ont pas recours à un manuel : ils adoptent les mêmes démarches que leurs collègues mais ils choisissent leurs supports et proposent à leurs élèves des exercices qu'ils fabriquent eux-mêmes.

Lors des réunions d'information auxquelles les parents d'élèves sont conviés, la plupart des maîtres qualifient leur méthode de « mixte » pour exprimer la diversité des apprentissages qu'ils visent. Au fil de leurs explications, ils mentionnent tour à tour les adjectifs « syllabique » pour évoquer l'enseignement du déchiffrage et « global » pour expliquer que certains mots entiers très fréquents sont mémorisés lettre à lettre. Ils explicitent leurs pratiques en décrivant les tâches qu'ils assignent aux enfants. Celles-ci sont sensiblement les mêmes d'une classe et d'un manuel à l'autre : ce sont leur planification annuelle et leur dosage qui varient (intensité, durée, degré de guidage et progressivité) et qui fondent l'essentiel

des différences entre les pratiques des professeurs.

Selon nos observations² au cours préparatoire, les élèves passent chaque jour, en moyenne, une heure cinquante minutes à apprendre à lire et à écrire :

- 40 % du temps (soit environ 45 minutes par jour) sont alloués à l'étude du code alphabétique, c'est-à-dire aux compétences phonologiques (discrimination des sons du langage), aux correspondances entre graphèmes et phonèmes (entre les lettres et les sons), au décodage ou à l'encodage (notamment la dictée), à la combinatoire (le b.a.-ba) ainsi qu'à la lecture à haute voix ;
- 15 % à la compréhension (16 minutes) ;
- 15 % à la calligraphie et à la copie ;
- 13 % à la production écrite ;
- 6 % à la grammaire ;
- 5 % à la lecture silencieuse ;
- 3 % au vocabulaire (à peine plus de 3 minutes par jour) ;
- 3 % à la mémorisation orthographique de mots entiers.

Ces moyennes cachent de profondes disparités notamment en lecture à haute voix et en écriture. Mais les différences ne sont corrélées ni avec le choix d'un manuel, ni avec celui de la méthode à laquelle les maîtres se réfèrent. Les utilisateurs des manuels syllabiques, par exemple, ne consacrent pas plus de temps à l'étude du code que leurs collègues.

Le consensus entre sciences cognitives et sciences de l'éducation

Les sciences cognitives et les sciences de l'éducation sont d'accord sur l'essentiel. Qu'elle soit intégrative ou modulaire, une démarche pédagogique est efficace si les élèves sont actifs et engagés dans leur travail et si l'enseignant leur permet de développer un sentiment de compétence. Cela suppose que ce dernier sache instaurer un climat de classe confiant et bienveillant. Sur le plan

technique, plusieurs conditions doivent être réunies pour favoriser les apprentissages de tous :

- réaliser un enseignement explicite et systématique des correspondances entre graphèmes et phonèmes, dès le début de l'année de cours préparatoire et sur un tempo soutenu ;
- accorder une place importante aux activités d'écriture : calligraphie, copie, dictée, essais autonomes d'encodage, production d'écrits ;
- rendre les enfants curieux du principe alphabétique, les inciter à raisonner sur les régularités orthographiques et à procéder par analogie entre les mots pour identifier leurs syllabes ou graphèmes communs ;
- demander aux élèves de lire de manière autonome des textes dont la grande majorité des graphèmes ou des mots a été préalablement étudiée en classe (de manière à ce que ces textes soient suffisamment déchiffrables, sans exiger un taux de 100 %) ;
- consacrer un temps suffisant à l'automatisation des mécanismes du déchiffrage et pratiquer régulièrement la lecture à haute voix ;
- pratiquer un enseignement de la compréhension de textes entendus (lus par l'adulte tant que les enfants ne sont pas autonomes) en portant une attention particulière aux acquisitions lexicales ;
- familiariser l'enfant avec l'univers culturel du livre et de l'écrit. ●

1. Goigoux R., *Apprendre à lire à l'école*, Retz, 2006.

2. Enquête *Lire-écrire au cours préparatoire*, <http://ife.ens-lyon.fr/ife/recherche/lire-ecrire> ; cf. le numéro 196 de la *Revue française de pédagogie* (École normale supérieure de Lyon).

3

Écrire

par Michel Fayol

Comme l'a souligné Jean-Pierre Changeux dans le premier chapitre, l'acquisition de la lecture et de l'écriture par l'enfant exploite les capacités épigénétiques du cerveau à construire et mémoriser de nouvelles compétences au cours de son développement. Dans le chapitre précédent, mes collègues ont exposé un bilan concernant l'apprentissage de la lecture et son enseignement. Leur synthèse permet de réaliser l'ampleur des avancées effectuées dans ce domaine. Par contraste, les données relatives à l'apprentissage et à l'enseignement de la production écrite sont beaucoup plus limitées. Elles restent aussi plus vagues quant aux faits mis en évidence et aux éventuelles implications pédagogiques.

Cela vaut dans tous les pays de l'Organisation de Coopération et de Développement Économique (OCDE), et pas seulement en France.

De manière sommaire, on peut résumer la situation actuelle de la façon suivante. D'une part, les recherches portant sur la production du langage ont essentiellement porté sur le langage oral chez l'enfant et chez l'adulte, comme l'attestent les publications. Celles relatives à l'écrit sont récentes et n'abordent qu'un nombre réduit de thèmes, même si les travaux tendent à augmenter depuis deux décennies¹. D'autre part, au plan pédagogique, les activités de production écrite ont, depuis les débuts de la scolarisation obligatoire, occupé une moindre place dans les emplois du temps, en dépit des recommandations des programmes en France². Il s'ensuit que les performances des élèves, notamment à l'école élémentaire, restent de niveau

très modeste, au point que les pouvoirs publics s'en inquiètent au moins en occident, et s'efforcent d'intervenir. Toutefois, les mesures prises sont limitées, les enseignants peu préparés et les curricula faiblement organisés. Enfin, l'évolution récente des nouvelles technologies et les changements qu'elles ont induits dans la formation et les professions obligent à reconsidérer la nature et les fonctions de l'écrit. Dans la plupart des métiers, l'usage de l'ordinateur ou des tablettes entraîne la nécessité pour les individus de maîtriser la lecture et la rédaction de types de textes techniques (rapports, bilans, descriptions de dispositifs, etc.) souvent éloignées des formes textuelles mobilisées traditionnellement au cours de la scolarité. Désormais, il n'est pas rare de rencontrer des adultes qui passent plus de temps à lire et rédiger qu'à communiquer oralement, ce qui exige d'eux une habileté dans le maniement de l'écrit qui était jadis requise des seules professions d'encadrement. L'enseignement de l'écriture sous ses diverses modalités (écriture manuscrite, dactylographie, etc.) et de la rédaction (ou composition écrite) sous ses différentes formes et fonctions relève désormais de la formation de base des futurs adultes³.

Sur quelles données l'apprentissage et l'enseignement de l'écriture et de la rédaction peuvent-ils s'appuyer pour définir des objectifs réalistes adaptés aux différents niveaux de la scolarité, concevoir des programmes, des progressions et des modalités d'évaluation ? Deux sources principales sont disponibles, même si elles peuvent initialement apparaître éloignées de ces préoccupations : d'une part, les données issues de la neuropsychologie ; d'autre part, celles recueillies au cours des études portant sur les performances des adultes. De ces deux courants de recherche ont dérivé la plupart des études portant sur l'apprentissage de l'écrit et de la rédaction. Après en avoir dressé un rapide bilan (section 1), nous serons en mesure d'aborder les questions relatives à l'évolution des performances des élèves et aux possibilités d'en infléchir les trajectoires.

I. Un bilan des données issues de la

neuropsychologie et de l'étude des adultes

1 Les apports de la neuropsychologie

Déterminer les opérations mentales impliquées dans l'écriture et la rédaction soulève les mêmes problèmes qu'en ce qui concerne la lecture. Ces opérations ne sont pas directement observables. Seuls les produits – erreurs, traces écrites, mots et phrases transcrits, textes rédigés – le sont. Pour inférer les activités mentales potentielles, l'une des premières sources accessibles a consisté à étudier les troubles et leur inscription cérébrale souvent approximative. Plus récemment, l'imagerie cérébrale a permis de mieux identifier les centres et les réseaux cérébraux impliqués dans les activités de production.

Les neuropsychologues s'appuient sur des études de cas de patients pour distinguer plusieurs catégories d'agraphies : perte totale ou partielle de la capacité de production de l'écrit⁴. Les agraphies linguistiques associées à une aphasie, dont les symptômes varient selon les atteintes (Broca, Wernicke, aphasie de conduction) ; les agraphies non aphasiques qui portent sur les dimensions spatiale et motrice de l'écriture, ainsi l'agraphie apraxique (ou pure) se caractérise par la difficulté à former les lettres alors même que le patient peut épeler les mots ou les reconstituer à partir de lettres qui lui sont fournies ; les agraphies dysexécutives associées aux atteintes frontales qui se traduisent par des difficultés à planifier, à hiérarchiser les informations, à maintenir la cohérence sans perdre de vue le but de la rédaction et à maintenir l'attention au cours de la production.

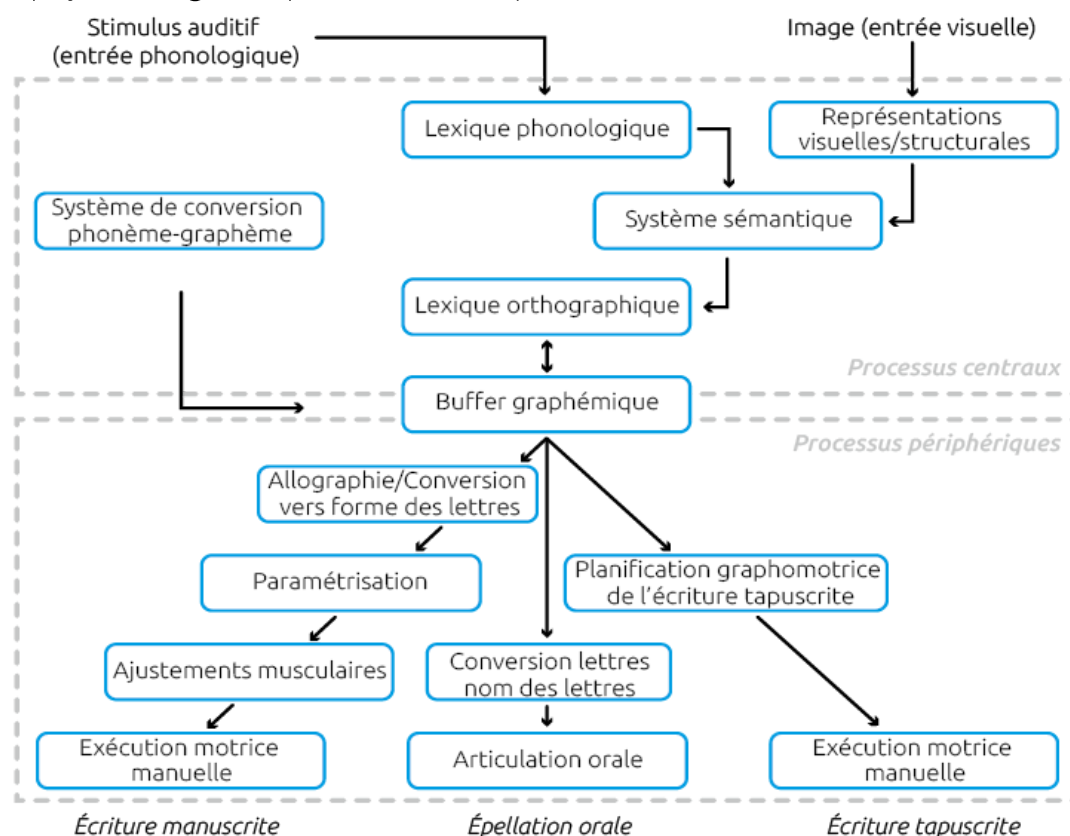
« Plus récemment, l'imagerie cérébrale a permis de mieux identifier les centres et les réseaux cérébraux

impliqués dans les activités de production. »

Au total, trois macro-composantes ont été isolées par les approches de neuropsychologie clinique : celle relative à la dimension visuo-spatiale et à la motricité (agraphies dites périphériques) ; celle qui a trait à la dimension linguistique, notamment associée aux atteintes de l'orthographe (agraphie dite centrale) ; celle qui concerne les activités dites de haut niveau dédiées à la planification, au contrôle et à la régulation de la production de textes. Les données sont compatibles avec une conception modulaire de la production écrite selon laquelle des procédures et des représentations indépendantes les unes des autres sont dissociables et peuvent se trouver sélectivement affectées, par exemple chez un patient dont la lecture et l'écriture sous dictée sont préservées alors que la rédaction est déficitaire.

Figure 1. Processus centraux et périphériques de la production écrite (écriture sous dictée – entrée phonologique, ou dénomination écrite d’images – entrée visuelle)⁵.

Ce modèle détaille la suite des opérations susceptibles de conduire d’une entrée sensorielle auditive (dictée de mot par exemple) ou visuelle (dénomination d’image) à la production d’un mot sous différentes modalités : écriture manuscrite, épellation ou dactylographie. Ces opérations sont inférées des données recueillies par les neuropsychologues à partir d’études de troubles et des travaux de psycholinguistique réalisés auprès d’adultes.



Les études utilisant l’imagerie cérébrale ont confirmé et précisé les données de la neuropsychologie fonctionnelle. Les localisations associées à l’écriture ou à la rédaction ont mis en évidence des activations des aires frontales, pariétales et temporales, en général dans l’hémisphère gauche bien que des régions de l’hémisphère

droit soient également activées. Les modèles dominants du fonctionnement adulte postulent l'existence d'une organisation hiérarchique composée de modules indépendants dans lesquels les troubles s'interprètent comme des manques affectant certaines composantes. Ainsi, les dysgraphies dites centrales affectent la production orthographique et opposent deux voies de production des mots, et donc de troubles : l'une qui retrouve directement en mémoire les formes orthographiques fréquentes ; l'autre qui compose les formes peu, voire pas connues à partir de constituants sous-lexicaux qui sont assemblés en correspondance avec leur forme phonologique⁶. Une étude d'IRMf a analysé les réponses neurales aux manipulations de la fréquence et de la longueur sur des mots fréquents versus rares, longs versus courts (respectivement 8 et 4 lettres). Des réseaux différenciés d'aires cérébrales se révèlent spécifiquement sensibles à la longueur et la fréquence lexicale.

La sortie de la composante centrale aboutit à l'élaboration d'une représentation abstraite d'une suite des lettres stockée dans une mémoire temporaire (dite mémoire de travail, ou buffer graphémique) à capacité limitée et susceptible d'être affectée par des troubles se traduisant par des omissions, substitutions, ajouts de lettres. À partir du buffer, les lettres sont appariées à des programmes moteurs variant selon les modalités de production : épellation, écriture manuscrite, dactylographie. À ce niveau se situent les atteintes dites périphériques. Deux méta-analyses ont permis de préciser les aires cérébrales activées par les processus centraux et périphériques au cours de l'écriture⁷.

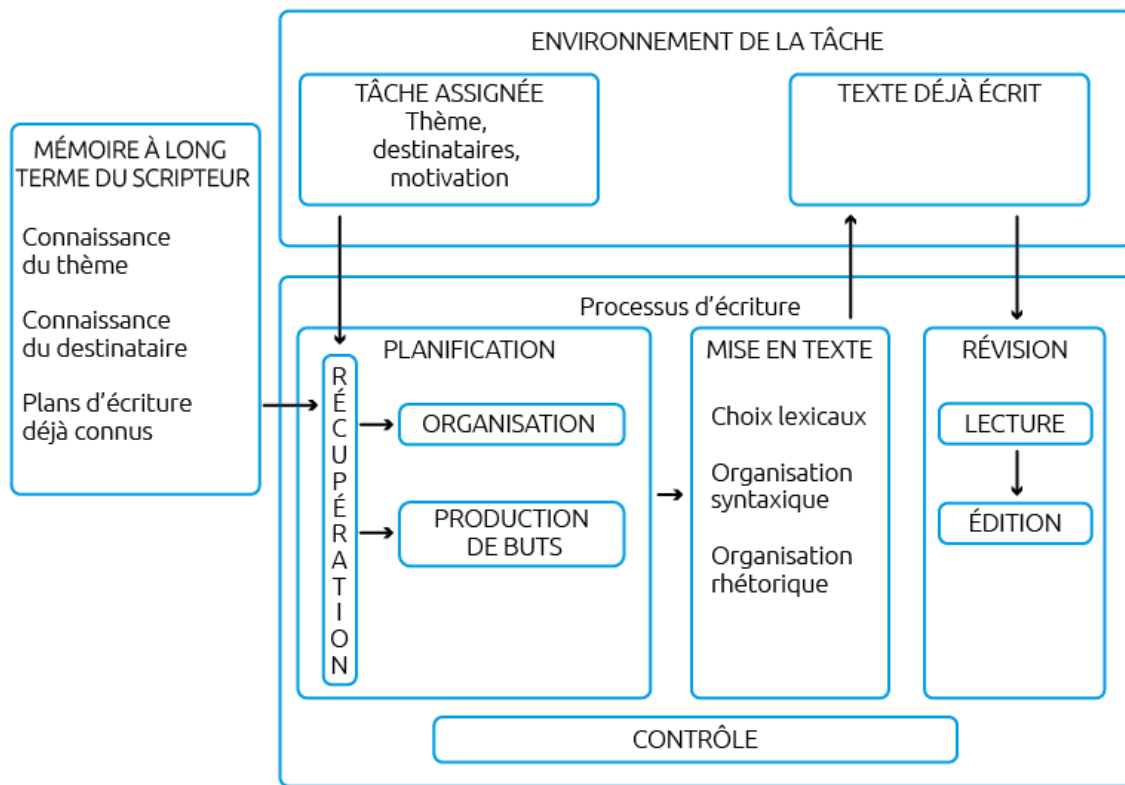
Les études d'imagerie cérébrale dédiées à la mise en évidence des activations associées aux activités de production de phrases ou de textes ont montré que le traitement de l'ordre des mots dans la phrase et celui de l'ordre des événements dans un texte relatant des suites de faits (routiniers ou non) relèvent en grande partie de régions cérébrales différentes malgré un certain recouvrement dans les cortex frontal gauche, pariétal et temporal. Dans une tâche de

détection d'erreurs d'ordonnement, les zones associées aux séquences d'événements sont plus spécifiquement le gyrus frontal médian, l'aire motrice supplémentaire et le gyrus angulaire gauche⁸.

2 La production de textes chez l'adulte

Les recherches en psycholinguistique font toutes référence au modèle de Hayes et Flower (1980) qui présente une conception relativement simple de l'activité de production de textes chez l'adulte expert⁹. Cette activité est envisagée comme une dynamique de résolution de problèmes au cours de laquelle un individu placé à un moment donné dans un environnement (consigne, destinataire, etc.) mobilise ses connaissances en mémoire (du domaine évoqué, des formes langagières, etc.) pour gérer le processus complexe de la production textuelle. Celle-ci implique une recherche et une organisation des idées à exprimer, une mise en texte de celles-ci et une éventuelle révision et reprise du produit, ces trois dimensions étant en continuelle interaction. Il s'agit d'un modèle d'expert fréquemment décrit et qui a été revu à plusieurs reprises, sans jamais intégrer ni les aspects moteurs de la production ni la question orthographique, et en accordant peu de place aux composantes de la mise en texte¹⁰ (cf. figure 2).

Figure 2. Modèle de production de textes élaboré par Hayes et Flower (1980)¹¹.



Pour mieux comprendre les difficultés que soulève la composition écrite, le modèle doit prendre en considération le caractère limité des capacités de mémoire de travail et d'attention¹². De fait, ces limites contraignent à la fois le nombre de dimensions susceptibles d'être intégrées à un moment donné de la production et la manière dont elles sont coordonnées. Une instance ou un mécanisme de contrôle et de régulation est donc nécessaire pour orchestrer le déroulement en temps réel de la rédaction. Les traces de cette orchestration se manifestent à travers la distribution des pauses et les modulations de la vitesse d'écriture : les rédacteurs interrompent régulièrement l'écriture pendant des durées variables dépendant de facteurs bien identifiés – fréquence des mots, longueur des propositions à planifier, etc. Ils ralentissent ou accélèrent leur débit graphique en fonction des items qui suivent et des difficultés

orthographiques internes aux mots (sous-lexicales)¹³. La réduction des difficultés de gestion de la rédaction est possible en recourant à plusieurs stratégies : automatiser certains traitements, par exemple l'écriture ou l'orthographe ; anticiper en préparant la rédaction par une recherche d'idées et une planification des contenus et de leur organisation ; différer la prise en compte de certaines dimensions, par exemple en révisant en fin de paragraphe ou de texte¹⁴. Les recherches utilisant les corrélations ou introduisant des manipulations de conditions expérimentales ont montré l'impact positif de l'automatisation ou du recours aux stratégies allégeant la tâche de rédaction¹⁵.

« Les recherches utilisant les corrélations ou introduisant des manipulations de conditions expérimentales ont montré l'impact positif de l'automatisation ou du recours aux stratégies allégeant la tâche de rédaction. »

Les dimensions relatives à la mise en texte ont été moins explorées. Les recherches se situent dans la lignée des travaux de Levelt et ses collaborateurs¹⁶. Concernant la production écrite de mots, les données de la psycholinguistique reprennent l'idée des deux procédures de production écrite et en attestent la pertinence à partir de données expérimentales. Les modèles correspondants s'appuient également sur la dichotomie des traitements central et périphérique et distinguent entre les niveaux conceptuel/sémantique, orthographique et post-orthographique¹⁷. Relativement à la production de phrases, les auteurs distinguent deux niveaux d'encodage grammatical : le premier traitant les représentations abstraites des mots (les lemmas), l'autre – le niveau positionnel – prenant en compte les formes de surface et les positions des mots dans la proposition¹⁸. La mise en évidence de

l'amorçage des formes syntaxiques par une simple présentation de celles-ci atteste l'existence d'un niveau autonome de traitement de la syntaxe : l'exposition à une forme associée à une illustration, par exemple « il a envoyé à sa sœur des fleurs blanches » induit la production de « le chien a apporté à son maitre le bâton » plutôt que « le chien a apporté le bâton à son maitre » en réponse à la présentation d'une image. Ces faits sont compatibles avec les données de la neuropsychologie¹⁹ et leur articulation avec la production de mots reste à trouver.

Les dimensions motrice et spatiale de la production écrite font partie des domaines les plus étudiés au cours de la dernière décennie. Les données neuropsychologiques et expérimentales s'inscrivent dans le modèle développé par Van Galen, approfondi et repris par Kandel et ses collaborateurs²⁰. Selon ce modèle, la sortie des traitements centraux aboutit à une forme orthographique composée d'une séquence de lettres abstraites, ordonnées et stockées temporairement en mémoire de travail (ou buffer graphémique), par exemple, pour POULE : P1O2U3L4E5. À partir de là vont s'effectuer la sélection des formes des lettres et du style (formes cursives, minuscules ou majuscules, etc.) puis l'activation des programmes moteurs déterminant les traits, le contrôle de leur taille et leurs orientations. Plusieurs résultats importants ont été mis en évidence. Tout d'abord, le tracé des premières lettres d'un mot (le traitement périphérique) commence chez les adultes avant que la forme orthographique de ce mot ne soit complètement déterminée. Ce fonctionnement dit en cascade a pour conséquence que la dimension orthographique influe sur le dérouls temporel de la production, par exemple en induisant des pauses et des changements de débits en fonction de traitements sous-lexicaux : syllabes, morphèmes, régularités²¹. Cette observation soulève la question de la gestion en temps réel des diverses dimensions mobilisées au cours de la rédaction en général, qu'il s'agisse de mots, de phrases ou de textes. Une question particulièrement pertinente

pour interpréter l'évolution des productions écrites.

II. L'évolution des productions à l'école élémentaire

Le modèle adulte de production d'écrits ci-dessus évoqué n'est ni immédiatement transposable à l'élève de l'école élémentaire ni adapté aux questions relatives à l'apprentissage. Il a pourtant servi de base et impulsé de nombreuses recherches sur l'évolution des performances entre 6 et 20 ans et sur les facteurs susceptibles d'influer sur cette évolution. Il présente en effet l'avantage de rendre compte des différences interindividuelles en composition écrite à partir d'un nombre limité d'opérations mentales. Il a aussi permis d'envisager comment changer le mode de rédaction des individus en les amenant à utiliser des stratégies de composition plus sophistiquées. Un premier travail a porté sur des adolescents et abordé deux composantes : la planification et la révision. Puis, les travaux de Virginia Berninger et ses collaborateurs d'une part et les propositions théoriques de Deborah McCutchen d'autre part ont permis d'avancer dans l'étude des facteurs intervenant dans l'évolution²². De rares études en imagerie cérébrale sont venues compléter les approches comportementales, abordant le plus souvent les dimensions sensori-motrices et orthographiques de la production écrite²³. Deux grandes catégories de variables ont été identifiées et leurs effets testés sur les modifications de performances : la nature des stratégies et les effets de leur apprentissage ; l'automatisation ou au moins l'amélioration de l'efficacité de l'écriture, voire du traitement de l'orthographe, et son impact sur la qualité et la longueur des textes élaborés.

1 Le recours aux stratégies de composition écrite

Marlene Scardamalia et Carl Bereiter ont montré que la conduite de la production écrite s'opère initialement chez les plus jeunes ou les plus novices par simple transcription de connaissances récupérées en mémoire au fur et à mesure, selon une stratégie dite de formulation des connaissances (*knowledge telling*)²⁴. Il s'ensuit souvent une juxtaposition d'événements ou d'états peu voire pas reliés entre eux, sans cohérence ni cohésion. Le fait de préparer la rédaction ne modifie pas cette situation, comme si aucune planification n'intervenait, même sur demande ou suggestion. La qualité des textes dépend des connaissances disponibles : elle est d'autant meilleure que les connaissances préalables sont nombreuses et déjà bien organisées en mémoire à long terme²⁵. L'impact de la connaissance du thème et de la structure des textes se manifeste également sur la dynamique de la production, notamment les durées et la localisation des pauses. La plupart des enfants d'âge scolaire ne reviennent pas sur leur production et, lorsqu'ils le font, reprennent les aspects les plus superficiels : ponctuation, orthographe lexicale. De plus, les modifications de la version initiale n'améliorent généralement pas la qualité de celle-ci.

Par contraste, chez les plus âgés ou plus experts, la production s'effectue par remodelage des connaissances en fonction des objectifs poursuivis et du destinataire : distraire, convaincre, etc., suivant une stratégie dite de transformation des connaissances : (*knowledge transforming*). La planification préalable améliore la qualité et la quantité des textes. Des améliorations significatives par le biais de la révision sont attestées en fin de scolarité élémentaire et en début de second degré à condition de mettre en œuvre des dispositifs précis, par exemple en expliquant clairement ce qui est attendu de la révision. Les données issues de l'imagerie cérébrale comparant des bons versus faibles rédacteurs de CM2 mettent en évidence des différences d'activation de certaines aires cérébrales (le gyrus frontal médian, la région temporale gauche et le cervelet gauche) lors de la recherche des idées, avant même le passage à la

rédaction²⁶.

Plutôt que de décrire l'évolution comme s'il s'agissait d'un développement « naturel », Steve Graham et ses collègues ont abordé la production de textes comme un apprentissage pour lequel des interventions explicites sont possibles. Ils ont notamment étudié les effets des enseignements directs, par explicitation des stratégies à mobiliser et mettre en œuvre. Ils ont élaboré et testé un modèle (SRSD : *Self-Regulated Strategy Development*) qui cherche, pour chaque stratégie à : 1) développer les connaissances de base requises pour l'employer ; 2) décrire son intérêt, ses conditions d'emploi et son déroulement ; 3) montrer comment on l'utilise ; 4) aider les élèves à l'utiliser ; 5) aller jusqu'à l'utilisation autonome et de ce fait enseigner des habiletés d'autorégulation. Les méta-analyses conduites mettent en évidence l'efficacité de cette approche au moins à partir de la fin de l'école élémentaire (CM1 ou CM2)²⁷. De fait, le poids de l'autorégulation augmente en fonction de l'expérience et de la maturité et se traduit par le recours croissant à la planification, à la révision mais aussi à l'autorégulation, avec d'importantes différences interindividuelles²⁸. À notre connaissance, aucune étude d'imagerie n'a analysé les modifications d'activations cérébrales associées aux changements stratégiques et au rôle qu'y jouent les fonctions exécutives. Des changements sont probables affectant les aires frontales, comme le suggèrent les données issues des agraphies dysexécutives, mais elles restent à attester²⁹.

Enseigner explicitement l'usage textuel de la ponctuation : une recherche de terrain

La ponctuation, ses marques et leurs usages, donnent rarement lieu à un enseignement explicite et systématique. En conséquence, l'apprentissage s'en effectue implicitement, au gré des rencontres et des remarques des enseignants. L'objectif est ici de décrire comment et avec quels effets un tel apprentissage peut être envisagé par le biais d'études de corpus et par recours à des expériences de production et de lecture. Plusieurs classes de CE2 (129 enfants) ont suivi un enseignement bref et systématique, faisant ressortir la nature et la fonction textuelle de trois marques de ponctuation : alinéa ; point et majuscule ; virgule. Les effets de ces interventions sur les performances des élèves ont été évalués à court (quelques jours) puis à long terme (plusieurs semaines), à travers, d'une part des textes à compléter et d'autre part une production de mémoire, la rédaction de l'histoire du *Petit Chaperon Rouge*.

La ponctuation est un système limité de marques spécifiques de l'écrit au moins partiellement hiérarchisées. Ces marques indiquent le degré et la nature de la relation entre énoncés successifs : l'alinéa est jugé comme une marque plus « forte » que le point-majuscule, lui-même évalué comme plus « fort » que la virgule. Cette hiérarchie est attestée par les productions, les évaluations et les mesures de durées de pauses recueillies auprès de juges adultes enseignants. Comment faire acquérir un tel système aussi subtil ?

Les études portant sur les productions de textes d'élèves allant du CP au CM2 font apparaître qu'une longue évolution est nécessaire pour que se normalisent : d'une part, les formes (par exemple avec la disparition du point ou de la majuscule employés seuls) et d'autre part, le marquage du degré de liaison entre énoncés successifs. Afin d'accélérer l'apprentissage et de prévenir les erreurs ou les manques, un protocole a été conçu avec les enseignants des classes de CE2 et proposé à plus de 120 élèves.

Trois textes simples ont été élaborés et présentés à raison d'un par jour:

le déroulement d'une classe de mer ; la description d'une maison ; les menus d'un séjour bref. Dans chacun des textes, les découpages dans le temps ou l'espace étaient associés à des emplois de marques de ponctuation respectant la hiérarchie des segmentations : les alinéas correspondaient aux changements de jours ou d'étages (dans la maison) ; les points-majuscules aux passages des demi-journées ou aux changements de pièces ; etc. L'attention des enfants était appelée sur ces changements et sur les marques qui s'y trouvaient associées. Les enseignants montraient et commentaient les marques et justifiaient leur position et leur nature. À la suite des observations, explications et justifications, les élèves recevaient le texte (dont la version originale était dissimulée) dépourvu de toute ponctuation et devaient reconstituer celle-ci. Les performances aux reconstitutions de la ponctuation des trois textes s'améliorent significativement et progressivement au fil des séances. Globalement, toutes marques regroupées, les pourcentages de marques correctes et correctement placées passent de 73 % avec le premier texte à 77 % avec le deuxième et 85 % avec le troisième. L'analyse par marque montre que les progrès valent pour les alinéas (61 %, 72 % et 77 %), les points-majuscules (85 %, 89 % et 92 %) et les virgules (65 %, 66 % et 80 %). L'instruction explicite se traduit donc à court terme par un accroissement rapide de la diversité des marques et de leur localisation, et cela en dépit de la brièveté des interventions.

Mettre en évidence un effet à court terme et portant sur des exercices aux exigences limitées ne suffit pas à attester l'impact d'un enseignement, surtout portant sur un domaine aussi complexe. Nous avons demandé aux élèves de rédiger à deux reprises séparées de quatre mois – pré-test en septembre 2013 avant toute intervention et post-test en janvier 2014 après enseignement – le conte du *Petit Chaperon Rouge*. Les deux versions ont fait l'objet de deux évaluations. La première, subjective, demandait aux enseignants impliqués d'évaluer sur quatre échelles de 5 points (pour un total sur 20) les performances de chaque élève au pré- et au post-test. Les textes étaient rendus anonymes, dactylographiés et proposés à des enseignants qui ne connaissaient pas les élèves. La

seconde évaluation, réalisée par deux juges, portait sur 42 critères répartis sur plusieurs dimensions. Les deux évaluations ont été comparées au pré- et au post-test afin de déterminer si les élèves avaient globalement progressé en rédaction.

Les performances évaluées subjectivement et en double aveugle par les enseignants progressent de 7,96 à 9,75. L'évaluation objective (sur 16) à partir de critères précis fait également apparaître un progrès significatif, de 12,21 à 12,94. Des analyses spécifiques ont été conduites, qui visaient à déterminer si et dans quelle mesure les améliorations relevées entre les pré- et les post-tests tenaient aux performances initiales des élèves ou étaient influencées par les enseignements dispensés relativement à la ponctuation. Les résultats montrent que les performances finales en rédaction sont prédites en premier lieu par les performances au pré-test. Les entraînements conduits relativement à la ponctuation ajoutent toutefois une contribution propre, modeste mais significative.

2 L'automatisation des dimensions dites de bas niveau : transcription et traitements orthographiques

La production écrite de textes est une activité complexe mobilisant plusieurs dimensions : les connaissances conceptuelles et expérientielles du domaine évoqué, les savoirs et savoir-faire linguistiques (lexique, syntaxe, formes rhétoriques), les stratégies de production, mais aussi deux composantes passées inaperçues dans les recherches portant sur les adultes : la transcription sous ses différentes modalités (écriture manuscrite, dactylographie) et les traitements orthographiques. Des observations d'abord³⁰ puis des études de corrélations³¹ et enfin des recherches introduisant des interventions et testant leurs effets ont montré que les différences interindividuelles en écriture manuscrite et en orthographe influent sur la longueur et la qualité des productions de textes, et cela surtout chez les élèves les plus jeunes (jusqu'au CE2 ou CM1)³². Au-

délà, à partir du CM2, une influence subsiste mais elle diminue sans disparaître même chez les adultes³³.

Cet impact s'interprète en termes de charge. La capacité de mémoire à court terme et d'attention des jeunes élèves étant limitée et le coût de l'écriture et des traitements orthographiques étant très élevé, les élèves sont en quelque sorte « débordés » par la tâche à accomplir et ne peuvent gérer toutes les dimensions de la rédaction. Il s'ensuit des oublis, des erreurs, et plus généralement une relative pauvreté des productions. Les interventions améliorant l'écriture et, moins clairement, celles qui agissent sur l'orthographe, induisent des progrès de la qualité des textes et de leur longueur³⁴.

Les difficultés d'écriture influent sur les performances en orthographe, et réciproquement, en accord avec un modèle du fonctionnement cognitif dans lequel les différentes composantes partagent une capacité commune d'attention et de mémoire qui se répartit entre elles³⁵. Dès lors, toute captation par une composante trop coûteuse peut amener une chute de performance d'une autre dimension : les erreurs d'accord des verbes et des adjectifs commises par les adultes s'expliquent aisément par ce coût de gestion difficilement prévisible car variant en fonction des phases de rédaction³⁶. Dès lors également, toute amélioration de performance d'une composante, et donc toute automatisation, libère de l'attention et de la mémoire alors disponibles pour gérer les autres dimensions : recherche d'idées, formulation syntaxique, etc.

Les récentes recherches en imagerie cérébrale portant sur la production écrite ont essentiellement abordé les questions relatives à la transcription des lettres et des mots isolés. Plusieurs découvertes importantes ont été réalisées en ce qui concerne les tout débuts de l'écriture puis son automatisation. L'apprentissage de l'écriture s'effectue vraisemblablement comme les autres apprentissages moteurs. Il a lieu alors que le cerveau se développe entre 6 et 10 ans parallèlement à une augmentation continue de la densité de matière blanche, un accroissement de la matière grise

pendant l'enfance moyenne, suivi d'une diminution ultérieure. Les ressources sont mobilisées de manière de plus en plus efficace avec l'âge, ce qui se traduit par une focalisation croissante des zones cruciales pour la réalisation des tâches et une diminution des régions non corrélées avec celles-ci. Le système devient ainsi plus spécialisé et mieux organisé³⁷. La construction et la consolidation des programmes moteurs en mémoire à long terme sont un processus long et exigeant, comme l'illustre l'évolution des productions écrites d'enfants entre 5 et 9 ans : la vitesse et la lisibilité augmentent³⁸.

« Les difficultés d'écriture influent sur les performances en orthographe, et réciproquement, en accord avec un modèle du fonctionnement cognitif dans lequel les différentes composantes partagent une capacité commune d'attention et de mémoire qui se répartit entre elles. »

L'apprentissage de l'écriture n'est pas une tâche simple : les enfants doivent mobiliser leurs capacités motrices fines encore immatures pour effectuer une série de traits correspondant à chaque caractère. Ils doivent aussi situer chaque trait par rapport aux autres, noter les recouvrements et les orientations, qui sont cruciales pour la reconnaissance des lettres (*b versus d versus p versus q*). Dans le même temps, ils doivent découvrir que des caractéristiques telles que la taille, le format, la pente (etc.) n'ont pas d'importance pour l'identité des lettres. L'identification des seuls attributs pertinents pour la reconnaissance des lettres pose donc problème. Quelles sont les conditions susceptibles de faciliter ces apprentissages ? Utiliser les lettres sur un clavier d'ordinateur est-il plus favorable que la copie des mêmes lettres, ou que le fait de repasser sur un tracé déjà disponible ? Observer autrui en train d'écrire constitue-t-il une aide ? L'étude des seules performances ne permet pas toujours de

répondre à ces questions. Aussi les études portant sur l'activation des aires cérébrales ont-elles apporté des informations précieuses. Karin Harman James et ses collaborateurs ont par exemple demandé à des enfants de 4-5 ans ne sachant pas lire de traiter par la dactylographie, le dessin et le tracé (en repassant sur des pointillés) de lettres et de formes géométriques (constituant une condition contrôle). Ils ont ensuite testé la reconnaissance de ces mêmes lettres et formes mais aussi d'autres lettres et formes non entraînées. Ils ont également enregistré les activations cérébrales dans le cerveau entier et dans certaines aires privilégiées. Ils ont ainsi identifié des différences d'activation entre lettres et formes, entraînées ou non ; les lettres non entraînées avaient le même type d'activation que les formes entraînées ou non. Ils ont aussi relevé des différences dans plusieurs aires entre les lettres et les formes entraînées en dessin ou en tracé des lettres ou des formes. Plusieurs résultats ont été rapportés : la dactylographie ne recrute aucune des régions activées par les productions ; la perception des lettres active les aires motrices correspondantes mais seulement si les lettres ont été produites (et non simplement repassées sur des pointillés) ; l'aire cérébrale spécialisée dans la reconnaissance des lettres (la *Visual Word Form Area*) se trouve activée par la seule production manuscrite des lettres, mais ni par la seule dénomination des lettres, ni par leur tracé simple (en repassant sur des pointillés) ni par l'observation d'autrui effectuant l'écriture ; le fait que l'élève produise des formes successives légèrement différentes serait plus favorable à l'apprentissage que de repasser sur des formes toutes prêtes ; le degré de latéralité augmente entre 3 et 7 ans et les activations deviennent plus focalisées. Karin Harman James et ses collaborateurs en déduisent qu'il semble exister une voie de l'écriture conduisant à la lecture (*a writing route to reading*)³⁹ : l'écriture apparaît essentielle du fait qu'elle relie l'aire fusiforme gauche avec les régions sensorielles du toucher et avec celles de la production motrice. Au total, l'enseignement de l'écriture

manuscrite semble nécessaire à l'apprentissage de la lecture et de l'écriture des lettres et des mots. L'orthographe, elle, doit être enseignée explicitement pour que soient stockées les dimensions phonologique, orthographique, morphologique⁴⁰ ; toutefois, les données disponibles valent pour l'anglais. Les difficultés propres au français, notamment l'existence de nombreuses marques sans correspondances phonologiques (le -d de foulard, les -s du pluriel des noms et des adjectifs, les -nt du pluriel verbal) posent des problèmes spécifiques pour lesquels des études d'imagerie seraient utiles⁴¹.

Enseigner et apprendre les accords des noms, des adjectifs et des verbes

Dans la quasi totalité des systèmes orthographiques, les marques (morphologiques) des accords en nombre sont audibles, même si la correspondance entre phonèmes et graphèmes peut être complexe. Ainsi, en anglais, le -s du pluriel peut être prononcé /s/ ou /z/ ou /iz/ ; ce qui entraîne des difficultés d'apprentissage. En français, la situation est encore plus critique, puisque les enfants découvrent seulement au cours de l'apprentissage de l'écrit qu'il existe des marques du nombre et que celles-ci n'ont le plus souvent pas de correspondants phonologiques : par exemple, dans « la poule picore / les poules picorent », seuls les déterminants indiquent si un mot est pluriel, singulier, féminin ou masculin. Les noms, adjectifs et verbes ne portent que rarement de marques audibles de nombre (et de genre). Il s'ensuit la nécessaire mise en place d'un enseignement explicite reposant sur la présentation de règles assorties de la réalisation d'exercices divers.

Les travaux conduits sur l'apprentissage des accords chez les élèves du CP jusqu'au collège ont mis en évidence une série de faits. Dans un premier temps, en début de CP et en CE1, les enfants ne marquent le plus souvent le pluriel ni pour les noms ni pour les adjectifs ni pour les verbes. Ils écrivent les mots sous leur forme neutre : le singulier pour le nom, la troisième personne du singulier pour le verbe. Pourtant, très rapidement, la plupart d'entre eux connaissent la marque du pluriel nominal et savent l'interpréter. Ils sont même en mesure de formuler plus ou moins adroitement la règle "si pluriel alors ajouter -s". En somme, ils disposent d'une connaissance mais ils ne la mettent pas facilement et spontanément en œuvre. Vraisemblablement, à cette période de la scolarité, l'essentiel de leur attention est capté par la détermination de l'orthographe par la transcription du mot. Ils sont néanmoins souvent en mesure de détecter les erreurs d'accord nominal et de les corriger alors même qu'ils les commettent eux-mêmes.

Dans une deuxième phase, en CE1 et CE2, les enfants utilisent le -s (pluriel nominal) à la fois correctement pour les noms, parfois pour les adjectifs, et erronément en généralisant la flexion -s aux verbes. Ils commettent des erreurs de substitution, de -s à -nt. Le pluriel nominal, parce qu'il est sémantiquement motivé, est plus précocement mis en œuvre que le pluriel des adjectifs (qui mobilise la même marque -s) et que le pluriel des verbes (-nt). Dans une troisième période, en CE2 et CM1, les enfants utilisent souvent la flexion -nt pour les verbes et ils tendent à en généraliser l'emploi à quelques adjectifs et à quelques noms, écrivant « les ferment » au lieu de « les fermes », notamment lorsque ces noms ou ces adjectifs ont un homophone verbal. Tout se passe comme si le pluriel notionnel activait des flexions concurrentes (-s/-nt), induisant des interférences. Les interférences entre ces marques sont plus fortes pour les noms et les verbes ayant des homophones respectivement verbaux ou nominaux (par exemple timbre/fouille, etc.). Ces effets d'interférence ne disparaissent pas chez l'adulte. Lorsque celui ou celle-ci doit transcrire des phrases alors même qu'il ou elle rédige un texte, la charge en mémoire et en attention empêche parfois la focalisation sur les accords et induit parfois l'occurrence d'erreurs.

Reste la question de l'apprentissage. Il est possible que la pratique de l'écrit entraîne des apprentissages implicites, bien que la question de l'existence de tels apprentissages portant sur des marques discontinues (lesssnt) n'ait pas encore reçu de réponse assurée. Les données issues des recherches confortent la position selon laquelle une instruction explicite est nécessaire à l'apprentissage des flexions et de leur usage. Pour tester son efficacité, nous avons réalisé à Dijon une quasi-expérience dans 18 classes de CP, CE1 et CE2 : 12 classes ont suivi un enseignement explicite direct pendant plusieurs semaines, les 6 autres constituant un groupe contrôle. Tous les élèves ont complété un pré- et un post-test incluant des accords de noms, adjectifs et verbes insérés dans des phrases de complexité différente. Les résultats ont mis en évidence que, malgré sa brièveté, l'instruction dispensée entraînait une amélioration rapide et pertinente des performances. Dès le CP, les

erreurs d'accord portant sur les noms avaient presque disparu, celles affectant les adjectifs avaient beaucoup diminué. Ces dernières présentaient toutefois en CE2 une évolution complexe facilement explicable en termes de généralisation : pour une partie des adjectifs comme « fixe », « vide », la flexion -nt était employée plutôt que -s. Enfin, l'amélioration des accords des verbes, bien que moindre, était également observée dès le CP, et surtout en CE1. En somme, l'enseignement explicite assorti d'exercices et d'évaluations immédiates semble en mesure d'induire à court terme une amélioration significative des performances d'accord. Une reprise plus récente de cette recherche, à Riom en France, et sur des classes de CE et CM a montré que les apprentissages réalisés en cours d'année (entre janvier et Pâques) aboutissaient à des performances stables, sans diminution à la rentrée de septembre.

Il convient de noter que, d'une part, ces recherches ont porté sur des interventions brèves (6 semaines au plus), et que leurs effets n'en sont que plus remarquables, y compris à moyen terme, et que, d'autre part, des évaluations manquent quant à l'impact de ces apprentissages sur les performances des élèves au cours d'activités plus complexes, telle la rédaction de textes. Des travaux complémentaires devront donc être conduits.

3 Enseigner pour faire apprendre l'écriture et la rédaction

La composition écrite est une activité complexe mobilisant plusieurs composantes dont les apprentissages suivent des agendas différents et dont les fonctionnements doivent être coordonnés pour parvenir à des productions remplissant l'exigence fondamentale de la communication : être compréhensibles par autrui. Il n'est pas envisageable d'obtenir d'emblée des jeunes élèves qu'ils atteignent un tel objectif, par exemple en rédigeant un récit ou une description d'environ une page et présentant les caractères attendus de

cohérence et de cohésion. Il convient donc de rechercher des voies d'intervention réalistes et efficaces à terme, par exemple en fin de scolarité élémentaire ou en classe de sixième. Pour cela, les données recueillies par les recherches neuropsychologiques et cognitives et, plus récemment, par les études en imagerie, ouvrent des perspectives qui doivent être combinées aux apports de la linguistique et aux recherches didactiques⁴².

« Une possibilité serait de chercher comment, dès l'école maternelle, des situations particulières pourraient permettre aux enfants de découvrir précocement les conditions et la gestion des productions monologiques. »

En premier lieu, la production écrite se déroule dans des conditions pragmatiques différentes de celles auxquelles les jeunes enfants sont habitués et ont appris à communiquer avec leurs parents et leurs pairs. La pratique de l'écrit est monologique : aucun geste, aucune mimique, aucune remarque ne permet de savoir immédiatement, comme à l'oral, si le message produit est pertinent du point de vue du contenu et adapté quant à sa forme.

Une possibilité serait de chercher comment, dès l'école maternelle, des situations particulières pourraient permettre aux enfants de découvrir précocement les conditions et la gestion des productions monologiques. L'utilisation du téléphone ou celle des enregistrements sans accès visuel pourraient constituer des situations exploitables. Elles permettraient notamment de faire découvrir le fonctionnement de marques linguistiques associées aux productions « distancées » – usage des déterminants, des références nominales et pronominales, des formes verbales, etc.⁴³ – dont on sait qu'elles posent longtemps problème et dont la vie courante ne fournit guère d'occasions d'en saisir le fonctionnement. En général,

les élèves ne les découvrent qu'à travers la lecture alors qu'il serait sans doute possible d'en avancer la découverte et la fréquentation. En deuxième lieu, deux composantes nouvelles pour les élèves de 6 ans contraignent l'apprentissage de l'écrit : la production des lettres et celle des formes orthographiques des mots. Le plus souvent, les enfants ne découvrent ces deux dimensions de l'écrit qu'à travers l'apprentissage de la lecture, lequel domine les approches de l'écrit⁴⁴. Or, les données issues de recherches cognitives et en neurosciences suggèrent que la pratique de l'écriture manuscrite contribue à la fois à l'apprentissage des lettres en production mais aussi en lecture. Les pratiques d'orthographe inventée mises en place à l'école maternelle ont d'ailleurs des effets positifs sur l'apprentissage ultérieur de la lecture⁴⁵. Ultérieurement, l'écriture des mots influe positivement sur la lecture comme sur l'apprentissage des formes orthographiques⁴⁶. En d'autres termes la pratique de l'écriture manuscrite améliore comme prévu la précision et la vitesse de transcription des lettres et des mots, mais elle influe aussi sur la reconnaissance de ces mêmes unités.

En troisième lieu, pendant les trois ou quatre premières années de scolarité élémentaire, les difficultés et le coût en mémoire et en attention de la réalisation graphique et du traitement orthographique gênent la composition de textes, entraînant une moindre qualité et une longueur restreinte des productions. Il serait tentant d'en déduire que les activités de rédaction devraient être soit différées, soit réduites à des productions très simples (des phrases), soit abandonnées. Les données suggèrent que mieux vaut faire rédiger les élèves en réduisant initialement (en CE1) beaucoup puis de moins en moins le nombre de composantes impliquées que les élèves doivent gérer par eux-mêmes. Par exemple, la préparation orale permet d'effectuer une recherche des idées et de leur possible organisation, éventuellement du lexique, de sorte qu'il leur reste à traiter la seule mise en texte, avec toutes les difficultés qu'elle soulève chez les plus jeunes. D'autres aménagements sont

envisageables : l'objectif est que les élèves parviennent seuls à rédiger un texte cohérent et formellement acceptable en fin de scolarité primaire. Antérieurement, il appartient aux enseignant(e)s d'organiser les démarches pour rendre peu à peu autonome la production des textes en contrôlant, en fonction des caractéristiques des élèves, les composantes qui leur restent à gérer, les autres étant travaillées collectivement ou en petits groupes. En ce sens, les stratégies de production, qui seront plus tard mobilisées par les élèves dans le second degré, restent sous le contrôle des enseignant(e)s et donnent lieu à des mises en œuvre qui servent à la fois d'initiation et d'illustrations.

« La pratique de l'écriture manuscrite améliore comme prévu la précision et la vitesse de transcription des lettres et des mots, mais elle influe aussi sur la reconnaissance de ces mêmes unités. »

En quatrième lieu, les modèles de production jusqu'alors élaborés et testés ont privilégié deux grandes dimensions : d'une part, la gestion des planification et révision avec les stratégies qui leur sont associées ; d'autre part, les traitements dits de bas niveau – écriture et orthographe – pour lesquels les entraînements et la recherche d'automatisation ont montré leur efficacité relative. Par contraste, les questions relatives à la dimension textuelle ont été peu étudiées⁴⁷ : enchaînement des phrases, organisation des parties du texte, modes de référence, ponctuation, emploi des formes verbales⁴⁸. Or, les données recueillies mettent en évidence que ces dimensions sont relativement indépendantes les unes des autres et qu'elles doivent donner lieu à un apprentissage⁴⁹. Celui-ci s'effectue le plus souvent de manière implicite, au gré des lectures. Pourtant, comme pour l'acquisition de l'orthographe lexicale et grammaticale, celui-ci ne suffit pas. Un enseignement explicite est nécessaire, qui établit une progression et des exercices pour assurer que les savoirs

et savoir-faire correspondants sont acquis et mis en œuvre au cours des compositions écrites⁵⁰. Ce travail reste à réaliser.

Enfin, l'une des difficultés majeures de l'enseignement de la composition écrite réside dans l'articulation entre des apprentissages limités à des performances précises – accord en genre et en nombre des adjectifs ; concordances des temps ; etc. et la production de textes. Cette question n'est pas nouvelle : elle a été abordée en détail par le Plan Rouchette (1969). Comment procéder pour que l'activité de composition écrite existe et soit pratiquée et que, dans le même temps, des enseignements spécifiques puissent être mis en place et conduire à des améliorations de performances en rédaction. Aucune réponse claire n'est disponible, qui reposerait sur des données empiriques recueillies dans des conditions contrôlées⁵¹. Tout au plus peut-on considérer que les deux perspectives sont complémentaires et doivent être menées de front. Tout comme doivent l'être les activités de lecture-compréhension et de production de textes.

L'articulation des deux approches reste de l'ordre de l'expertise des enseignant(e)s : peut-il en être autrement ?

Conclusion

Les évolutions de notre société conduisent à accorder à l'écriture et à la rédaction une importance accrue. L'école ne peut l'ignorer et se doit d'adapter les apprentissages à ces nouvelles situations. Les données issues de la recherche permettent de déterminer quelles sont les principales difficultés auxquelles sont confrontés les élèves de l'école élémentaire. Elles offrent également des pistes d'interventions dont l'efficacité a été empiriquement testée, au moins pour certaines d'entre elles. Il reste néanmoins beaucoup à faire pour élaborer un (ou des) curriculum, évaluer sa faisabilité et tester son efficacité à court et moyen termes. Les contributions conjointes des recherches cognitives, linguistiques et didactiques

permettraient d'avancer dans cette voie, en mettant en place des recherches empiriques auxquelles seraient associés de nombreux enseignants.

Les Essentiels

- La dimension de production de l'écrit a longtemps été négligée ; elle joue désormais un rôle important à la fois à l'école et dans la vie professionnelle.
- La compréhension des mécanismes de production des écrits s'enracine dans les travaux de neuropsychologie sur les lésions, complétés par les recherches expérimentales, et plus récemment par les données issues de l'imagerie cérébrale.
- Plusieurs dimensions relativement indépendantes interviennent dans la production et son apprentissage, elles doivent être coordonnées : le graphisme, l'orthographe, le langage (lexique, syntaxe, textualité), les connaissances relatives aux domaines évoqués ; leur contribution est plus ou moins couteuse en attention et mémoire.
- Pour faire face aux contraintes de la production, diverses possibilités existent : automatiser certaines composantes (le graphisme, la connaissance de l'orthographe lexicale) ; anticiper les connaissances à évoquer et leur organisation (faire un plan) ; revenir sur ce qui a déjà été produit (réviser).
- Établir des relations entre lecture-compréhension et écriture-rédaction.

1. Fayol M., *L'acquisition de l'écrit*, PUF, 2017 ; Berninger V.W., *Past, present, and future contributions of cognitive writing research to cognitive psychology*. Psychology Press, 2012 ; MacArthur C.A., Graham S., Fitzgerald J., *Handbook of writing research* (2nd edition). The Guilford Press, 2016.

2. Chervel A., *Histoire de l'enseignement du français du XVII^e au XX^e siècle*, Retz, 2008.

3. Graham S., Gillepsie A., McKeown D. (2013). Writing: importance, development, and instruction. *Reading and Writing*, 26(1), 1-15 ; Graham S., McKeown D., Kihare S., Harris K.R. (2012). A meta- analysis of writing instruction for students in the elementary grades. *Journal of Educational Psychology*, 104, 879-896 ; CNESCO (2018, 14-15 mars). *Conférence de consensus « Écrire et rédiger »*. Paris.

4. Ardila A. (2012). Neuropsychology of writing. In Grigorenko E.L., Mambrino E., Preiss D.D. (2012), *Writing. A mosaic*

of new perspectives, Psychology Press, p. 311-323 ; Ardila A., Surloff C. (2006). Dysexecutive agraphia: A major executive dysfunction sign. *International Journal of Neurosciences*, 116, 653-663 ; Planton S., Kandel S. (2016). Substrats cérébraux de la production du langage écrit. In Pinto S., Sato M. (Eds.), *Traité de neurolinguistique*, De Boeck, p. 183-196.

5. Issu de Planton et Kandel (2016), *idib*.

6. McCloskey M., Rapp B. (2017). Developmental dysgraphia: An overview and framework for research. *Cognitive Neuropsychology*, 34 (3/4), 65-82 ; Rapp B., Dufor O. (2011). The neurotopography of written word production: An fMRI investigation of the distribution of sensitivity to length and frequency. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(12), 4067-4081.

7. Planton S., Jucla M., Roux F-E., Demonet J-F. (2013). The "handwriting brain": A meta-analysis of neuroimaging studies of motor versus orthographic processes. *Cortex*, 49, 2772-2787 ; Purcell J., Turkel Taub P.E., Eden G.F., Rapp B. (2011). Examining the central and peripheral processes of written word production through meta-analysis. *Frontiers in Psychology*, 2, 239.

8. Crozier S., Sirigu A., Lehéricy S., van de Moortele P-F., Pillon B., Grafman J., Agid Y., Dubois B., LeBihan D. (1999). Distinct prefrontal activations in processing sequence at the sentence and script level: An fMRI study. *Neuropsychologia*, 37, 1469-1476 ; Zalla T., Sirigu A., Pillon B., Dubois B., Agid Y., Grafman J. (2000). How patients with Parkinson's disease retrieve and manage cognitive event knowledge. *Cortex*, 36, 163-179.

9. Hayes J. R., Flower L. (1980). Identifying the organization of writing processes. In Gregg L. W., Steinberg E. R. (Eds.), *Cognitive processes in writing: An interdisciplinary approach*. Lawrence Erlbaum, p. 3-30.

10. Pour des synthèses, voir : Alamargot D., Chanquoy L. (2002). Les modèles de rédaction de textes. In M. Fayol (Ed.), *Production du langage. Traité des Sciences cognitives*. Hermes & Lavoisier, p. 45-65 ; Olive T. (2014). Toward a parallel and cascading model of the writing system. *Journal of Writing Research*, 6(2), 173-194.

11. In Garcia-Debanco C., Fayol M. (2002). Des modèles psycholinguistiques du processus rédactionnel pour une didactique de la production écrite. *Repères*, 26-27, 293-315.

12. Kellogg R. T. (1996). A model of working memory in writing. In Levy C. M., Ransdell S. (Eds.), *The science of writing: Theories, methods, individual differences, and applications*, Routledge, 75-71 ; Mahwah NJ: Erlbaum. McCutchen D. (1996). A capacity theory of writing: Working memory in composition. *Educational Psychology Review*, 8, 299-325.

13. Chanquoy L., Foulin J.N., Fayol M. (1990). The temporal management of short text writing by children and adults. *European Bulletin of Cognitive Psychology*, 10, 513-540 ; Fayol M., Lété B. (2012). Contributions of online studies to understanding translation from ideas to written text. In Fayol M., Alamargot D., Berninger V. (Eds.), *Translation of thoughts to written text while composing: Advancing theory, knowledge, methods, and applications*, Psychology Press, p. 289-313 ; Maggio S., Lété B., Chenu F., Jisa H., Fayol M. (2012). Tracking the mind during writing: Immediacy, delayed, and anticipatory effects on pauses and writing rate. *Reading and Writing*, 25, 2131-2151.

14. Fayol M. (1999). From on-line management problems to strategies in written composition. In Torrance M., Jeffery G. (Ed.), *The cognitive demands of writing*, Amsterdam University Press.

15. Limpo T., Alves R.A. (2013). Teaching planning or sentence-combining strategies: Effective SRSD interventions at different levels of written composition. *Contemporary Educational Psychology*, 38, 328- 341.

16. Levelt W.J.M., *Speaking: From intention to articulation*, The MIT Press, 1989 ; Levelt W.J.M. (1999). Models of word production. *Trends in Cognitive Sciences*, 3, 223-232.

17. Bonin P. Fayol M. (2000). Writing words from pictures: what representations are activated and when?. *Memory & Cognition*, 28, 677-689 ; Pour une revue : Bonin P., *Production verbale de mots*, De Boeck, 2003.

18. Leuwers C. (2002). La production de phrases. In M. Fayol (Ed.), *Production du langage. Traité des Sciences cognitives*, Hermes & Lavoisier, p. 107- 130.

19. Berndt R.S. (2001). Sentence production. In B. Rapp (Ed.), *The handbook of cognitive neuropsychology*, Psychology Press, p. 375-396.

20. Kandel S., Hérault L., Grosjacques G., Lambert E., Fayol M. (2009). Orthographic vs. phonologic syllables in handwriting production. *Cognition*, 110, 440-444 ; Van Galen G. P. (1991). Handwriting: Issues for a psychomotor theory. *Human Movement Science*, 10, 165-191.

21. Delattre M., Bonin P., Barry, C. (2006). Written spelling to dictation: Sound-to-spelling regularity affects both writing latencies and durations. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 32, 1330-1340 ; Lambert E., Kandel S., Fayol M., Esperet E. (2008). The effect of the number of syllables on handwriting production. *Reading and Writing*, 21, 859-883 ; Maggio S., Lété B., Chenu F., Jisa H., Fayol M. (2012). Tracking the mind during writing: Immediacy, delayed, and anticipatory effects on pauses and writing rate. *Reading and Writing*, 25, 2131-2151.

22. Berninger V.W., Swanson H.L. (1994). Modifying Hayes and Flower's model of skilled writing to explain beginning and developing writing. In E. Butterfield (Ed.), *Children's writing: Toward a process theory of the development of skilled writing*, J.A.I. Press, p. 57-81 ; McCutchen D. (1996). A capacity theory of writing: Working memory in composition. *Educational Psychology Review*, 8, 299-324.

23. Longcamp M., Velay J-L., Berninger V.W., Richard T. (2016). Neuroanatomy of handwriting and related reading and writing skills in adults and children with and without learning disabilities: French-american connections. *Pratiques*, 171-172 ; Richards T.L., Berninger V.W., Fayol M. (2012). The writing brain of normal child writers and children with writing disabilities. Generating ideas and transcribing them through the orthographic loop. In Grigorenko E.L., Mambrino E., Preiss D.D. (Eds.), *Writing. A mosaic of new perspectives*, Psychology Press, p. 85-105.

24. Scardamalia M., Bereiter C. (1987). Knowledge telling and knowledge transforming in written composition. In Rosenberg S. (Ed.), *Reading, writing, and language learning*, Cambridge University Press.
25. Fayol M. (2000). Comprendre et produire des textes écrits. L'exemple du récit. In Kail M., Fayol M. (Eds.), *L'acquisition du langage*, PUF, vol. 2, p. 183-213 ; Fitzegald J. Teasley A.B. (1986). Effects of instruction in narrative structure on children's writing. *Journal of Educational Psychology*, 78, 424-432.
26. *Ibid.*, Richards et al., 2012.
27. Graham S. (2006). Strategy instruction and the teaching of writing. In MacArthur C.A., Graham S., Fitzgerald J. (Eds.), *Handbook of writing research*, The Guilford Press, p. 187-207 ; Limpo T., Alves R.A. (2013a). Teaching planning or sentence-combining strategies: Effective SRSD interventions at different levels of written composition. *Contemporary Educational Psychology*, 38, 328-341 ; Limpo T., Alves R.A. (2013b). Modeling writing development: Contribution of transcription and self-regulation to Portuguese students' text generation quality. *Journal of Educational Psychology*, 105(2), 401-413.
28. Nozari N., Novick J. (2017). Monitoring and control in language production. *Current Directions in Psychological Science*, 26 (5), 403-410.
29. Hooper S.R., Swartz C.W., Wakely M.B., De Kruif R.E.L., Montgomery J.W. (2002). Executive functions in elementary school children with and without problems in written expression. *Journal of Learning Disabilities*, 35 (1), 57-68 ; Ardila A., Surloff C. (2006). Dysexecutive agraphia: A major executive dysfunction sign. *International Journal of Neurosciences*, 116, 653-663.
30. Simon J., *La langue écrite de l'enfant*, PUF, 1973 ; Fayol M. (1996). La production du langage écrit. In David J., Plane S. (Eds.), *L'apprentissage de l'écriture de l'école au collège*, PUF, p. 9-36.
31. Graham S., Berninger V.W., Abbott R.D., Abbott S.P., Whitaker D. (1997). Role of mechanics in composing of elementary school students: A new methodological approach. *Journal of Educational Psychology*, 89, 170-182.
32. Berninger V.W., Vaughan K.B., Abbott R.D., Abbott S.P., Rogan L.W., Brooks A., Reed E., Graham S. (1997). Treatment of handwriting problems in beginning writers: Transfer from handwriting to composition. *Journal of Educational Psychology*, 89, 652-666 ; Jones D., Christensen C.A. (1999). Relationship between automaticity in handwriting and students' ability to generate written text. *Journal of Educational Psychology*, 91, 44-49 ; *Ibid.*, Limpo et al., 2013.
33. Berninger V.W. (1999). Coordinating transcription and text generation in working memory during composing: Automatic and constructive processes. *Learning Disabilities Quarterly*, 22, 99-112 ; Bourdin B., Fayol M. (1994). Is written language production really more difficult than oral language production?. *International Journal of Psychology*, 29, 591-620 ; Bourdin B., Fayol M. (2002). Even in adults, written production is still more costly than oral production. *International Journal of Psychology*, 37, 219-227.
34. Graham S., McKeown D., Kihare S., Harris K.R. (2012). A meta-analysis of writing instruction for students in the elementary grades. *Journal of Educational Psychology*, 104, 879-896.
35. Fayol M., Miret A. (2005). Écrire, orthographier et rédiger des textes. *Psychologie française*, 50, 391-402 ; Kandel S., Perret C. (2015). How does the interaction between spelling and motor processes build up during writing acquisition?. *Cognition*, 136, 325-336.
36. Fayol M., Jaffré J.-P., *Orthographe*, PUF, 2008 ; Fayol M., Jaffré J.-P., *L'orthographe*, PUF, 2014 ; Fayol M., Jaffré J.-P. (2014). Orthography and literacy in French. In Joshi R.M., Aaron P.G. (Eds.), *Handbook of orthography and literacy*, Routledge.
37. Palmis S., Danna J., Velay J.-L., Longcamp M. (2017). Motor control of handwriting in the developing brain: A review. *Cognitive Neuropsychology*, 34 (3-4), 187-204.
38. Zesiger P., *Écrire*, PUF, 1995 ; Vinter A., Chartrel E. (2008). Visual and proprioceptive recognition of cursive letters in young children. *Acta Psychologica*, 129, 147-156.
39. James K.H. (2010). Sensory-motor experience leads to changes in visual processing in the developing brain. *Developmental Science*, 13(2), 279-288 ; James K.H. (2017). The importance of handwriting experience on the development of the literate brain. *Current Directions in Psychological Science*, 26(6), 502-506 ; James K.H., Engelhardt L. (2012). The effects of handwriting experience on functional brain development in pre-literate children. *Trends in Neuroscience and Education*, 1(1), 32-42.
40. James K.H., Jao R.J., Berninger V. (2016). The development of multileveled writing systems of the brain. In MacArthur C.A., Graham S., Fitzgerald J. (Eds.), *Handbook of writing research* (2nd ed.), The Guilford Press, p. 116-129 ; Graham S., Santangelo T. (2014). Does spelling instruction make students better spellers, readers, and writers? A meta-analytic review. *Reading and Writing*, 27(1), 1703-1743 ; Graham S. (2000). Should the natural learning approach replace traditional spelling instruction. *Journal of Educational Psychology*, 92, 235-247.
41. Fayol M., Jaffré J.-P., *L'orthographe*, PUF, 2014.
42. Alamargot D., Fayol M. (2009). Modelling the development of written composition. In Beard R., Myhill D., Nystrand M., Riley J. (Eds.), *Handbook of writing development*, Sage, p. 23-47 ; Fayol M., Foulin J.-N., Maggio S., Lété B. (2011). Towards a dynamic approach of how children and adults manage text production. In Grigorenko E., Mambrino E., Preiss D.D. (Eds.), *Handbook of writing: a mosaic of perspectives*, Psychology Press.
43. Hickmann M. (2000). Le développement de l'organisation discursive. In Kail M., Fayol M. (Eds.), *L'acquisition du langage. Le langage en développement au-delà de trois ans*, PUF, p. 82-115.
44. Goigoux R. (dir.), *L'influence des pratiques de la lecture et de l'écriture sur la qualité des apprentissages au cours*

préparatoire, 2016. Rapport de recherche en ligne : <http://ife.ens-lyon.fr/ife/recherche/lire-ecrire> ; Brissaud C., Pasa L., Ragano S., Totereau C. (2016). Effets des pratiques d'enseignement de l'écriture en cours préparatoire. *Revue française de pédagogie*, 196, 85-100.

45. Sénéchal M. (2017). Testing a nested skills model of the relations among invented spelling, accurate spelling, and word reading, from kindergarten to grade 1. *Early Child Development and Care*, 187(3-4), 358-370 ; Sénéchal M. (2018, 14-15 mars). L'écriture inventée, la lecture et l'orthographe. In CNESCO. *Conférence de consensus Écrire et rédiger*. Paris.

46. Conrad N.J. (2008). From reading to spelling and spelling to reading: Transfer goes both ways. *Journal of Educational Psychology*, 100, 869-878 ; Graham S., Santangelo T. (2014). Does spelling instruction make students better spellers, readers, and writers? A meta-analytic review. *Reading and Writing*, 27(1), 1703-1743.

47. Fayol M. (2015). From language to text: The development and learning of translation. In MacArthur C.A., Graham S., Fitzgerald J. (Eds.), *Handbook of writing research* (2nd ed.), The Guilford Press, p. 130-143.

48. Costermans J., Fayol M. (Eds.), *Processing interclausal relationships. Studies in the production and comprehension of text*, Laurence Erlbaum Ass. Inc., 1997 ; Fayol M., Carré M., Simon-Thibault L. (2014). Enseigner la ponctuation : comment et avec quels effets ? *Le français aujourd'hui*, 187, 31-40.

49. Ahmed Y., Wagner R.K., Lopez D. (2014). Developmental relations between reading and writing at the word, sentence, and text levels: A latent change score analysis. *Journal of Educational Psychology*, 106(2), 419-434 ; Kent S.C., Wanzek J. (2016). The relationship between component skills and writing quality and production across developmental levels : A meta-analysis of the last 25 years. *Review of Educational Research*, 86(2), 570-601.

50. Thévenin M.G., Totereau C., Fayol M., Jarousse J.P. (1999) L'apprentissage/enseignement de la morphologie écrite du nombre en français. *Revue française de pédagogie*, 126, 39-52 ; Totereau C., Thévenin M.-T., Fayol M. (1997). The development of the number understanding of number morphology in written French. In Perfetti C., Rieben L., Fayol M. (Eds.), *Learning to spell*, Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 97-114.

51. Voir néanmoins la recherche conduite par Linda Allal concernant l'orthographe et la composition écrite : Allal L., Köhler D.B., Rieben L., Barbey Y. R., Saada-Robert M., Wegmüller E., *Apprendre l'orthographe en produisant des textes*, Éditions universitaires, 2001.

4

Compter et penser-raisonner

par Olivier Houdé

Outre lire et écrire, le programme scolaire comporte deux autres domaines cognitifs essentiels : compter, c'est-à-dire les mathématiques, et penser ou raisonner, c'est-à-dire la logique. Dans chacun de ces domaines, le célèbre psychologue suisse Jean Piaget (1896-1980) de l'Université de Genève a apporté des contributions remarquables, mais les avancées des sciences cognitives et du cerveau ont conduit à réviser ses interprétations, mettant à la fois en lumière (a) des compétences beaucoup plus précoces que ne l'imaginait Piaget chez les bébés et les jeunes enfants – bien avant l'école – et (b) des incompétences plus tardives, persistantes, chez les enfants plus grands, d'âge scolaire, les adolescents et même les adultes.

Que se passe-t-il à l'état initial et dans les organisations et réorganisations du cerveau pour expliquer cela ? Comment les professeurs des écoles peuvent-ils s'emparer de ces connaissances nouvelles pour mieux comprendre les élèves, leur cerveau, et améliorer les apprentissages des mathématiques et du raisonnement logique en classe ?

I. Compter ou la genèse des mathématiques

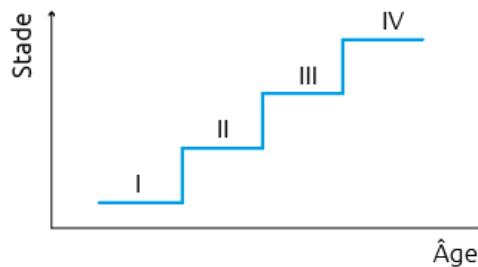
En un premier temps, je rappellerai la conception de Piaget sur le

nombre et le comptage, ainsi que les critiques de sa théorie. En un second temps, je présenterai une synthèse des données actuelles des sciences cognitives et du cerveau dans ce domaine.

1 Le nombre selon Piaget

La conception de l'intelligence de l'enfant selon Piaget était incrémentale, c'est-à-dire stade après stade, de plus en plus élaborés¹. C'est ce que l'on peut appeler le « modèle de l'escalier », intuitivement cohérent avec la succession des âges ou des classes à l'école. Chaque marche correspondant à un grand progrès, à un stade bien défini ou mode (structure) unique de pensée dans la genèse de l'intelligence logico-mathématique : de l'intelligence sensori-motrice du bébé (0-2 ans) fondée sur ses sens et ses actions, à l'intelligence conceptuelle (nombre, catégorisation, raisonnement), d'abord concrète chez l'enfant (vers 7 ans), puis abstraite et formelle chez l'adolescent (vers 12-14 ans) et l'adulte.

Figure 1. Les stades du développement logico-mathématique selon Piaget : sensori-moteur (I), préopératoire ou intuitif (II), logique concret (III) et logique formel ou abstrait (IV).



Selon ce modèle, il faut attendre 6-7 ans, le stade de la mise en place des opérations logiques concrètes, pour que l'enfant atteigne la « marche » qui correspond au concept de nombre. Il s'agit d'un développement lent et laborieux où, selon Piaget, le nombre se construit dans l'esprit de l'enfant par une synthèse logico-mathématique de deux opérations cognitives : la classification (ou

catégorisation) et la sériation.

a. Nombre, classification et sériation

La classification est testée par une tâche dite « d'inclusion des classes » où, devant dix marguerites et deux roses disposées sur une table, Piaget demandait à l'enfant : « Y a-t-il plus de marguerites ou plus de fleurs ? » Jusqu'à 6-7 ans, l'enfant se trompe et répond : « Plus de marguerites » ! C'est, selon Piaget, un défaut d'inclusion de la sous-classe des marguerites dans la classe des fleurs (qui inclut aussi les roses) ; nous y reviendrons plus loin en parlant de la catégorisation logique. Quant à la sériation, Piaget la teste par une tâche où l'enfant doit disposer sur la table, dans un ordre croissant, des baguettes de tailles différentes. Ces deux tâches sont réussies *en même temps* vers 6-7 ans. C'est ce qu'on appelle le « synchronisme opératoire », critère de l'atteinte du stade des opérations logiques concrètes.

Selon Piaget, pour construire le nombre, l'enfant doit retenir des classes leur structure d'inclusion : 1 inclus dans 2, 2 dans 3, etc., un peu comme les marguerites sont incluses dans les fleurs. C'est l'aspect « cardinal » du nombre (le cardinal est le nombre d'objets que contient une classe). Mais il doit aussi retenir de ses activités de sériation l'idée d'ordre : ce qui est vrai pour les baguettes, de la plus petite à la plus grande, l'est aussi pour les nombres : 1, puis 1 (2), puis 1 (3), etc. C'est l'aspect « ordinal » du nombre. La synthèse cognitive de la classification (inclusion) et de la sériation le conduit dès lors à comprendre que 1 est inclus dans $1 + 1$, $1 + 1$ dans $1 + 1 + 1$, etc., ce qui constitue le nombre.

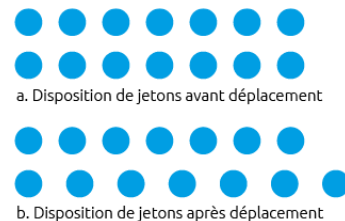
b. L'erreur de conservation du nombre

La tâche utilisée par Piaget auprès des enfants pour évaluer l'atteinte de ce nombre dit « opératoire » (au sens où il dépend des opérations de classification et de sériation) est la conservation des

quantités discrètes². Devant deux rangées qui ont le même nombre de jetons (7 et 7, par exemple) mais qui sont de longueurs différentes (après l'écartement de l'une des deux rangées), jusqu'à 6-7 ans l'enfant considère qu'« il y en a plus là où c'est plus long ». Piaget croyait que l'enfant n'était pas logique, qu'il était dominé par ses intuitions visuelles et spatiales (ici la longueur qui le trompe). Sa réponse verbale « il y en a plus là où c'est plus long » est une erreur d'« intuition perceptive » (longueur égale nombre) qui révèle, selon Piaget, que l'enfant dit « d'âge préscolaire » (en maternelle) n'a pas encore acquis le concept de nombre.

Figure 2. La tâche de conservation du nombre de Piaget.

Y a-t-il le même nombre de jetons dans les rangées du haut et du bas ? Cette question est posée pour deux configurations : lorsque les deux rangées ont la même longueur (a) ; et lorsque celle du bas est plus longue (b). La plupart des enfants répondent correctement au premier exercice. Mais avant l'âge de 7 ans, ils se trompent généralement au second en répondant qu'il y a plus de jetons en bas – là où c'est plus long !



Conformément à sa définition du nombre, synthèse cognitive des opérations de classification et de sériation, Piaget s'est en outre attaché à montrer le synchronisme de réussite des trois tâches (au même âge de 6-7 ans, stade de mise en place des opérations concrètes) : l'inclusion des classes, la sériation des baguettes et la conservation des quantités discrètes. S'agissant de situations très variées (autres matériels, autres questions, autres notions évaluées), l'approche était ici résolument « structuraliste », c'est-à-dire que des comportements de l'enfant en apparence assez différents (inclure des fleurs, sérier des baguettes, etc.) peuvent relever d'une même

construction ou *structure* cognitive dans son cerveau. La théorie de Piaget est particulièrement élégante. L'édifice est cohérent, bien structuré, mais il n'a pourtant pas résisté aux vérifications expérimentales ultérieures en psychologie du développement et en sciences cognitives.

c. Nombre, décalage et comptage

À la suite des travaux de Piaget, les recherches dans ce domaine n'ont cessé de se multiplier et les critiques à l'égard de la théorie piagétienne n'ont pas manqué. Tout d'abord, le synchronisme des opérations de classification, de sériation et de conservation du nombre n'a pas été confirmé : *les mêmes enfants* ne réussissent pas nécessairement ces trois tâches *au même moment* de leur développement (la dernière étant souvent réussie avant les deux premières). Ce décalage remet fortement en cause l'idée, chère à Piaget, d'une structure cognitive commune (et du stade correspondant) où le nombre serait la nécessaire synthèse logico-mathématique des opérations de classification et de sériation. Comme quoi une idée très élégante – et Piaget n'en manquait pas – peut être inexacte dans les faits.

« La focalisation théorique, un peu trop abstraite, de Piaget sur l'aspect logico-mathématique et structural du nombre (nombre = classification + sériation) a été excessive, laissant dans l'ombre d'autres aspects plus fonctionnels et pratiques du développement numérique, notamment le comptage. »

Ensuite, il est apparu de plus en plus nettement que la focalisation théorique, un peu trop abstraite, de Piaget sur l'aspect logico-mathématique et structural du nombre (nombre = classification + sériation) a été excessive, laissant dans l'ombre d'autres aspects plus

fonctionnels et pratiques du développement numérique, notamment le comptage. « Fonctionnel » veut dire ici « comment ça marche, comment ça fonctionne *réellement* chez l'enfant ? » Pour Piaget, la stratégie de comptage était trop « empirique », pratique, pas assez conceptuelle du point de vue de son analyse logique du nombre. Et pourtant les petits comptent sur leurs doigts. Ils comptent même beaucoup, partout – ça fait partie de leur « boîte à outils cognitifs ». Pierre Gréco, un chercheur français collaborateur de Piaget à Genève dans les années 1960, avait ainsi découvert que dans la tâche de conservation du nombre, si on demande *explicitement* à l'enfant de compter les jetons des deux alignements avant de répondre, il réussit bien plus tôt. Ainsi, la quantité comptée est conservée avant la quantité non comptée. C'est ce que Gréco³ a appelé la « quotité ».

2 Après Piaget : comptage et nombre chez le bébé et le jeune enfant

Sur cette question, le changement radical de perspective, par rapport à Piaget, est venu des États-Unis dans les années 1970 avec les travaux de la psychologue Rochel Gelman qui non seulement a mis l'accent sur le comptage, mais a postulé l'existence précoce de cinq principes numériques chez le jeune enfant dès le début de l'école maternelle⁴.

Les principes du comptage dès la maternelle

Selon Gelman, ces principes sont : **1/ le principe d'ordre stable** (l'ordre des « mots de nombre » correspondant aux chiffres : un, deux, trois, quatre, etc.), **2/ le principe de stricte correspondance terme à terme** (entre les mots de nombre et les objets à compter), **3/ le principe de cardinal** (le mot-nombre du dernier objet désigné égale le nombre total d'objets : l'enfant qui dit « un, deux, trois, quatre... quatre ! »), **4/ le principe d'abstraction** (les objets ne sont que des entités distinctes à compter, peu importe s'ils sont différents du point de vue de leur forme, leur couleur, etc.), enfin **5 / le principe de non-pertinence de l'ordre** (peu importe l'ordre dans lequel les objets sont énumérés durant le comptage, à condition que le deuxième principe soit respecté). Ces principes ont été mis en évidence par Gelman dès l'âge de 3 ans à partir d'une tâche où les enfants devaient dire si les procédures de comptage effectuées par une poupée (manipulée par l'expérimentatrice) étaient correctes ou non. Suivant les erreurs de comptage de la poupée (ordre non stable, violation de la correspondance terme à terme, cardinal désigné par un mot de nombre quelconque, etc.), Gelman déterminait si le jeune enfant connaissait ou non chacun des principes. A l'école maternelle, des petits jeux réalisés selon cette méthode sont très utiles pour vérifier la présence des cinq principes du comptage et/ou en consolider la construction de façon ludique. Ce sont les fondations cognitives de « compter » dans le programme scolaire.

a. Des principes précoces aux habiletés de comptage

En outre, Gelman distingue trois composantes dans la compétence à compter⁵. La première est la composante conceptuelle, c'est-à-dire le « savoir pourquoi » (les cinq principes énumérés dans l'encadré). La deuxième est la composante procédurale : le « savoir comment » relatif à la structure et à la séquence des actions de comptage. Enfin,

la troisième est la composante d'utilisation : le « savoir quand » relatif à la pertinence d'utilisation des deux premières composantes selon les contextes. Défendant l'idée que les principes (c'est-à-dire les compétences) précèdent les habiletés (performances), Gelman suggère que les difficultés numériques des enfants d'âge préscolaire (avant 6 ans) relèvent essentiellement des composantes procédurales et d'utilisation. Ce ne serait donc pas des difficultés d'ordre conceptuel ou logique du cerveau comme le pensait Piaget.

« Défendant l'idée que les principes (c'est-à-dire les compétences) précèdent les habiletés (performances), Gelman suggère que les difficultés numériques des enfants d'âge préscolaire (avant 6 ans) relèvent essentiellement des composantes procédurales et d'utilisation. »

Un autre apport original de Gelman⁶ est d'avoir montré à partir d'une situation appelée « la tâche magique » (dans laquelle des transformations sont faites subrepticement) que, chez l'enfant de 3-4 ans, seules les transformations qui affectent le cardinal d'un ensemble d'objets (les additions et les soustractions) suscitent une surprise, et non celles qui ne l'affectent pas (les écartements et les regroupements spatiaux). C'était un pavé jeté directement dans la mare de Piaget puisqu'il prétendait, comme on l'a vu plus haut, que l'enfant de cet âge est prisonnier de son intuition perceptive selon laquelle « il y a plus de jetons là où c'est plus long », c'est-à-dire après un écartement.

Dans les années 1970-1990, à la suite de Gelman, beaucoup de chercheurs ont étudié les activités de comptage chez le jeune enfant en adoptant des conclusions tantôt proches de celles de Gelman (principes précoces), tantôt en accord avec l'idée piagétienne d'une construction *conceptuelle* plus lente de la série numérique jusqu'à

6 ans⁷. La question est ici de savoir si les chercheurs qui réfutent l'existence, chez le jeune enfant, de principes aussi précisément définis que ceux de Gelman (et donc de la composante conceptuelle) analysent bien les échecs des enfants en prenant en compte les trois composantes de la capacité à compter : conceptuelle, procédurale et d'utilisation. C'est loin d'être certain.

« Si on demande aux jeunes enfants de choisir une rangée de bonbons, ils optent pour celle qui contient le plus de bonbons, au détriment de l'autre, plus longue. L'émotion et la gourmandise rendent donc le jeune enfant « mathématicien » et lui font « sauter la marche » ou le stade d'intuition perceptive de Piaget. »

b. Quand l'émotion et la gourmandise rendent les jeunes enfants mathématiciens

À la fin des années 1960, un psychologue français, Jacques Mehler, a – comme Gelman – apporté un « souffle nouveau » par rapport à la théorie piagétienne. Il a en effet publié, dans la revue américaine *Science*, une forte remise en cause de la chronologie du développement du nombre selon Piaget⁸. Mehler a ainsi démontré que les jeunes enfants réussissent dès 2 ans une version modifiée de la tâche de Piaget quand on remplace les jetons par des bonbons ! Si on leur demande de choisir une rangée de bonbons, ils optent pour celle qui contient le plus de bonbons, au détriment de l'autre, plus longue. L'émotion et la gourmandise (puisque'il s'agit de manger le plus grand nombre de bonbons) rendent donc le jeune enfant « mathématicien » et lui font « sauter la marche » ou le stade d'intuition perceptive de Piaget (stade de préparation des opérations concrètes). On peut penser, en référence aux données actuelles d'imagerie cérébrale sur le rôle de guidage des émotions dans le raisonnement⁹ que le cortex préfrontal ventromédian

(CPVM) droit des jeunes enfants s'active spécifiquement quand il s'agit du défi des bonbons et que cela déclenche, par des connexions cérébrales bien identifiées aujourd'hui¹⁰, l'inhibition préfrontale anticipée du piège de la longueur.

Piaget et ses collègues ont toutefois reproché à Mehler et Bever de ne pas avoir utilisé, comme eux, une réelle tâche de conservation du nombre où les quantités d'objets sont égales dans les deux alignements (c'est-à-dire sans ajout d'objets dans l'alignement le plus court – et par conséquent le plus dense). Mais c'est précisément là l'originalité de l'expérience des bonbons : créer un *enjeu* pour tester le nombre, ce qui exige qu'il y ait pour l'enfant un risque réel de mal choisir et donc, par définition, des alignements de quantités inégales. Le monde n'est pas seulement fait de quantités égales, de nombres qui se conservent, sans ajout ni retrait, comme le ferait croire une application trop orthodoxe de la théorie de Piaget. On peut d'ailleurs se demander, du point de vue du diagnostic cognitif, quelle est la valeur effective de tâches où l'enfant se trompe alors que le risque de se tromper n'éveille en lui aucun enjeu, aucune émotion ?

c. Plus extraordinaire encore : la découverte du nombre dans le cerveau des bébés

Au début des années 1990, la recherche sur les capacités numériques précoces est allée plus loin encore : la psychologue américaine Karen Wynn a publié dans la revue *Nature* un article intitulé « Additions et soustractions chez les bébés humains »¹¹, marquant la découverte de la naissance du nombre avant le langage (avant 2 ans) – dès le stade sensori-moteur de Piaget ; alors que le nombre n'apparaissait pour le psychologue genevois que deux stades plus tard, au stade opératoire concret (6-7 ans).

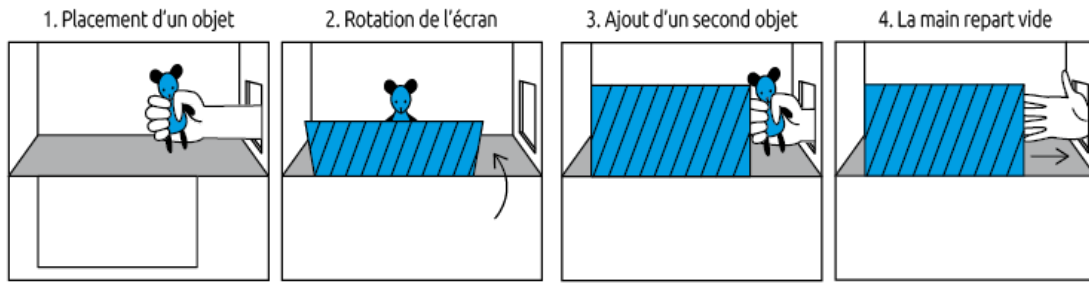
Les observations de Wynn, menées auprès de bébés de 4-5 mois, indiquent, en effet, que ceux-ci réalisent sans difficulté l'addition

$1+1=2$, ainsi que la soustraction $2-1=1$. Dans cette expérience, pour vérifier que les bébés savent « compter », Wynn leur présente un petit théâtre de marionnettes. D'abord, une main place un jouet (un Mickey) dans le théâtre. Ce premier Mickey est ensuite masqué, ce qui suppose de la part du bébé la permanence de l'objet. Puis le bébé peut voir la main apporter un deuxième Mickey identique, derrière le masque (soit l'opération $1+1=2$). On relève ensuite le masque. Dans certains cas, appelés « événements possibles », il y a deux Mickey. Mais, dans d'autres cas, les « événements impossibles » (ou magiques), il n'y en a plus qu'un (le deuxième a été escamoté à l'insu du bébé). La mesure du temps de fixation visuelle des bébés montre qu'ils ont perçu l'erreur de calcul ($1+1=1$) : ils regardent plus longtemps l'événement impossible que l'événement possible (cf. figure 3).

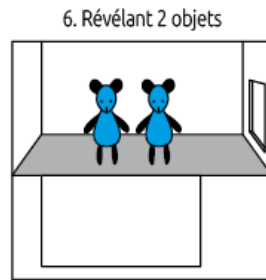
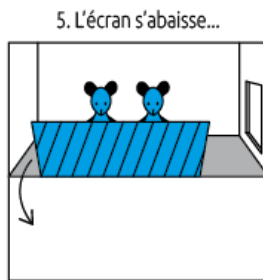
Figure 3. Dispositif de l'expérience de Wynn sur les opérations d'addition et de soustraction chez le bébé.

Opérations d'addition ($1+1=?$) et de soustraction ($2-1=?$) comportant, à chaque séquence, soit un résultat possible à gauche ($1+1=2$ ou $2-1=1$), soit un résultat impossible à droite ($1+1=1$ ou $2-1=2$). Cette fin de séquence expérimentale varie, pour un même bébé, selon les essais afin de mesurer s'il détecte les erreurs de calcul par sa surprise visuelle observée *via* une caméra reliée à un ordinateur.

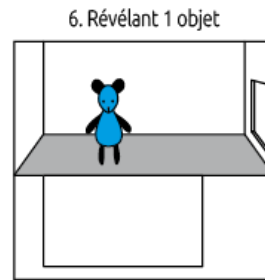
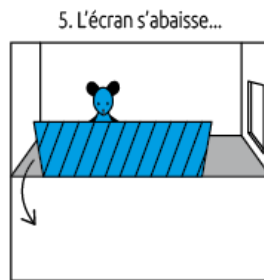
Événement 1 + 1 = 1 ou 2



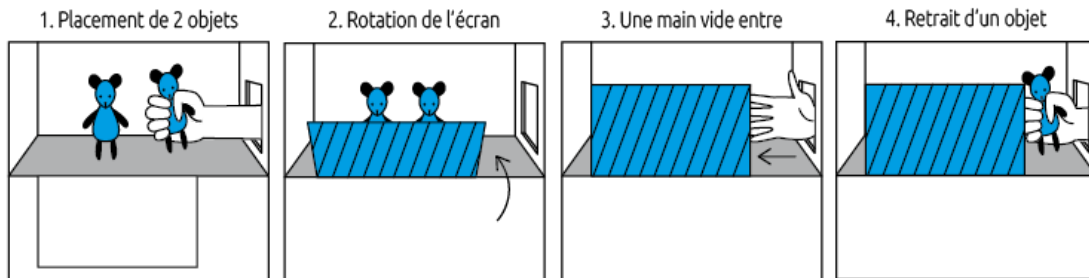
Résultat possible



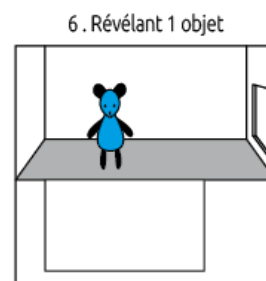
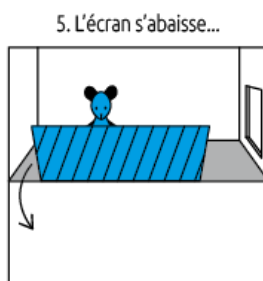
Résultat impossible



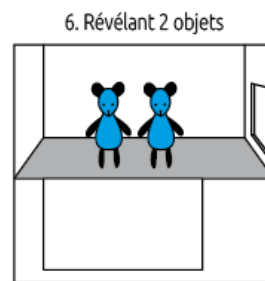
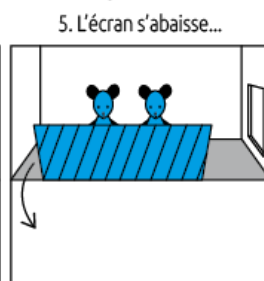
Événement 2 - 1 = 1 ou 2



Résultat possible



Résultat impossible



Ce mécanisme de détection d'erreurs a été confirmé au niveau cérébral¹². Lorsque les bébés sont équipés d'un bonnet d'électroencéphalographie (EEG), qui mesure l'activité électrique de

leur cerveau (cf. Chapitre 1 de Jean-Pierre Changeux), une région cérébrale spécifique, dédiée à la détection de conflits cognitifs ou perceptifs, c'est-à-dire d'incongruités, s'active uniquement face aux événements du type $1+1=1$, $1+1=3$ ou encore $2-1=2$. Elle ne s'active pas face à $1+1=2$ ou $2-1=1$. Cette région est située sur la face interne du cortex préfrontal du bébé : c'est le cortex cingulaire antérieur (CCA). Chez nous aussi, adultes, comme chez le bébé, le CCA s'active face à des incongruités, des erreurs, etc. Le cerveau du bébé fait donc déjà des maths : ici, de l'arithmétique visuelle ! Mieux, il corrige les erreurs ou, pour le moins, les détecte.

L'intérêt de ces études – celle princeps de Wynn en particulier – est qu'elles montrent que le bébé est non seulement capable de distinguer « un seul » de « plusieurs » (quand il est surpris par un événement impossible comme $1+1=1$), mais que, de plus, il est capable de distinguer deux quantités différentes comme 2 et 3 (car il est aussi surpris par $1+1=3$). Le bébé de 4-5 mois serait donc doté d'un mécanisme cognitif lui permettant de calculer le résultat *précis* d'opérations arithmétiques simples. Selon Wynn, il possède déjà de véritables concepts numériques avec encodage de la relation d'ordre. Une explication en termes de traitement perceptif global ou holistique telle que « 1 plus 1 égale plus que 1, aussi bien 2 que 3 », par exemple, classiquement avancée pour rendre compte des capacités numériques du bébé et de l'animal, n'est, dans ce cas, plus suffisante.

Selon Wynn, le bébé humain est doté, de façon innée, d'une capacité à garder des objets en mémoire (Mickey ou autres – nous avons refait l'expérience en crèche en France avec des Babar¹³) et à effectuer sur eux des opérations mathématiques élémentaires. Par « capacité innée », elle veut dire : intégrée dans notre équipement génétique – lui-même façonné par l'évolution biologique et la sélection naturelle – et susceptible de s'exprimer dès les premiers mois de la vie.

Dans la tête d'un bébé qui fait des maths

Les résultats de Wynn ont fait couler beaucoup d'encre ! Des psychologues se sont interrogés sur ce qui se passe effectivement dans le cerveau du bébé quand il regarde apparaître et disparaître les Mickey. Trois hypothèses ont été avancées : 1 / la manipulation de symboles non linguistiques des nombres entiers, 2 / l'accumulation (sans symbole) du nombre d'objets successivement perçus dans une sorte de « métronome interne », ou encore 3 / le stockage direct des objets (sans symbole, sans nombre) dans des « fichiers » en mémoire (Wynn¹⁴, pour une synthèse de ces débats). Selon Tony Simon, qui défend la dernière hypothèse, une explication non numérique (non mathématique) des résultats de Wynn est possible : l'utilisation directe de fichiers d'objets dans un système de mémoire visuelle et spatiale¹⁵. Il en déduit que, malgré les résultats robustes et consistants de Wynn, le bébé a un « cerveau sans nombre »¹⁶ ! En accord avec Simon, beaucoup de psychologues ont adopté cette interprétation minimaliste des résultats de Wynn, refusant d'y voir de réelles capacités numériques du bébé. Nous verrons plus loin que Wynn avait raison et que le cerveau du bébé, grâce à une partie précise du cortex pariétal (son sillon intra-pariétal ou SIP), traite bien déjà des nombres.

Durant les années 1990, différents chercheurs, y compris les plus sceptiques, ont reproduit et contrôlé les résultats de Wynn, prouvant ainsi leur robustesse et leur consistance¹⁷. Par exemple, l'objection d'un traitement non numérique des objets fondé sur leur identité et (ou) leur localisation spatiale a été testée et réfutée¹⁸.

On devrait un jour s'interroger sur les mécanismes culturels, psychologiques, pédagogiques, sociologiques, épistémologiques, ..., sans doute profonds, qui poussent les humains adultes, dont de bons scientifiques et beaucoup de pédagogues, à vouloir réduire à leur plus simple expression les potentialités cognitives des bébés,

tendance exacerbée lorsqu'il s'agit de l'origine des mathématiques ! Peut-être est-ce leur croyance, aujourd'hui contestée, dans le pouvoir fondateur absolu du langage¹⁹ et/ou dans le « modèle en escalier » du développement conceptuel de l'enfant selon Piaget où le stade du nombre n'apparaît qu'à 6-7 ans, « l'âge de raison » ? Ou encore, est-ce la conviction empiriste que c'est l'école qui pour la première fois va bien plus tard graver, laborieusement, les nombres et les opérations arithmétiques dans le cerveau encore vierge (telle une page blanche ou une table rase) des enfants en primaire, au mieux dès la maternelle, après l'émergence du langage dans tous les cas ? Or c'est faux, on vient de le voir, le cerveau n'attend ni l'école maternelle (qu'elle soit à 2 ou 3 ans) ni le langage (2 ans) pour démarrer les maths. Il le fait dès la première année de vie, bien avant le langage et ses symboles, à travers des mécanismes efficaces de perception et d'attention visuelles. On peut dire que le bébé compte déjà avec ses yeux les objets qui l'entourent. On sait même aujourd'hui qu'il fait des statistiques sur ces objets²⁰.

Contrairement à l'idéologie répandue de ne pas « primariser l'école maternelle » et de laisser les questions cognitives et logico-mathématiques pour plus tard au CP et après (priviliégiant chez les petits seulement la consolidation du langage oral, la communication sociale et l'affectif, certes très importants), NON, il faut absolument faire, dès le cycle 1 (Petite, Moyenne et Grande sections de maternelle), des exercices et jeux de maths, même arithmétiques, car les bébés déjà, dès leur première année de vie, en font et en ont envie ! Ceux qui déplorent que l'on commence trop tôt les maths (quatre opérations, etc.) en CP, voire en maternelle, ignorent le fonctionnement du cerveau et les capacités numériques précoces des bébés et des jeunes enfants. Ils ignorent leur extraordinaire potentiel cognitif.

Wynn a en outre démontré dans une étude ultime, très convaincante²¹, que les capacités arithmétiques des bébés ne se limitent pas à des petits nombres (comme $1+1=2$ ou $2-1=1$), c'est-à-

dire aux limites de stockage de simples « fichiers d'objets permanents » en mémoire, selon une représentation physique et non numérique dans le cerveau (comme le contre argumentait Simon), mais aussi à des grands nombres tels $5+5=10$ et $10-5=5$. Cela plaide, selon elle, en faveur de l'existence chez le bébé humain, dès la première année de vie, d'un système de représentation et d'estimation des magnitudes numériques, qu'il s'agisse de petits ou de grands nombres²². Selon Wynn, ce système de magnitudes permet au bébé de se représenter, sur une échelle donnée, l'importance et l'adéquation du résultat d'une opération arithmétique élémentaire ($1+1=2$, $5+5=10$, $2-1=1$, $10-5=5$).

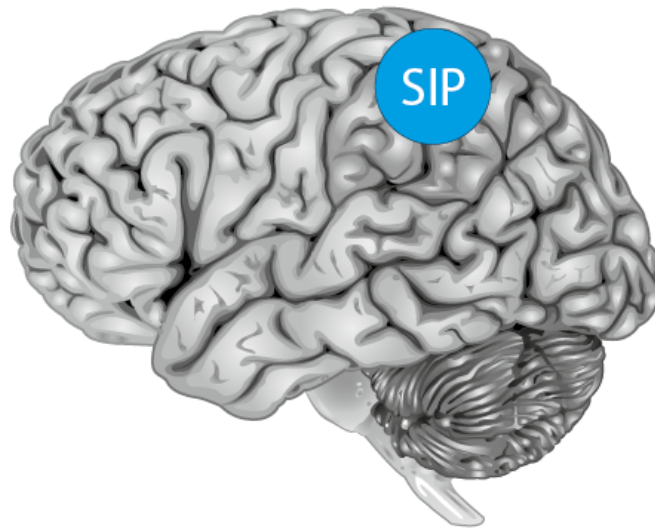
Les professeurs des écoles n'imaginent pas du tout cela lorsqu'ils ont le sentiment, bien des années plus tard, d'apprendre ces opérations pour la toute première fois à leurs élèves, au tableau, sur un cahier et *via* le langage ! Avant ces données très précises de sciences cognitives sur le nombre chez le bébé, certains grands pédagogues l'avaient toutefois pressenti, telle Maria Montessori lorsqu'elle écrit dans *l'Enfant* (1936) : « L'intelligence ne se construit pas lentement, comme le concevait la psychologie mécanique » ! (p. 56), mais il y a des bouffées, des fulgurances, et à propos du raisonnement : « c'est dans cette voie (la raison) que le bébé avancera, bien avant que ses petits pieds commencent à cheminer dans celle où évoluera son corps » (p. 58). Dit autrement, la cognition, ici numérique, précède non seulement le langage, mais même la marche ! – donc avant 1 an.

3 Nombre et cortex pariétal : le sillon intra-pariétal (SIP)

L'imagerie cérébrale a démontré que le cortex pariétal, en particulier son épiscentre le sillon intra-pariétal (SIP), est le siège des mathématiques, depuis le sens du nombre (ou des quantités) chez le bébé jusqu'aux calculs et raisonnements plus complexes chez l'enfant et l'adulte²³.

Figure 4. Représentation du cortex pariétal, en particulier son épiceutre le sillon intra-pariétal (SIP).

C'est le siège des mathématiques, depuis le sens du nombre (ou des quantités) chez le bébé jusqu'aux calculs plus complexes chez l'enfant et l'adulte.



a. Une aire des maths commune aux bébés, aux enfants et aux experts

On sait que des experts en mathématiques réalisant de l'algèbre²⁴ activent les neurones du SIP. Une autre expérience remarquable²⁵ montre que les régions du cerveau activées aussi bien chez nous que chez un calculateur prodige allemand, Rüdiger Gam, lors de calculs difficiles (par exemple, à combien est égal 32×15 ?), sont non pas des aires du langage, comme certains l'avaient supposé, mais des aires occipitales, pariétales et frontales.

C'est aussi l'activation de ces régions pariétales, notamment le SIP, et frontales qui est observée dans les études d'imagerie cérébrale sur le nombre chez le bébé et l'enfant, qu'il s'agisse de tâches non symboliques (comme la tâche des jetons de Piaget), symboliques ou arithmétiques²⁶. Nous l'avons également confirmé dans une méta-analyse d'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf) réalisée sur plusieurs centaines d'enfants de pays différents dans des

tâches numériques variées²⁷.

Zoom sur...

Dans le cerveau d'un calculateur prodige

Le calculateur prodige dans l'étude de Pesenti et al.²⁸ est capable d'élever à la puissance 15 tous les nombres à 2 chiffres, de multiplier entre eux des nombres à 2 ou 3 chiffres, de calculer des sinus et des racines, de diviser entre eux deux nombres premiers et de donner le résultat avec plus de 60 décimales correctes – tout cela de tête ! Ce qu'il mobilise, en plus de nous, ce sont des régions du cerveau qui servent non pas à la mémoire de travail à court terme (trop rapidement saturée), mais à la mémoire à long terme dite « épisodique », c'est-à-dire à ses souvenirs tout à fait personnels (issus de ses longs entraînements quotidiens) avec les mathématiques. Rüdiger Gam est très entraîné ; il est prodige par ses performances exceptionnelles, mais ce n'est pas un génie au sens où il ferait des découvertes en mathématiques. On se rappelle aussi – et cette fois c'était un génie – qu'Albert Einstein disait utiliser avant tout des images visuelles et des représentations spatiales pour réaliser des démonstrations physico-mathématiques, le langage – la mise en mots, en formules – n'intervenant que bien après.

« Il va évidemment de soi que, si le bébé a déjà des capacités numériques perceptivo-cognitives avant l'apparition du langage, elles sont encore rudimentaires et vont s'enrichir dans la suite de son développement cognitif. »

Or, ces régions du cerveau sont celles de la perception, de l'attention et de la mémoire de travail visuelles et spatiales. Autant de fonctions cognitives dont sont dotés les êtres sans langage comme les bébés ! Rien n'interdit donc, contrairement à ce que pense Simon, qu'avec

ces fonctions cognitives leurs cerveaux manipulent des nombres (comme les adultes, mais à un niveau de complexité moindre, ou de façon approximative²⁹ – les calculs des bébés observés par Wynn sont toutefois exacts). Il y a deux possibilités : soit, des neurones sont d'emblée dédiés au nombre chez le bébé, tel un « sens du nombre » inné, partagé avec d'autres animaux dont les grands singes³⁰, soit, ils sont assez rapidement recyclés – à partir de fonctions visuospatiales – pour faire des maths au cours du développement³¹.

Il va évidemment de soi que, si le bébé a déjà des capacités numériques perceptivo cognitives avant l'apparition du langage, elles sont encore rudimentaires (ou approximatives dirait Dehaene³²) et vont s'enrichir dans la suite de son développement cognitif, non pas pour en faire nécessairement un prodige ou un génie, mais, par exemple, pour appliquer correctement, avec exactitude, et à de plus grands nombres encore, les principes de comptage de Gelman. L'école s'emparera ensuite de cette matière première et l'instruction formelle fera de certains enfants de bons mathématiciens – pourquoi pas des médaillés Fields comme Cédric Villani en France (l'équivalent du prix Nobel pour les mathématiques) – et d'autres, des gens comme tout le monde dans la société, capables de comprendre des moyennes, des pourcentages, voire un peu plus. Le mot « nombre » évoque ainsi des choses différentes suivant le niveau de connaissance de chacun (qui sait ce que sont exactement les nombres entiers, réels, complexes et transcendants ?). L'objet qui permet de compter dans la vie courante devient un concept abstrait lorsqu'il est utilisé dans les énoncés mathématiques.

b. Avant et après le langage

Il reste toutefois que, selon une expression bien trouvée de Marc Hauser³³, le schéma du développement cognitif est comme un jeu de saute-mouton, certains aspects de notre compétence numérique apparaissant avant notre compétence linguistique (avant 2 ans donc), et d'autres après. Pour l'instant, on ne sait pas très bien

comment ces deux domaines de connaissance (nombre et langage) agissent l'un sur l'autre, soit au cours de l'évolution biologique (dans le règne animal jusqu'à l'Homme), soit au cours du développement de l'enfant. Avec l'apparition du langage vers 2 ans, le jeune enfant doit en effet apprendre à faire des calculs en utilisant les mots correspondant aux nombres. En développant son intelligence linguistique, il gagne en capacité d'abstraction et de manipulation symbolique, mais, comme nous l'avons montré avec Peter Bryant³⁴, cela provoque aussi des perturbations et des erreurs qui n'existaient pas avec l'intelligence visuospatiale, plus rapide, plus fluide et plus économique (du point de vue du coût cognitif). Pour décrire ce type de phénomène, Annette Karmiloff-Smith³⁵ a introduit l'idée générale (applicable à d'autres domaines que le nombre) d'une « redescription cognitive » par laquelle l'enfant passerait de connaissances implicites (celles du bébé) à des connaissances explicites.

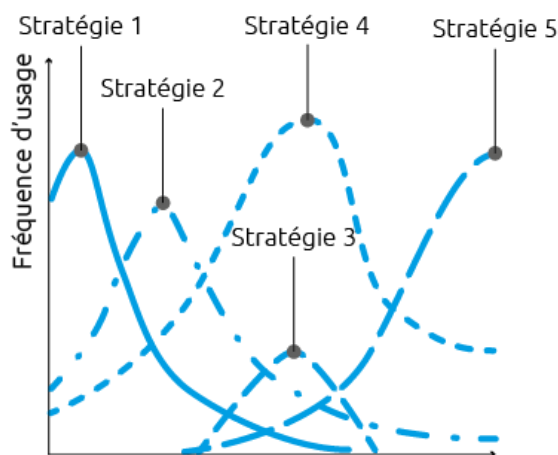
c. Variation et sélection de stratégies numériques au cours du développement

Le modèle théorique actuel qui rend le mieux compte de la complexité du développement numérique chez l'enfant d'âge préscolaire (école maternelle) et scolaire (école élémentaire) est celui de Robert Siegler³⁶. À propos de la résolution d'opérations arithmétiques énoncées verbalement (Combien font... ?) et/ou écrites sur un cahier ou au tableau, telles $3+5=?$, $6+3=?$, $9+1=?$, $3+9=?$, Siegler a démontré que l'enfant dispose d'une variété de stratégies cognitives qui entrent en compétition (un peu comme dans l'évolution biologique) : deviner, compter unité par unité avec les doigts de chaque main pour chaque opérant (3 et 5, par exemple) et recompter le tout après (8), compter à partir du plus grand des deux opérants (par exemple, à partir de 9, compter 10, 11, 12) ou encore retrouver directement le résultat en mémoire. Contre le « modèle en escalier » de Piaget (où l'enfant passe soudainement d'un stade à

l'autre), Siegler propose de concevoir plutôt le développement numérique, qu'il s'agisse d'additions, de soustractions ou de multiplications, comme « des vagues qui se chevauchent ». Selon cette métaphore, chaque stratégie cognitive est à l'image d'une vague qui approche d'un rivage, avec plusieurs vagues (ou façons de résoudre le problème arithmétique) susceptibles de se chevaucher à tout moment et d'être candidates à la réponse. Avec l'expérience et selon les situations, l'enfant apprend à choisir l'une ou l'autre façon de procéder. Ce modèle de variation/sélection de stratégies a été simulé et testé sur ordinateur. Il peut trouver une assise neuronale forte dans le modèle néodarwiniste de variation/sélection de Changeux (cf. Chapitre 1). Outre l'arithmétique, Siegler a illustré le bien-fondé de son modèle pour diverses acquisitions de l'enfant comme la capacité à lire l'heure, la lecture, l'orthographe, etc.

Figure 5. Modèle du développement cognitif en vagues ou stratégies qui se chevauchent selon Robert Siegler.

Ce modèle s'oppose à la théorie des stades de Piaget qui est incrémentale ou « en escalier ».



On sait en outre, grâce à l'étude de Gilmore, McCarthy et Spelke³⁷ que, dès l'école maternelle, des enfants de 5 ans possèdent une compétence en arithmétique symbolique, bien réelle, pour des problèmes d'addition et de soustraction à *deux chiffres*, alors que ces

opérations ne leur ont jamais encore été enseignées : par exemple, « Sarah a 21 bonbons. On lui donne 30 bonbons de plus. Jean a 34 bonbons. Qui en a le plus ? ». Des petites images de type BD illustrent ce problème (avec les chiffres des quantités) et, étonnamment, les intuitions arithmétiques des enfants leur permettent de répondre correctement environ 70% du temps. Ils imaginent donc bien, dès 5 ans, les quantités correspondant aux mots de nombres, réfléchissent à leurs grandeurs et les comparent avec une certaine efficacité. Selon Dehaene³⁸, cela confirme la théorie du sens approximatif du nombre, existant déjà chez le bébé et permettant ici, chez les enfants d'école maternelle, les premières intuitions arithmétiques symboliques, avant toute instruction formelle sur de telles opérations pour des nombres à deux chiffres.

Pistes de pratiques

Tester le sens précoce et approximatif du nombre, prédicteur de la réussite ultérieure en maths à l'école

Des chercheurs pensent aujourd'hui que ce sens approximatif du nombre, d'abord non symbolique (nuages de points, ensembles d'objets) avant que de devenir symbolique (sur des chiffres, des opérations $+$, $-$, $\times$, $\div$, $=$, etc.), est prédictif de la réussite ultérieure en mathématiques à l'école³⁹. Ce sens approximatif du nombre permettrait, s'il est efficace chez un enfant donné, de l'aider *via* notamment la comptine numérique et l'acquisition du principe de cardinal en maternelle (voir les principes de comptage de Gelman plus haut), à mieux rentrer dans les apprentissages plus formels et exacts des cycles scolaires suivants. Ce serait une garantie de base solide. Il est donc important de tester systématiquement le sens du nombre par des comparaisons de quantités (nuages de points ou autres) de plus en plus fines dès la maternelle, voire en crèche. Il semblerait d'ailleurs que la dyscalculie soit en partie liée à un déficit des mécanismes cérébraux du sens du nombre dans le SIP (Butterworth, 2010). Dans cet esprit, Wilson et Dehaene ont mis au point un logiciel éducatif *La course au nombre* pour aider les enfants qui rencontrent ce type de difficultés⁴⁰.

Le conseil pédagogique est donc ici d'utiliser et d'exploiter au plus tôt ces bonnes intuitions mathématiques des enfants pour aller plus loin. Mais, je le dis une fois de plus, le problème est que souvent on sous-estime le potentiel cognitif des jeunes enfants, surtout en mathématiques. C'est pourquoi la connaissance de ces données de sciences cognitives est importante.

Les choses sont toutefois plus complexes car ce seul sens du nombre, déjà présent chez le bébé, ne suffit pas ! Il faut aussi que se développent d'autres capacités cérébrales utiles aux mathématiques comme les fonctions exécutives du cortex préfrontal : l'inhibition, la

flexibilité et la mémoire de travail⁴¹. Or la maturation du cortex préfrontal – mesurée par un élagage de matière grise – au cours du développement est la plus lente et la plus tardive⁴². Revenons à la tâche de conservation du nombre de Piaget pour illustrer ce point.

4 Nombre et cortex préfrontal : le rôle de l'inhibition des dimensions non pertinentes

Pour clore cette section sur le nombre et les maths, il reste, à propos de Piaget, une question théoriquement et historiquement importante. Elle l'est aussi, pratiquement, pour les mathématiques à l'école. Si la théorie piagétienne des stades n'est plus adéquate, le cerveau du bébé ayant déjà un sens approximatif du nombre⁴³ et même des capacités arithmétiques exactes pour des petits ou grands nombres⁴⁴, suivies de principes de comptage dès 3 ans⁴⁵, bien avant le stade logico-mathématique du nombre de Piaget (6-7 ans), comment expliquer alors les observations de Piaget que personne ne conteste et qui restent, il faut bien le dire, passionnantes : en l'occurrence pour la tâche des jetons (nuages ou plutôt alignements de points), le fait que l'enfant jusqu'à 6-7 ans – tout « bébé mathématicien » qu'il ait pu être – répond erronément qu'il y en a plus là où c'est plus long ? Testez-le en classe ou autour de vous, c'est un résultat très robuste.

a. Heuristiques approximatives, algorithmes exacts et inhibition

En fait, dans la tâche des jetons de Piaget, il y a variation/sélection entre plusieurs stratégies numériques comme le dirait Siegler (variation/sélection des réseaux neuronaux dirait Changeux), mais avec un conflit cognitif entre deux stratégies qui impose d'inhiber une stratégie dominante mais inadéquate, faute de quoi l'enfant se trompe. Ce cas de figure des situations de compétition forte avec conflit cognitif, « stratégie dangereuse » et intervention nécessaire des fonctions exécutives du cortex préfrontal pour la bloquer (le

contrôle inhibiteur) n'est pas envisagé dans le modèle de Siegler. Or, c'est un cas fréquent à l'école où l'enfant doit apprendre à inhiber ses automatismes erronés⁴⁶, qu'on appelle aussi des heuristiques⁴⁷.

Revenons à la tâche de Piaget. Tout porte à croire que ce qui pose réellement problème à l'enfant d'école maternelle dans cette tâche des jetons plus ou moins écartés, ce n'est pas d'avoir ou de ne pas avoir la notion de nombre (les preuves de capacités numériques précoces sont maintenant solides – et souvenez-vous des bonbons !), mais c'est d'être incapable d'inhiber une stratégie perceptive inadéquate : « longueur = nombre », stratégie qui d'habitude marche bien (tant pour l'adulte que pour l'enfant d'ailleurs)⁴⁸.

Il y a, en effet, dans la tâche de conservation des quantités discrètes de Piaget, deux stratégies cognitives qui entrent en compétition (un peu comme dans le modèle de Siegler) : un « algorithme » de quantification exacte, le comptage (lorsqu'il est nécessaire), et une « heuristique » approximative, « longueur = nombre ». Une heuristique est une stratégie très rapide, très efficace – donc économique pour l'enfant –, qui marche très bien, très souvent, mais pas toujours. A la différence de l'algorithme, plus lent et réfléchi, mais qui, appliqué sans erreur ou bug, conduit *toujours* à la bonne solution. C'est en ce sens qu'il est exact. Les principes de Gelman, décrits plus haut, constituent un algorithme solide de comptage qui devrait permettre à l'enfant de réussir la tâche de Piaget, dès l'école maternelle, par un double comptage des deux alignements de jetons et une comparaison des deux cardinaux obtenus (égaux dans ce cas, 7 et 7 par exemple). Or il ne le fait pas, se laissant dominer par l'heuristique « longueur = nombre ».

Vous vous posez peut-être la question de savoir d'où vient chez l'enfant l'heuristique trompeuse « longueur = nombre » ? À l'image des structures logiques dont Piaget a bien étudié la construction, les régularités perceptives et sémantiques *se construisent* aussi (sans doute par un apprentissage probabiliste de type bayésien⁴⁹). Elles sont renforcées culturellement à certains moments du

développement, à l'école, à la maison ou ailleurs, et deviennent dominantes dans le cerveau.

Zoom sur...

D'où vient l'heuristique « longueur = nombre » ?

D'où vient l'heuristique « longueur = nombre » ? Par exemple, sur les rayons des supermarchés, en général, il est vrai que la longueur et le nombre varient ensemble (covariant) : face à deux alignements de produits du même type, celui qui est le plus long contient aussi le plus de produits. Le cerveau de l'enfant détecte très tôt ce type de régularité visuelle et spatiale (« l'enfant est avide de saisir, c'est un véritable accumulateur », disait déjà Montessori dans *L'Enfant*, voir Houdé, 2018, pour ce rapprochement). De même à l'école ou à la maison, quand on apprend les additions et les soustractions (ajouts/retraits) avec des objets sur une table, si l'on additionne, on ajoute 1 ou plusieurs objets ($1 + 1 + 1 + 1 + \dots$) et c'est plus long ; si l'on soustrait, c'est l'inverse. Donc là aussi, dans l'arithmétique élémentaire comme au supermarché, la longueur et le nombre covariant. C'est encore vrai dans les livres de « maths pour petits » ou sur les murs des classes. On y découvre en général la suite des nombres de 1 à 10 illustrée par des alignements d'objets de longueur croissante (des alignements d'animaux ou de fruits). Donc, quasiment partout, sauf dans la tâche de Piaget, la longueur et le nombre varient ensemble ! C'est ce qui crée l'heuristique. D'où l'intuition perceptive, visuospatiale, habituelle selon laquelle « longueur = nombre ». La force de cette intuition, souvent utile, prête à bondir (même chez l'adulte), exige par conséquent, lorsque c'est nécessaire comme dans la tâche de Piaget, un mécanisme plus puissant de résistance cognitive : l'inhibition active de l'heuristique « longueur = nombre » par le cortex préfrontal⁵⁰.

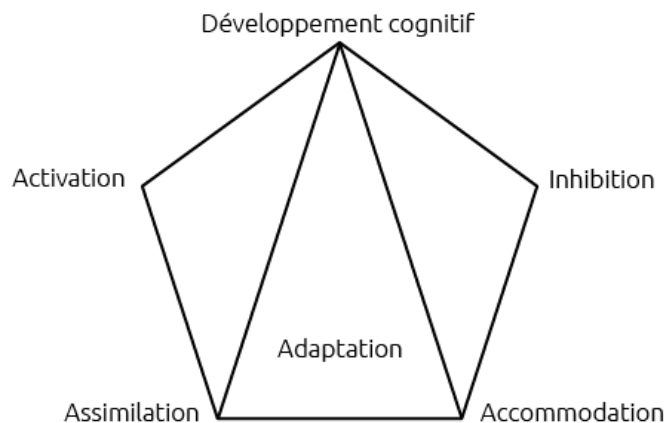
On comprend dès lors mieux, selon les situations plus ou moins

conflictuelles (du point de vue des conflits cognitifs internes au cerveau), rencontrées par l'enfant au cours de son développement, à l'école notamment, qu'il y ait des ratés, des accros, des décalages inattendus.

C'est en ces termes nouveaux d'un système dynamique et non linéaire que la conception-même du développement de l'intelligence et des apprentissages cognitifs est aujourd'hui renouvelée, après Piaget, en sciences cognitives⁵¹. Les notions d'heuristiques souvent dominantes dans le cerveau, d'algorithmes exacts (la logique, les règles du programme scolaire) et de contrôle inhibiteur permettent de lever le paradoxe entre des capacités cognitives précoces chez les bébés ou les jeunes enfants et des erreurs tardives des enfants plus grands (telle l'erreur de conservation du nombre observée par Piaget), des adolescents et même des adultes confrontés, selon le contexte, à des heuristiques qu'ils ne parviennent pas à inhiber⁵². Voilà un processus inhibiteur (positif, adaptatif) sur lequel devraient se concentrer les apprentissages à l'école pour rendre le cerveau humain plus robuste ou « résistant ». La lecture du chapitre introductif de Changeux sur les fondamentaux du cerveau confirme combien cet organe, du niveau moléculaire au niveau neuronal, est autant inhibiteur qu'activateur.

Figure 6. La double dynamique de l'adaptation dans le développement cognitif.

L'assimilation/accommodation (reprise de Piaget), complétée et renforcée aujourd'hui par l'inhibition cognitive (pôle accommodateur), antagoniste de l'activation (pôle assimilateur) (O. Houdé) – Selon Piaget, l'assimilation était l'intégration des stimulations de l'environnement dans l'organisme par des structures cognitives activables, déjà prêtes, alors que l'accommodation était l'ajustement (restructuration) de l'organisme à ces stimulations lorsqu'il y avait une difficulté ou une contradiction. Mais il n'est pas allé jusqu'à l'inhibition, pourtant mécanisme-clé du cerveau.



b. La chronométrie mentale pour tester l'inhibition de l'heuristique « longueur = nombre »

Pour vérifier scientifiquement cette nouvelle interprétation, avec mon laboratoire LaPsyDÉ⁵³ nous avons mis au point une adaptation informatisée de la tâche des jetons de Piaget où la chronométrie mentale (l'ordinateur enregistrerait les temps de réponse en millisecondes) permettait de tester le rôle de l'inhibition chez l'enfant de 8 ans qui réussissait la tâche⁵⁴. L'idée était : (a) de faire résoudre à l'enfant une tâche de type Piaget (où, par hypothèse, il devait inhiber la stratégie « longueur = nombre ») ; (b) de lui présenter, juste après, une situation où longueur et nombre

covariaient (deux alignements de jetons où celui qui était le plus long contenait aussi le plus de jetons). L'enfant devait dès lors activer en 2 la stratégie (l'heuristique) qu'il venait d'inhiber en 1. Les résultats ont indiqué que, dans ce dernier cas, l'enfant d'école élémentaire mettait un peu plus de temps pour répondre (environ 150 ms) que dans une situation contrôle où il n'avait pas dû résoudre d'abord la tâche de type Piaget.

Ce petit décalage de temps, statistiquement significatif, est ce qu'on appelle l'« amorçage négatif », démonstration expérimentale du fait que l'enfant avait bien dû inhiber, bloquer, la stratégie « longueur = nombre » pour réussir la tâche de Piaget. D'où le temps supplémentaire qu'il met à débloquer cette stratégie quand elle redevient pertinente. C'est une sorte de levée de la résistance ! Ce phénomène s'observe encore chez l'adulte⁵⁵, ce qui montre que l'inhibition de l'heuristique reste toujours nécessaire. C'est pourquoi il faut bien l'entraîner à l'école.

c. La tâche de Piaget en IRM fonctionnelle

À partir de la même tâche de conservation du nombre de Piaget, nous avons pu démontrer expérimentalement⁵⁶ (cf. figure 7), à la fois par la chronométrie mentale (mesure des temps de réaction en millisecondes) et par l'imagerie cérébrale (avec la technique de l'IRM fonctionnelle) que ce qui pose réellement problème aux enfants dans cette situation, avant « l'âge ou stade de raison » (7 ans), n'est pas l'invariance du nombre en tant que telle, déjà observée chez les bébés⁵⁷, mais l'intervention de leur cortex préfrontal pour inhiber l'heuristique « longueur égale nombre » très renforcée par l'environnement préscolaire (voir le Zoom sur... D'où vient l'heuristique « longueur=nombre » ?). Celle-ci interfère, dans le cortex pariétal des enfants, au niveau du sillon intrapariétal (SIP), avec l'algorithme exact de quantification (le comptage).

Le cortex pariétal est, on l'a vu, le siège des mathématiques, du sens du nombre chez le bébé aux calculs plus complexes chez l'enfant et

l'adulte⁵⁸, en particulier le sillon intrapariétal, son épicentre. Mais, dans ce dernier, le SIP, des neurones dédiés aux nombres voisinent avec d'autres neurones dédiés à des dimensions spatiales non pertinentes (taille, longueur, position des objets, etc.⁵⁹) qui, dans certaines tâches, comme celle de Piaget, doivent précisément être inhibées. C'est le continu (longueur des alignements) qui interfère avec le discontinu (le nombre). On peut même faire l'hypothèse que c'est la proximité neuronale, le recouvrement anatomique de ces dimensions pertinentes/non-pertinentes, qui crée l'interférence cognitive. Mon laboratoire étudie cela, précisément, aujourd'hui. Nous cherchons même, avec Arnaud Viarouge, à mettre au point de petits tests simples qui permettent aux professeurs d'évaluer quelles dimensions non pertinentes dominent pour un élève donné dans des tâches numériques⁶⁰. Ce sont précisément elles – et les heuristiques qu'elles déclenchent dans son cerveau – qu'il faudra lui apprendre à inhiber selon les cas.

Figure 7. Visualisation par l'imagerie cérébrale des régions associées à la réussite de la tâche de conservation du nombre de Piaget en IRMf par des enfants d'âge scolaire.

Régions postérieures pariétales (nombre/espace) et antérieures préfrontales (inhibition)⁶¹.



Ce type de difficulté d'inhibition reste vrai chez les adolescents et les adultes pour d'autres tâches de logique où de nouvelles heuristiques perceptives et sémantiques surgissent⁶². Nous y reviendrons. Cela permet d'expliquer les erreurs et biais systématiques de raisonnement, de jugement et de prise de décision observés par Kahneman ⁶³. Et bien des difficultés d'apprentissage au cours de la scolarité !

d. Erreurs fréquentes en mathématiques à l'école élémentaire

Par exemple, une erreur fréquente observée à l'école primaire concerne les problèmes dits « additifs » à énoncé verbal : « Louise a 25 billes. Elle a 5 billes de plus que Léo. Combien Léo a-t-il de billes ? ». La bonne réponse, respectant la logique arithmétique, est la soustraction $25-5=20$, mais souvent les enfants ne parviennent pas à inhiber l'heuristique d'addition déclenchée par le « plus que » dans l'énoncé, d'où leur réponse erronée : $25+5=30$. C'est ce que nous avons démontré expérimentalement au laboratoire en utilisant la technique de l'« amorçage négatif »⁶⁴ dont le principe a été illustré plus haut. Ce résultat est important d'un point de vue pédagogique car c'est ici le langage même du professeur (oral ou écrit) qui crée et déclenche (réactive) ce type d'heuristique et donc d'erreur générique. Il faut en avoir conscience.

Un autre exemple est la difficulté fréquente, générique, des élèves à comparer des nombres décimaux lorsque le plus grand d'entre eux contient moins de chiffres après la virgule que le plus petit : par exemple, 1,5 vs. 1,432. Les enfants répondent souvent que 1,432 est plus grand que 1,5. Ici à nouveau, nous avons démontré expérimentalement au laboratoire, encore avec la technique de l'« amorçage négatif »⁶⁵, que pour éviter ce type d'erreurs l'enfant doit apprendre à inhiber les propriétés des nombres entiers, en l'occurrence l'heuristique « Plus le nombre contient de chiffres, plus il est grand » (heuristique implicite ou explicite très forte) quand il compare des nombres décimaux. C'est aussi le cas quand les élèves

doivent comparer des fractions à numérateurs égaux : par exemple, $1/4$ vs. $1/3$. Souvent, les enfants pensent, trop rapidement (fonctionnement heuristique) que $1/4$ est plus grand que $1/3$ car 4 est plus grand que 3 !

« L'inhibition cognitive préfrontale est le processus du cerveau humain, très précieux, qui permet cette abstraction, tant chez le savant, le scientifique, que chez l'enfant. »

Pour progresser en mathématiques, qu'il s'agisse de tâches numériques non symboliques (telle la conservation du nombre de Piaget) ou symboliques (comparaison des nombres décimaux ou des fractions), le sens approximatif du nombre⁶⁶ ne suffit donc pas, ni les algorithmes exacts (comptage, calcul, etc.) – soit, le cortex pariétal (SIP). Il faut de plus l'intervention à distance (*via* des neurones à axones longs) des fonctions exécutives du cortex préfrontal, en particulier le contrôle inhibiteur⁶⁷, pour apprendre à résister aux heuristiques perceptives et cognitives qui, souvent inconsciemment (tant pour l'élève que le professeur), court-circuitent les bonnes réponses. C'est donc une explication tout à fait nouvelle d'erreurs génériques des élèves en mathématiques qui est proposée ici, liées aux fonctions exécutives – explication confortée aujourd'hui par beaucoup de professeurs des écoles des cycles 1, 2 et 3 qui nous remontent de telles heuristiques trompeuses (à inhiber) *via* la plateforme pédagogique interactive [Lea.fr](https://leaproject.org/) (*cf.* Chapitre 10 de Pascaline Citron et Marie Létang). Plusieurs études scientifiques montrent d'ailleurs que la capacité de contrôle inhibiteur (CI) mesurable dès l'école maternelle est un meilleur prédicteur de la réussite scolaire ultérieure que le classique Quotient Intellectuel (QI). Il est donc urgent d'entraîner les fonctions exécutives du cortex préfrontal à l'école, dès la maternelle (*cf.* Chapitre de Grégoire Borst), ce qui n'est pas dans les programmes scolaires, ni dans les

instructions ministérielles à ce jour, sauf à intégrer cela dans « Apprendre à apprendre ».

De surcroît, si l'on y réfléchit bien, dans l'histoire de l'humanité, les sciences et les mathématiques ont souvent dû (ou permis de) s'abstraire des biais et illusions de la perception et de la pensée. Ce sont de savants calculs, combinés aux progrès de l'instrumentation (la lunette astronomique), qui ont permis d'inhiber l'heuristique du géocentrisme (la Terre est le centre de l'Univers) pour activer, non sans mal (le procès et la condamnation de Galilée en 1633), l'algorithme exact de l'héliocentrisme (le Soleil est au centre de l'Univers et la Terre tourne à la fois sur elle-même et autour de lui, non l'inverse !). C'est la force des mathématiques et la définition même de l'abstraction en ce qu'elle a de plus puissant que d'inhiber ces biais de perception (de fait, on a l'impression de voir, par jours de beau temps, le Soleil tourner autour de la Terre). L'inhibition cognitive préfrontale est le processus du cerveau humain, très précieux, qui permet cette abstraction, tant chez le savant, le scientifique, que chez l'enfant. Et cela commence en mathématiques dès la maternelle avec des tâches aussi simples que celle des jetons de Piaget où l'on peut apprendre explicitement à l'enfant à inhiber l'heuristique « longueur = nombre ».

II. Penser-raisonner ou la genèse de la logique

Rappelons, en un premier temps, la théorie de Piaget sur la logique et le raisonnement, ainsi que les critiques faites à cette théorie. En un second temps, je présenterai une synthèse des données actuelles des sciences cognitives et du cerveau dans ce domaine : qu'est-ce que bien penser et raisonner, pour un élève ?

1 Le raisonnement logique chez l'enfant

Quand le cerveau de l'enfant ne traite pas les objets quantitativement (le nombre), il les traite qualitativement selon la forme, la couleur, la fonction, etc. : c'est la catégorisation. Il peut aussi faire les deux en même temps : par exemple, compter les objets de chaque couleur dans un tas d'objets. Catégoriser est donc une activité cognitive fondamentale, omniprésente. On sait aujourd'hui, par l'imagerie cérébrale⁶⁸, que notre cerveau n'utilise pas les mêmes régions selon qu'on catégorise, par exemple, des outils (régions liées à l'action, cortex moteur) ou des animaux (régions visuelles, cortex occipito-temporal). Ainsi, contrairement au nombre et aux mathématiques très localisés (dans le SIP du cortex pariétal), les réseaux neuronaux de la catégorisation s'inscrivent dans des endroits très différents, distribués, du cerveau selon l'expérience que l'on a des objets, des êtres ou des événements.

« On sait aujourd'hui, par l'imagerie cérébrale, que notre cerveau n'utilise pas les mêmes régions selon qu'on catégorise, par exemple, des outils (régions liées à l'action, cortex moteur) ou des animaux (régions visuelles, cortex occipito-temporal). »

Nous avons tous fait, étant petits, par jeu et par passion, des catégories ou collections d'objets divers : petites voitures, soldats, perles, etc. On continue d'ailleurs à l'âge adulte chacun chez soi ou à son travail et, lorsqu'il s'agit de science, on appelle cela des « taxinomies ». On en apprend beaucoup à l'école. De belles doubles pages en couleur des dictionnaires les illustrent, de même que des affiches sur les murs des classes. Depuis Carl von Linné (1707-1778), les taxinomies des plantes et des animaux sont sans doute les plus célèbres. La visite de sa maison près d'Uppsala, en Suède, est à cet égard émouvante : on y découvre, dans le concret du quotidien, des

étagères et petits casiers de bois qui correspondent aux catégories devenues, dans l'abstrait et pour l'histoire, des taxinomies universelles. Une fois de plus, c'est à Piaget que l'on doit d'avoir ramené cette problématique très générale, la catégorisation, à la psychologie de l'enfant⁶⁹.

a. La catégorisation et la logique des classes selon Piaget

Selon Piaget, pour catégoriser de façon logique (formes géométriques, fleurs, animaux, etc.), l'enfant doit apprendre à utiliser un système de classes (de type A, A' et B telles que $B=A+A'$, l'intersection entre A et A' étant vide), c'est-à-dire distinguer et coordonner en « compréhension » et en « extension » les classes impliquées. C'est ce qu'on appelle la logique des classes. Un exemple et quelques mots d'explication : imaginez qu'on dispose sur une table, devant l'enfant, des fleurs (B) incluant des marguerites (A) et des roses (A'). La *compréhension* (on dit aussi *l'intension* en logique) correspond à l'ensemble des ressemblances, des propriétés qui existent entre les objets à classer (les critères de catégorisation : forme, couleur, nom de fleur, etc.), alors que *l'extension* délimite l'ensemble des objets présents auxquels s'appliquent ces propriétés (par exemple, toutes les marguerites et rien que les marguerites). L'extension est donc quantifiable : l'enfant peut compter le nombre de marguerites, de roses ou de fleurs sur la table. D'où l'idée qu'a eue Piaget de tester l'enfant en lui posant une question dite de « quantification de l'inclusion ».

« La *compréhension* (on dit aussi *l'intension* en logique) correspond à l'ensemble des ressemblances, des propriétés qui existent entre les objets à classer (les critères de catégorisation : forme, couleur, nom de fleur, etc.), alors que *l'extension* délimite l'ensemble des objets présents auxquels s'appliquent ces propriétés

(par exemple, toutes les marguerites et rien que les marguerites). »

C'est la tâche d'inclusion déjà évoquée au début de la section sur le nombre et les maths, avec la tâche de sériation, pour décrire les fondements logiques du nombre. La tâche d'inclusion consiste à présenter à l'enfant, par exemple, dix marguerites (A) et deux roses (A') en lui demandant : « Y a-t-il plus de marguerites ou plus de fleurs ? » (Donc plus de A ou plus de B ?) Jusqu'à 6-7 ans, l'enfant se trompe et répond : « Plus de marguerites ! » C'était, selon Piaget, un défaut d'inclusion de la sous-classe des marguerites dans la classe des fleurs (qui inclut aussi les roses). Cette réponse verbale est une erreur d'intuition perceptive (en raison de la saillance visuelle et spatiale des dix marguerites par rapport aux deux roses) qui révèle que l'enfant n'a pas encore acquis un mode de catégorisation logique, au sens du système des classes A, A' et B défini plus haut. À partir de 6-7 ans en revanche (enfant d'école élémentaire), il devient capable de formuler des réponses correctes du type : « Plus de fleurs que de marguerites parce que les roses sont aussi des fleurs ». La logique des classes, appliquée à des objets concrets, est dès lors acquise – en même temps que le nombre selon Piaget. C'est à nouveau le fameux stade de la mise en place des opérations concrètes (nombre et catégorisation logiques), selon le modèle incrémental des stades en escalier.

b. Après Piaget : compétences logiques précoces et incompétences tardives

À la suite de ces travaux pionniers, les recherches dans ce domaine n'ont cessé de se multiplier et, comme pour le nombre, les critiques à l'égard de la théorie de Piaget n'ont pas manqué. Toutefois elles se sont d'abord développées ici en « sens inverse » de celles relatives au nombre, c'est-à-dire en mettant l'accent sur une incapacité, ou

erreur d'inclusion, tardive – non prévue par Piaget –, plutôt que sur des capacités précoces.

Durant les décennies 1970 et 1980, plusieurs psychologues du développement, Claude Voelin en Suisse, Ellen Markman aux États-Unis, Jacqueline Bideaud, Jacques Lautrey et moi-même en France⁷⁰ avons découvert qu'au stade dit de « catégorisation logique » selon Piaget (entre 7 et 12 ans), les enfants n'étaient pas logiques du tout, commettant encore une grossière erreur d'inclusion. Stades et structures de Piaget volaient ainsi en éclats ! Plutôt que de penser logiquement, l'enfant « bricole », a dit alors très habilement Bideaud⁷¹. En voici un exemple à partir du même matériel de fleurs : on demande à l'enfant qui a d'abord répondu correctement à la question d'inclusion de Piaget (en disant « Plus de fleurs ») : « Oui, mais peut-on faire quelque chose ou ne peut-on rien faire pour avoir plus de marguerites que de fleurs ? » (Donc plus de A que de B ?) Chacun d'entre nous sait que c'est impossible. Nous en sommes même absolument certains (c'est ce qu'on appelle la « nécessité logique »). L'enfant de plus de 7 ans devrait l'être aussi selon le modèle des stades de Piaget. Pourtant, il se trompe et répond, jusqu'à l'âge de 12 ans : « T'as qu'à rajouter des marguerites ou enlever des fleurs ! » Bideaud et Lautrey⁷² ont alors pensé que la catégorisation logique devait arriver bien plus tard que ne le pensait Piaget, au début de l'adolescence (un passage tardif du « bricolage cognitif », encore empirique et intuitif, à la logique). Mais n'est-on pas en présence ici d'un faux négatif, et même de deux faux négatifs : la tâche de Piaget et sa nouvelle version modifiée ? L'expression « faux négatifs » veut dire ici que le psychologue ou le professeur peut se tromper en déduisant une absence de logique (une incompétence) à partir des échecs des enfants dans ces tâches. Sur ce point (contrairement au nombre), Piaget lui-même en a fait l'aveu dans un livre ultérieur, *Vers une logique des significations*, publié de façon posthume en 1987⁷³. Il y écrit, en le démontrant expérimentalement, que, dès 5 ans, « l'inclusion ne soulève pas de

problème sauf naturellement quant aux quantifications de A, A' et B étudiées jadis [dans le livre de 1959] lorsque les A' sont bien moins nombreux que les A » (les deux roses et les dix marguerites). Piaget reconnaît donc que l'erreur de l'enfant de moins de 6 ans dans sa tâche classique d'inclusion où il y a un piège perceptif sur les extensions (tâche qui a quand même fait le tour du monde, des laboratoires et des écoles !) ne veut pas dire que l'enfant n'a pas acquis la notion d'inclusion.

Cela ne signifie pas que les tâches piagésiennes, échouées tardivement, ne sont pas de bonnes tâches cognitives, bien au contraire. L'intérêt de la psychologie expérimentale de l'enfant est qu'elle a précisément un côté « farces et attrapes ». Simplement, une fois de plus, la tâche de catégorisation de Piaget teste moins la logique en tant que telle (ici l'inclusion des classes) que la capacité de l'enfant à inhiber des interférences : dans ce cas, la prégnance perceptive créée par la très grande extension spatiale des marguerites (dix), comparativement à celle des roses (deux) – d'où l'heuristique de comparaison directe 10/2 (au lieu de 10/12). En outre, quand un adulte demande à un enfant entre 7 et 12 ans : « Peut-on faire quelque chose ou ne peut-on rien faire pour avoir plus de marguerites que de fleurs ? » et que, par ailleurs, on lui apprend à l'école, à longueur de journée, qu'en arithmétique pour avoir « plus de... » on ajoute et pour avoir « moins de... » on enlève, tout porte à croire que ce qui pose réellement problème à l'enfant n'est pas l'inclusion des classes elle-même – en accord avec Piaget cette fois. C'est plutôt l'inhibition de la stratégie habituelle (l'heuristique) d'ajout et de retrait, suractivée par la formulation de la question qui joue sur l'ambiguïté. Mais comment le mesurer ?

Des algorithmes logiques, déjà chez le bébé et le jeune enfant

Comme pour le nombre, après Piaget, durant les décennies 1980 et 1990, des capacités beaucoup plus précoces de catégorisation logique chez le jeune enfant et le bébé ont été découvertes. Il y a déjà le constat de Piaget⁷⁴ lui-même, évoqué ci-dessus. Plutôt que de piéger l'enfant d'école maternelle sur les extensions perceptives des A et des A', Piaget, dans ses derniers travaux, lui présentait un modèle figurant clairement l'inclusion : un tout B représenté par un cercle et séparé en deux parties A et A' au moyen d'une ligne. Il faisait alors raisonner l'enfant, pour les mêmes objets (toujours les marguerites et les roses, par exemple), sur leur propriété commune (B) et sur leurs propriétés différenciées (A et A'). Dans ces conditions, dès 5 ans l'enfant manifeste qu'il a très bien compris l'inclusion de la sous-classe des A (comme des A') dans la classe des B. À partir d'une tâche de choix orienté (un peu comme un « QCM d'objets »), j'ai moi-même démontré⁷⁵ qu'au même âge, l'enfant de grande section de maternelle est capable de regrouper (trier) les objets (animaux, meubles, véhicules, vêtements, nourriture, etc.) selon un mode de catégorisation taxinomique, c'est-à-dire fondé sur un critère général d'inclusion logique. Ce critère est déjà indépendant des proximités ou contiguïtés spatiales (scènes) ou temporelles (scripts) entre les objets de la vie quotidienne (par exemple, l'enfant qui regroupe un lion et une poule, jamais observés ensemble, parce qu'ils sont de la même catégorie générale des animaux, ou encore un fauteuil de plage et une commode de chambre parce qu'ils sont des meubles, etc.).

D'autres chercheurs sont allés plus loin encore et ont trouvé des traces de catégorisation taxinomique dans les activités perceptives des bébés⁷⁶. En outre, à partir d'observations très fines de séquences de manipulation d'objets, Jonas Langer⁷⁷ a décrit l'existence d'une protologie des classes dès la première année de la vie du bébé, entre 6 et 12 mois. Cette logique est dite « pragmatique » dans le sens où elle n'existe que dans les actions du bébé. Par ailleurs, il est maintenant établi que les bébés

manifestent au niveau de leurs réactions visuelles des capacités de pur raisonnement logique⁷⁸. Dans cette étude, des bébés de 12 mois manifestaient des attentes visuelles très précises à propos d'événements à venir. Ils prédisaient parfaitement ces événements, comme de petits scientifiques, en fonction de variables qu'ils manipulaient mentalement de façon systématique et rationnelle : le nombre d'objets, leur arrangement physique et leur temps de disparition. Les chercheurs en ont conclu que les réactions visuelles des bébés sont formellement cohérentes avec celles d'un système statistique bayésien (probabiliste et déductif) capable d'abstraire des principes généraux sur le mouvement des objets. D'autres études, menées dans le même esprit, ont révélé que les bébés utilisent déjà des patterns statistiques pour tester des hypothèses causales à propos de séries d'images, de phrases parlées, etc. Et c'est grâce à ce cerveau « proto-logique et mathématique » – en apparence passif mais très actif et lucide – que le monde vient aux bébés⁷⁹.

c. Heuristiques de catégorisation, algorithmes logiques et inhibition

Au laboratoire, nous avons démontré le coût de l'inhibition dans une version informatisée de la tâche piagétienne classique d'inclusion : « plus de marguerites ou plus de fleurs ? »⁸⁰. La mesure utilisée était à nouveau l'« amorçage négatif », dont le principe a déjà été décrit pour le réexamen de la tâche piagétienne de conservation du nombre. Dans ce cas, la procédure expérimentale consiste à réaliser une simple comparaison perceptive *directe* de type A-A', les deux sous-classes (10 marguerites et 2 roses), après avoir dû inhiber cette heuristique pour comparer A à B (l'inclusion logique). La levée d'inhibition se traduit alors par un temps de réponse supplémentaire. C'est ainsi qu'est mesuré l'« effort de résistance cognitive » à la comparaison A-A' pour appliquer l'algorithme exact d'inclusion des classes ($B=A+A'$). Les résultats indiquent que cet

effort de résistance du cerveau s'observe chez les enfants d'école primaire comme chez les adultes, où il est moindre mais encore nécessaire.

Ainsi, qu'il s'agisse de nombres ou de classes logiques (catégories), les pièges de la pensée sont tels dans le monde perceptif, les heuristiques si puissantes qu'il faut à notre cerveau (le cortex préfrontal), celui de l'enfant en particulier, résister en permanence sur tous les fronts. Pour tester cette dimension de l'intelligence ou du « penser-raisonner », les problèmes piagétien (ou néopiagétien) restent aujourd'hui de très bonnes tâches en psychologie du développement. Mais l'interprétation théorique a changé. C'est ainsi que progresse la science des enfants !

« Qu'il s'agisse de nombres ou de classes logiques (catégories), les pièges de la pensée sont tels dans le monde perceptif, les heuristiques si puissantes qu'il faut à notre cerveau (le cortex préfrontal), celui de l'enfant en particulier, résister en permanence sur tous les fronts. »

En outre, ce processus inhibiteur de résistance cognitive est dit « interdomaines ». Borst et al⁸¹ a démontré, par la mesure des temps de réponse, que résister aux pièges dans une tâche de conservation du nombre (celle des jetons analysée plus haut) aidait le cerveau à résister dans une tâche d'inclusion des classes. Ce transfert entre les domaines du nombre et de la catégorisation illustre, en termes neurocognitifs, un élan *général* de résistance qui se caractérise, dans ce cas, par un effet d'amorçage positif, c'est-à-dire une réponse plus rapide d'une tâche piège à l'autre. L'architecture cognitive du cerveau s'interconnecte ainsi sur un mode inhibiteur efficace.

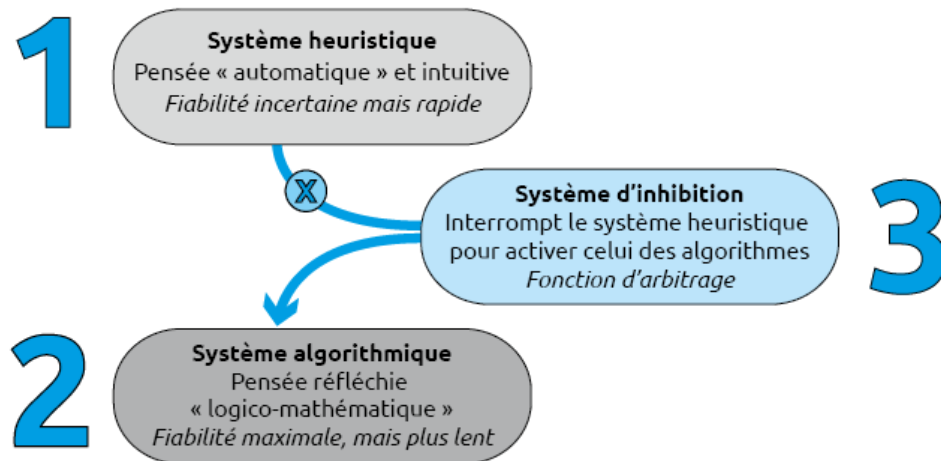
D'autres problèmes plus classiques de logique illustrent ce point chez l'enfant d'école élémentaire, par exemple les syllogismes. Pour

tester la solidité du raisonnement d'un enfant, dites-lui que (a) les éléphants sont des mangeurs de foin et que (b) les mangeurs de foin ne sont pas lourds. Demandez-lui ensuite si cela veut dire que (c) les éléphants sont lourds. Les enfants d'école élémentaire (6-12 ans) répondent souvent « oui », alors que rien ne permet à leur cerveau de déduire logiquement cette conclusion des prémisses du syllogisme, c'est-à-dire des deux premières phrases (a et b). Il a été démontré que la difficulté de ce type de tâche de raisonnement, au cours du développement, est de parvenir à inhiber le contenu sémantique de la conclusion (réseaux du cerveau dits « sémantiques » ou « de connaissances générales »), c'est-à-dire ici la forte croyance des enfants quant au poids des éléphants⁸². D'où leur réponse trop rapide et erronée. L'heuristique est ici *la crédibilité*, selon laquelle en général « les éléphants sont lourds », alors que l'algorithme exact est *la validité logique* de l'énoncé (syllogisme, si-alors), qui fait raisonner sur la structure même du texte.

En fait, il y a trois systèmes dans le cerveau. L'un est rapide, automatique et intuitif (système 1). L'autre est plus lent, logique et réfléchi (système 2). Un troisième système, sous-tendu par le cortex préfrontal, permet d'arbitrer, au cas par cas, entre les deux premiers systèmes. C'est ce système 3 qui assure l'inhibition des automatismes de pensée (ceux du Système 1 : par exemple, « longueur = nombre », « les éléphants sont lourds », etc.) quand l'application de la logique (système 2) est nécessaire. Chez l'enfant, les deux premiers systèmes se développent en parallèle, car le bébé – ainsi qu'on l'a vu – a déjà des capacités proto-numériques et proto-logiques, mais le troisième système et sa capacité inhibitrice arrivent plus tard. Ce cerveau dit « exécutif » dépend non seulement de la maturation lente du cortex préfrontal⁸³, mais aussi d'entraînements exécutifs intenses, ciblés sur le contrôle inhibiteur⁸⁴.

Figure 8. Les trois systèmes cognitifs du cerveau logico-mathématique.

Heuristiques approximatives (D. Kahneman), algorithmes exacts (J. Piaget) et système inhibiteur (O. Houdé).



2 Le raisonnement logique chez l'adolescent

À la fin de son monumental ouvrage sur le raisonnement et la prise de décision chez l'adulte, *Système 1, Système 2 : les deux vitesses de la pensée*, Daniel Kahneman⁸⁵, Prix Nobel d'économie en 2002, se demandait à propos des adultes : que peut-on faire pour éviter les biais ou heuristiques du Système 1, trop rapide et intuitif ? C'est évidemment une question qui doit se poser, selon moi, dès l'école (primaire, collège et lycée). C'est *Apprendre à résister*⁸⁶. Il s'agit sans doute de l'une des missions principales des professeurs aujourd'hui dans le monde d'Internet, des *fake news*, de la radicalisation fondée sur des pseudo-déductions, de l'heuristique de l'affect (*liker*) suractivée sur les réseaux sociaux et du communautarisme galopant, ... plutôt que du raisonnement logique décentré et de l'esprit critique, inhibant les faux savoirs.

Dans un livre que j'ai consacré à cette question spécifique, *Le Raisonnement*⁸⁷, j'ai avancé l'idée du système 3 de « résistance cognitive » (inhibition), qui permet au cas par cas, grâce au cortex préfrontal, de bloquer le système 1 de raisonnement pour activer le

Système 2 (la logique), plus lent et réfléchi. Les exemples précédents de ce chapitre chez l'enfant (nombre et maths, catégorisation logique) l'ont déjà bien illustré. Pour le raisonnement proprement dit, à propos d'idées, d'hypothèses et de propositions logiques, cela peut être démontré à partir d'un exemple simple.

a. La logique formelle de Piaget s'observe-t-elle dans le cerveau des adolescents et des adultes ?

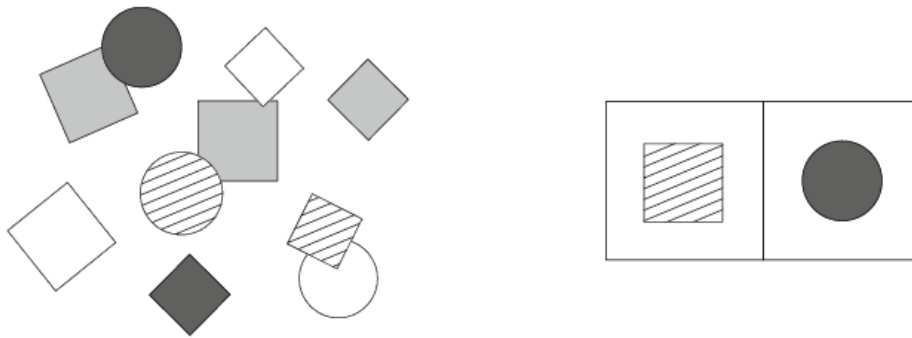
Rappelons d'abord que selon Piaget, à partir de l'adolescence nous atteignons le stade de la logique formelle ou « hypothético-déductive » achevée, celle du logicien. C'est la dernière marche de l'escalier qui doit nous rendre (selon Piaget toujours) définitivement rationnels pour la vie. Or, ce n'est pas du tout le cas comme l'a très bien démontré Kahneman⁷¹ : les adultes sont plutôt illogiques dans leurs jugements, biaisés par leurs heuristiques, le plus souvent inconsciemment. En voici un exemple, qui vaut aussi chez l'adolescent, et que nous avons étudié finement au laboratoire avec les techniques de la psychologie expérimentale et de l'imagerie cérébrale. Vous pouvez réaliser vous-même cet exercice de logique pour tester votre cerveau. Prenez une feuille blanche et des feutres de couleur.

« les adultes sont plutôt illogiques dans leurs jugements, biaisés par leurs heuristiques, le plus souvent inconsciemment. »

Il s'agit d'une tâche de raisonnement déductif ou conditionnel de type « si-alors ». La partie « si... » (l'antécédent) correspond à l'hypothèse et la partie « alors... » (le conséquent) à la déduction. Soit, la règle : « S'il n'y a pas de carré rouge à gauche, alors il y a un cercle jaune à droite. » Cette règle peut être vérifiée ou invalidée dans un test logique en manipulant une table de vérité appliquée à

l'antécédent et au conséquent : VV, VF, FV ou FF (V pour vrai, F pour faux). La réponse « carré bleu à gauche, cercle jaune à droite » (VV) vérifie la règle, alors que la réponse « carré bleu à gauche, losange vert à droite » (VF) l'invalide (il y a d'autres réponses VV et VF possibles). Les cas de figures FV ou FF ne peuvent pas invalider la règle, car l'antécédent est faux (la règle est alors non applicable, on est « hors condition »).

Figure 9. Tâche de falsification de règles conditionnelles (si-alors) et heuristique d'appariement perceptif.



La consigne est de sélectionner deux formes qui rendent la règle fausse ; par exemple pour la règle « S'il n'y a pas de carré rouge à gauche, alors il y a un cercle jaune à droite » (gauche/droite sont les deux cases), une bonne réponse est un carré bleu à gauche et un losange vert à droite (il y a d'autres bonnes réponses possibles), mais la réponse erronée, très souvent observée, est un carré rouge à gauche et un cercle jaune à droite. C'est l'heuristique « d'appariement perceptif » (au sens d'appariement avec les deux formes citées dans la règle), heuristique dominante tant chez les adolescents que les adultes.

Si l'on demande aux gens d'invalider la règle « s'il n'y a pas de carré rouge à gauche, alors il y a un cercle jaune à droite », ils se trompent très souvent. C'est un piège cognitif. En effet, on se laisse ici directement influencer par la négation au début de la phrase (« s'il n'y a pas ») et on choisit, pour invalider la règle, un carré rouge à

gauche et un cercle jaune à droite (ce réflexe d'appariement avec les deux formes citées dans la règle vient sans doute de réactions habituelles comme penser au chocolat toute la journée, pour un enfant, quand on lui dit qu'il ne reste plus de glace au chocolat ; ou penser à un éléphant rose si je vous dis de ne pas imaginer un éléphant rose – vous en faites irrésistiblement l'image mentale). C'est un puissant biais (une heuristique) d'appariement perceptif avec les éléments cités dans la règle (système 1) car la réponse logique (système 2), rare spontanément, est par exemple un carré bleu à gauche et un losange vert à droite (c'est-à-dire l'algorithme exact antécédent vrai, pas de carré rouge, conséquent faux, pas de cercle jaune : VF). Il faut donc inhiber le carré rouge et le cercle jaune ! Si vous avez des difficultés à comprendre, c'est normal, car ce biais cognitif vous concerne en tant qu'adulte. Il défie votre cortex préfrontal. De la même façon que le biais ou l'heuristique « longueur = nombre » concernait l'enfant d'école maternelle.

Au laboratoire, nous avons testé l'efficacité de différentes conditions d'apprentissage pour corriger ce biais :

1. **L'inhibition** de la stratégie d'appariement : alertes sur le risque d'erreur et la nature du piège perceptif à éviter ; action effective d'inhibition avec un dispositif pédagogique « d'Attrape-piège » où glisser la réponse heuristique erronée sous une zone hachurée) ;
2. **L'explication logique** du raisonnement : instructions verbales strictement à propos du principe de la table de vérité VF ;
3. **La simple répétition de la tâche** : ce dernier type d'apprentissage étant un contrôle qui correspond aux effets de la pratique.

Seul l'apprentissage de l'inhibition s'est révélé efficace : le taux de réussite, initialement inférieur à 10 % dans la tâche (donnée en pré-test), est devenu supérieur à 90 % (post-test). Cela indique que c'est bien ce mécanisme exécutif de blocage, de résistance cognitive (l'intervention du système 3) qui faisait défaut aux individus interrogés, et non pas la logique en tant que telle (système 2) ni la pratique. Dans ces deux dernières conditions, le taux d'erreur est

resté comparable au niveau initial, la simple répétition favorisant même l'automatisme.

Nous avons alors poursuivi l'expérience en imagerie cérébrale avec la Tomographie par Émission de Positrons (TEP) afin d'observer ce qui se passait dans le cerveau des individus avant et après l'apprentissage de l'inhibition de la stratégie perceptive (entraînement du système 3), c'est-à-dire *avant* et *après* la correction effective de l'erreur de raisonnement. Les participants adultes étaient introduits deux fois (pré- et post-tests) dans la caméra d'imagerie cérébrale, l'apprentissage étant réalisé hors caméra. **C'était en 2000** la toute première expérience que l'on peut réellement qualifier de « neuropédagogique »⁸⁸, ainsi que je l'analyse, avec le recul, dans *L'École du cerveau*⁸⁹.

« Les résultats ont montré que, lors de la correction de l'erreur après l'apprentissage de l'inhibition (post-test), il s'opérait une très nette modification neuronale. Avant l'apprentissage, c'était la partie arrière du cerveau, un réseau neuronal postérieur, qui travaillait. Après l'apprentissage, c'était la partie avant, préfrontale, qui travaillait. »

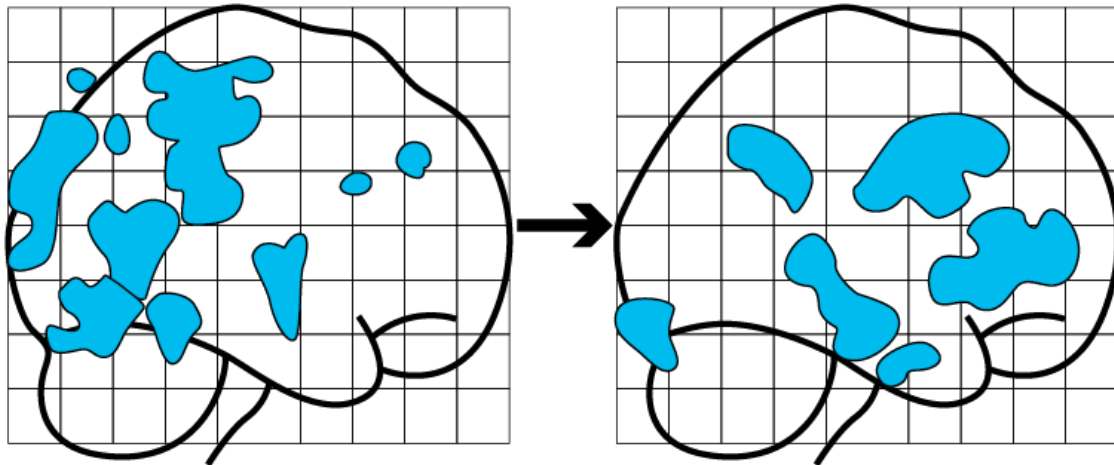
Lorsqu'ils étaient dans la caméra, les participants lisaient sur un mini-écran d'ordinateur la règle logique (« S'il n'y a pas de carré rouge à gauche, alors il y a un cercle jaune à droite »), puis ils devaient choisir avec la souris deux formes parmi douze présentées à l'écran (carrés, cercles ou losanges, bleus, jaunes, rouges ou verts) pour invalider cette règle, selon le principe du test. Ils glissaient les deux formes choisies dans une double case de réponse (gauche/droite). Une série de règles « si-alors » du même type, préalablement programmées, s'enchaînaient ainsi et l'ordinateur stockait les réponses (une liste de paires de formes) de chaque participant dans un fichier, alors même

que son activité neuronale était enregistrée sur l'ensemble du cerveau.

Les résultats ont montré que, lors de la correction de l'erreur après l'apprentissage de l'inhibition (post-test), il s'opérait une très nette modification neuronale. Avant l'apprentissage, c'était la partie arrière du cerveau, un réseau neuronal *postérieur*, qui travaillait (réseau associé à la réponse heuristique d'appariement perceptif : carré rouge, cercle jaune). Après l'apprentissage, c'était la partie avant, préfrontale, qui travaillait (réseau *antérieur*, associé à l'inhibition du biais d'appariement perceptif et à la réponse logique : carré bleu, losange vert). Et, de façon paramétrique, il a ensuite été remarquablement démontré – lors d'une réplication de l'expérience par d'autres chercheurs – que plus la règle logique exige d'inhiber le biais perceptif (l'heuristique), plus l'activation préfrontale est grande⁹⁰. Cette situation emblématique est le cas pédagogique où le cerveau des élèves doit penser, prendre du recul. Tels les prisonniers de la caverne de Platon, les élèves découvrent, avec effort, la logique de la tâche, c'est-à-dire l'algorithme exact, le Vrai !

Figure 10. Visualisation par l'imagerie cérébrale d'un effort d'attention et de contrôle inhibiteur.

Cet effet a été observé chez des élèves lors d'une tâche de raisonnement logique, avant (à gauche) et après (à droite) un apprentissage métacognitif, portant sur l'inhibition d'un biais (ou heuristique), réalisé en interaction sociale réelle avec un professeur. (D'après O. Houdé et al., 2000).



b. Un exemple cognitif de variation/sélection neuronale selon Changeux : test de vérité

Il ne suffit donc pas d'avoir atteint, à l'adolescence, le stade des opérations logiques formelles de Piaget (système 2) pour être définitivement « préfrontal » et logique. Avec cet exemple, on constate que : (a) dans le cerveau en action, à tout moment, y compris chez l'adulte, plusieurs stratégies de raisonnement (variation) peuvent se télescoper, entrer en compétition, les biais perceptifs (à l'arrière du cerveau) prenant alors le pas sur les réponses logiques dès la présence d'un piège (le constat de Kahneman sur la dominance du système 1) ; (b) c'est l'inhibition cognitive préfrontale (sélection), déclenchée ici par un apprentissage expérimental (système 3), qui se révèle être la clé de l'accès à la logique (système 2).

« Le développement social de l'enfant est lui-même caractérisé par un mécanisme d'inhibition (comme dans les aspects cognitifs), mécanisme qui joue un rôle-clé pour apprendre à considérer le point de vue d'autrui. »

Cette expérience illustre donc de façon dynamique (compétition/sélection neuronale) comment peut se mettre en place un processus d'abstraction dans le cerveau humain, d'un piège perceptif vers la logique. Ici, comme chez l'enfant, mais à un niveau de complexité accrue, bien raisonner c'est « apprendre à résister »⁹¹. Ce résultat d'imagerie cérébrale du raisonnement, sous l'impact de l'apprentissage, illustre concrètement la théorie de Changeux (cf. Chapitre 1⁹²) à propos de la variation/sélection neuronale entre les niveaux de l'entendement (synthèse des éléments sensibles) et de la raison. C'est l'acquisition de connaissances – telle qu'elle peut se déployer à l'école – et la mise à l'épreuve de leur vérité logique par le cerveau : l'erreur (test échoué), suivie de sa correction.

3 Penser-raisonner pour respecter autrui

Dans son chapitre introductif, *Apprendre avec ses neurones*, J.-P. Changeux souligne aussi, en conclusion, que l'Homme devrait s'engager à utiliser les facultés créatrices qu'il possède dans son cerveau pour inventer un « modèle éthique » qui tranche avec les violences, les intolérances et les crimes de notre passé culturel, et assure plus efficacement la survie et le 'bien-vivre' de l'humanité. C'est dès l'école, par le vivre ensemble et l'apprentissage du respect d'autrui que l'épigenèse du cerveau doit y être éveillée, écrit-il. Dans cet esprit, nous venons de réaliser, en collaboration avec Alain Berthoz (Collège de France), une étude qui identifie les mécanismes du « cerveau social » susceptibles d'être éduqués en ce sens⁹³. La question du contrôle cognitif (fonctions exécutives, inhibition) ne concerne pas seulement les apprentissages scolaires classiques, tels

que compter, penser ou raisonner (dans les exemples précédents), mais aussi le contrôle de soi pour la tolérance et la paix⁹⁴.

En effet, le développement social de l'enfant est lui-même caractérisé par un mécanisme d'inhibition (comme dans les aspects cognitifs), mécanisme qui joue un rôle-clé pour apprendre à considérer le point de vue d'autrui⁶¹. Dans cette étude, des enfants d'âge scolaire (10 ans) et des adultes devaient imaginer la perspective corporelle et spatiale d'un autre, différente de la leur : personnage de face ou de dos. Avec un paradigme expérimental « d'amorçage négatif » (déjà décrit), nous avons mesuré, grâce à la chronométrie mentale en millisecondes, l'effort spécifique d'inhibition lors de cette tâche d'adaptation sociale.

Les résultats ont indiqué que, tant les adultes que les enfants, devaient inhiber leur propre point de vue, égocentré – ce qui était coûteux cognitivement – à chaque fois qu'ils voulaient activer le point de vue de l'autre. C'est un « biais asocial » que Piaget appelait la « centration » (ou égocentrisme), mais qui, contrairement à ce qu'il pensait, ne disparaît pas (décentration) avec le stade des opérations logiques à 7 ans. Dans le cerveau humain, l'heuristique égocentrée (toujours le système 1) persiste et domine ! Il faut constamment y résister.

Déjà Montaigne, dans ses *Essais*, se disait effaré par l'égocentrisme et le sociocentrisme des adultes, dont l'ancrage est d'abord physiologique et corporel. « Nos yeux ne voient rien en arrière » écrivait-il ! Et cet égocentrisme corporel devient rapidement cognitif et moral. Apprendre à inhiber (système 3) dès l'enfance cet égocentrisme du cerveau (heuristique du système 1), c'est éduquer à la tolérance (système 2 ou algorithme de coordination logique des points de vue). Il s'agit de se construire une « théorie de l'esprit » (du point de vue) du cerveau de l'autre et, surtout, l'exercer⁹⁵. Outre le cortex préfrontal pour l'inhibition de l'heuristique égocentrée, on sait que cette aptitude sociale de « théorie de l'esprit », décentrée, mobilise l'activation du sillon temporal supérieur (STS)⁹⁶. Raisonner,

c'est aussi raisonner sur et pour autrui.

Ainsi, tant pour les aspects cognitifs et scolaires (maths et logique), que psychosociaux (décentration sociale et tolérance), apprendre à apprendre, c'est bien souvent inhiber, en partie, son propre cerveau, pour soi-même (corriger ses erreurs) ou pour le respect d'autrui.

« Tant pour les aspects cognitifs et scolaires (maths et logique), que psychosociaux (décentration sociale et tolérance), apprendre à apprendre, c'est bien souvent inhiber, en partie, son propre cerveau, pour soi-même (corriger ses erreurs) ou pour le respect d'autrui. »

Cette fonction d'inhibition, de résistance, du cortex préfrontal, testée ici par une procédure de psychologie expérimentale dans une tâche d'adaptation sociale, rejoint les intérêts premiers de l'éducation nouvelle, tant Montessori que Freinet : servir la paix de l'humanité⁹⁷. C'était une préoccupation, de leur part, à l'époque terrible des deux dernières guerres mondiales. Cela l'est à nouveau aujourd'hui dans l'actualité du terrorisme mondial.

Cette éducation du « cortex préfrontal éthique » (pour le Bien) correspond à l'esprit critique et de tolérance que la jeunesse doit cultiver, pour l'école, contre la terreur. La neuropédagogie peut y contribuer.

Conclusion

Après Piaget, les sciences cognitives et du cerveau ont permis de découvrir à la fois des compétences logico-mathématiques (nombre, catégorisation, raisonnement) très précoces chez le jeune enfant d'école maternelle et même le bébé. L'état dit « de départ » du cerveau de l'enfant quand il arrive à l'école, dès la Petite Section, est donc beaucoup plus riche (même extraordinairement plus riche) sur le plan cognitif que ne l'imaginent en général les professeurs. C'est

de « cette matière première » qu'il faut partir pour aller plus loin. Par exemple, pour combiner le sens visuospatial précoce du nombre, déjà présent dans le sillon intra-pariétal (SIP) du cortex pariétal, et les principes de comptage à travers le langage et l'action, renforcer les algorithmes logico-mathématiques exacts, mais aussi apprendre à inhiber, grâce à son cortex préfrontal, les heuristiques approximatives du « compter-penser », qu'elles soient visuospatiales ou sémantiques et linguistiques. Le cerveau est à la fois fort (les compétences précoces) et fragile (les incompétences tardives) jusqu'à l'adolescence et même l'âge adulte. C'est à l'école de lui apprendre à se contrôler, corriger ses biais, tant pour bien raisonner à propos des objets physiques qu'à propos des êtres humains ; dans ce dernier cas, le respect d'autrui nécessite d'inhiber l'heuristique égocentrée.

Les Essentiels

- Dans le cerveau humain, il existe pour compter et raisonner (a) des compétences plus précoces que ne l'imaginait Piaget chez les bébés et les jeunes enfants – bien avant l'école – et (b) des incompétences plus tardives, persistantes, chez les enfants plus grands, les adolescents et même les adultes.
- Une région spécifique du cerveau des bébés, le cortex cingulaire antérieur (CCA) dédié à la détection de conflits cognitifs, s'active lorsqu'on leur présente visuellement des erreurs de calcul de type $1 + 1 = 1$ ou $2 - 1 = 2$ pour de petits nombres, mais aussi pour de grands nombres ($5 + 5 = 5$ ou $10 - 5 = 10$), alors que cette région ne s'active pas (aucune surprise du bébé) face aux bons résultats : $1 + 1 = 1$, $2 - 1 = 2$ ou $5 + 5 = 10$, $10 - 5 = 5$. Il semble donc que le bébé humain soit doté très tôt d'une capacité à effectuer des opérations mathématiques et à détecter des erreurs. D'autres chercheurs ont découvert leur aptitude à discriminer des nombres aussi grands que 8 vs. 16 ou 16 vs. 32, par exemple.
- L'imagerie cérébrale a clairement démontré que le cortex pariétal, en particulier son épiceutre le sillon intra-pariétal (SIP), est le siège de ce sens du nombre (ou des quantités) chez le bébé jusqu'aux calculs et raisonnements plus complexes chez l'enfant et l'adulte (Dehaene). Associé à la comptine numérique et à l'acquisition du principe de cardinal en maternelle, un bon sens visuel du nombre permet de mieux rentrer dans les apprentissages plus formels des cycles scolaires suivants.
- Toutefois, pour progresser en maths, qu'il s'agisse de tâches numériques non symboliques ou symboliques, le sens du nombre (Dehaene) ne suffit pas, ni les algorithmes exacts (comptage, calcul, etc.) – soit, le cortex pariétal (SIP). Il faut, en complément, l'intervention des fonctions exécutives du cortex préfrontal, en particulier le contrôle inhibiteur (Houdé), pour apprendre à résister aux heuristiques qui, souvent

inconsciemment (tant pour l'élève que pour le professeur), court-circuitent les bonnes réponses.

- C'est aussi vrai dans le domaine de la catégorisation logique et du raisonnement où il existe des compétences plus précoces que ne l'imaginait Piaget chez les bébés et les jeunes enfants. Néanmoins à tous les âges – enfants plus grands, adolescents et même adultes – des heuristiques de raisonnement trop rapides surgissent dans le cerveau (Kahneman). C'est à l'école d'apprendre à les inhiber. Outre les maths et la logique, c'est également vrai du respect d'autrui pour lequel il faut inhiber l'heuristique égocentrée et imaginer le point de vue de l'autre.

1. Piaget J., Inhelder B., *La psychologie de l'enfant*, PUF, 1966.
2. Piaget J., Szeminska A., *La genèse du nombre chez l'enfant*, Delachaux & Niestlé, 1941.
3. Gréco P. (1962). Quantité et quotité. In Gréco P., Morf A. (Eds.), *Structures numériques élémentaires*, PUF, 1962.
4. Gelman R., Gallistel C., *The Child's Understanding of Number*, Harvard University Press, 1978 ; Gelman R., Meck E. (1983). Preschooler's counting. *Cognition*, 13, 343-359 ; Gelman R., Meck E., Merkin S. (1986). Young children's numerical competence. *Cognitive Development*, 1, 1-29.
5. Greeno J., Riley M., Gelman R. (1984). Conceptual competence and children's counting. *Cognitive Psychology*, 16, 94-143 ; Houdé O. (1995). The concept of number, the principles-before-skills hypothesis, and the know-when in numerical reasoning. *Current Psychology of Cognition*, 14, 732-737.
6. Gelman R. (1972). Logical capacity of very young children. *Child Development*, 43, 75-90.
7. Bideaud J., Meljac C., Fischer J.-P. (Eds.), *Les chemins du nombre*, PUL, 1991 ; Fayol M., *L'acquisition du nombre*, PUF, 2012.
8. Mehler J., Bever T. (1967). Cognitive capacity of very young children. *Science*, 158, 141-142.
9. Houdé O. et al. (2001). Access to deductive logic depends on a right ventromedial prefrontal area devoted to emotion and feeling: Evidence from a training paradigm. *NeuroImage*, 14, 1486-1492.
10. Damasio A., *Le sentiment même de soi. Corps, émotion, conscience*, Odile Jacob, 1999 ; Damasio A., Carvalho G. (2013). The nature of feelings: Evolutionary and neurobiological origins. *Nature Reviews Neuroscience*, 14, 143-152.
11. Wynn K. (1992). Addition and subtraction by human infants. *Nature*, 358, 749-750.
12. Berger A., Tzur G., Posner M. (2006). Infant brains detect arithmetic errors. *PNAS*, 103, 12649-12653.
13. Houdé O. (1997). Numerical development: From the infant to the child. Wynn's (1992) paradigm in 2- and 3-year-olds. *Cognitive Development*, 12, 373-392.
14. Wynn, K. (1998). Psychological foundations of numbers. *Trends in Cognitive Sciences*, 2, 296-303.
15. Simon T. (1997). Reconceptualizing the origins of number knowledge: A non-numerical account. *Cognitive Development*, 12, 349-372.
16. Simon T. (1998). The foundations of numerical thinking in a brain without numbers. *Trends in Cognitive Sciences*, 3, 363-365.
17. Wynn K. (2000). Findings of addition and subtraction in infants are robust and consistent. *Child Development*, 71, 1535-1536.
18. Koechlin E., Dehaene S., Mehler J. (1997). Numerical transformations in five-month-old human infants. *Mathematical Cognition*, 3, 89-104 ; Simon T., Hespos S., Rochat P. (1995). Do infants understand simple arithmetic ? A replication of Wynn (1992). *Cognitive Development*, 10, 253-269.
19. Hauser M. et al. (2002). The faculty of language: What is it, who has it, and how did it evolve?. *Science*, 298, 1569-1579.
20. Xu F., Garcia V. (2008). Intuitive Statistics by 8-Month-Old Infants, *PNAS*, 105, 5012-5015.
21. McCrink K., Wynn K. (2004). Large-number addition and subtraction by 9-month-old infants. *Psychological Science*, 15, 776-781.

22. Voir aussi, pour la discrimination des grands nombres 8 vs. 16 ou 16 vs. 32 par exemple, Xu F., Spelke E. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, 74, 1-11 ; Xu F., Spelke E., Goddard S. (2005). Number sens in human infants. *Developmental Science*, 8, 88-101.
23. Voir l'ouvrage *La bosse des maths* de S. Dehaene, Odile Jacob, 2010.
24. Almaric M., Dehaene S. (2016). Origins of the brain networks for advanced mathematics in expert mathematicians. *PNAS*, 113, 4909-4917.
25. Pesenti M. et al. (2001). Mental calculation in a prodigy is sustained by right prefrontal and medial temporal areas. *Nature Neuroscience*, 4, 103-108.
26. Voir notamment Ansari D. et al. (2005). Neural correlates of symbolic number processing in children and adults. *NeuroReport*, 16, 1769-1773 ; Beran M. (2008). The evolutionary and developmental foundations of mathematics. *PLoS Biology*, 6, e19 (online) ; Cantlon J. et al. (2006). Functional imaging of numerical processing in adults and 4-year-old children. *PLoS Biology*, 4, e125 (online) ; Prado J., Mutreja R., Booth J. (2014). Developmental dissociation in the neural responses to simple multiplication and subtraction problems. *Developmental Science*, 17, 537-552.
27. Houdé O. et al. (2010). Mapping numerical processing, reading, and executive functions in the developing brain: An fMRI meta-analysis on 52 studies including 842 children. *Developmental Science*, 13, 876-885.
28. *Ibid.*, Pesenti et al., 2001.
29. Dehaene S., *La bosse des maths, 15 ans après*, Odile Jacob, 2010.
30. Nieder A. (2005). Counting on neurons: The neurobiology of numerical competence. *Nature Reviews Neuroscience*, 6, 177-190 ; Nieder A., Miller E. (2004). A parieto-frontal network for visual numerical information in the monkey. *PNAS*, 101, 7457-7462 ; Wynn K. (1998). Psychological foundations of numbers. *Trends in Cognitive Sciences*, 2, 296-303.
31. Dehaene S., Cohen, L. (2007). Cultural recycling of cortical maps. *Neuron*, 56, 384-398.
32. *Ibid.*, Dehaene, 2010.
33. Hauser M., *À quoi pensent les animaux ?*, Odile Jacob, 2000.
34. Hodent C., Bryant P., Houdé O. (2005). Language-specific effects on number computation in toddlers. *Developmental Science*, 8, 420-423 ; Houdé O., Tzourio-Mazoyer N. (2003). Neural foundations of logical and mathematical cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 4, 507-514.
35. Karmiloff-Smith A., *Beyond modularity: A developmental perspective on cognitive science*, The MIT Press, 1992 ; Karmiloff-Smith A. (1999). La pensée en développement. In Dortier J.-F. (Éd.), *Le cerveau et la pensée*, Sciences Humaines Éditions, p. 319-321.
36. Siegler R., *Intelligence et développement de l'enfant*, De Boeck, 2000 ; Siegler R., *Enfant et raisonnement*, De Boeck, 2001 ; Siegler R. (2016). Continuity and change in the field of cognitive development and in the perspectives of one cognitive developmentalist. *Child Development Perspectives*, 10, 128-133.
37. Gilmore C., McCarthy S., Spelke E. (2007). Symbolic arithmetic knowledge without instruction. *Nature*, 447, 589-591.
38. *Ibid.*, Dehaene, 2010.
39. Pour une synthèse récente, voir Szudlarek A., Brannon E. (2017). Does the approximate number system serve as a foundation for symbolic mathematics? *Language, Learning and Development*, 13, 171-190. Voir aussi Gilmore C., McCarthy S., Spelke E. (2010). Non-symbolic arithmetic abilities and mathematics achievement in the first year of formal schooling. *Cognition*, 115, 394-406 ; et le Focus de Jérôme Prado ici même.
40. Wilson A. et al. (2006). Principles underlying the design of "The Number Race", an adaptive computer game for remediation of dyscalculia. *Behavioral and Brain Functions*, 2, 19.
41. Diamond A. et al. (2007). Preschool program improves cognitive control. *Science*, 318, 1387-1388 ; Diamond A., Lee K. (2011). Interventions shown to aid executive function development in children 4 to 12 years old. *Science*, 333, 959-964 ; Diamond A., Ling D. (2016). Conclusions about interventions, programs, and approaches for improving executive functions that appear justified and those that, despite much hype, do not. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 18, 34-48 ; voir également le chapitre 7 sur les fonctions exécutives.
42. Casey B.J. et al. (2005). Imaging the developing brain: What have we learned about cognitive development?. *Trends in Cognitive Sciences*, 9, 104-110 ; Changeux J.-P., *Du vrai, du beau, du bien. Une nouvelle approche neuronale*, Odile Jacob, 2008.
43. *Ibid.*, Dehaene, 2010.
44. *Ibid.*, McCrink, Wynn, 2004 ; Wynn, 1992, 1998.
45. *Ibid.*, Gelman, Meck, 1983 ; Gelman, Meck, Merkin, 1986.
46. Houdé O., *Apprendre à résister. Pour l'école, contre la terreur*, Le Pommier, 2017 ; *L'école du cerveau. De Montessori, Freinet et Piaget aux sciences cognitives*, Mardaga, 2018.
47. Kahneman D., *Système 1, système 2 : Les deux vitesses de la pensée*, Flammarion, 2012.
48. C'est la nouvelle interprétation que j'ai proposée dans *Apprendre à résister*, Le Pommier, 2017.
49. Meyniel F., Dehaene S. (2017). Brain networks for confidence weighting and hierarchical inference during probabilistic learning. *PNAS*, 114(19), e3859-e3868.
50. *Ibid.*, Houdé, 2017.
51. Houdé O., *Le raisonnement*, PUF, 2014 ; *Ibid.*, 2018.
52. *Ibid.*, Houdé, 2017.

53. Laboratoire de Psychologie du Développement et de l'Éducation de l'enfant.
54. Houdé O., Guichart E. (2001). Negative priming effect after inhibition of number/length interference in a Piaget-like task. *Developmental Science*, 4, 71-74.
55. Borst G. et al. (2012). Inhibitory control in number-conservation and class-inclusion tasks: A neo-Piagetian inter-tasks priming study. *Cognitive Development*, 27, 283-298.
56. Houdé O. et al. (2011). Functional MRI study of Piaget's conservation-of-number task in preschool and school-age children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 110, 332-346.
57. Antell S., Keating D. (1983). Perception of numerical invariance in neonates. *Child Development*, 54, 695-701.
58. *Ibid.*, Dehaene, 2010.
59. Fias W. (2003). Parietal representation of symbolic and nonsymbolic magnitude. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15, 47-56 ; Pinel P. et al. (2004). Distributed and overlapping cerebral representations of number, size, and luminance during comparative judgments. *Neuron*, 41, 983-993.
60. Viarouge A. et al. (2018). Spontaneous orientation towards irrelevant dimensions of magnitude and numerical acuity. *Learning and Instruction*, 54, 156-163.
61. Houdé O. et al. (2011). Functional MRI study of Piaget's conservation-of-number task in preschool and school-age children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 110, 332-346.
62. *Ibid.*, Houdé, 2014.
63. *Ibid.*, Kahneman, 2012.
64. Lubin A. et al. (2013). Inhibitory control is needed for the resolution of arithmetic word problems. *Journal of Educational Psychology*, 105, 701-708.
65. Roell M. et al. (2017). Inhibitory control and decimal number comparison in school-aged children. *PLoS ONE* 12(11), e0188276.
66. *Ibid.*, Dehaene, 2010.
67. *Ibid.*, Houdé, 2017.
68. Martin A. et al. (1996). Neural correlates of category-specific knowledge. *Nature*, 379, 649-652.
69. Inhelder B., Piaget J., *La genèse des structures logiques élémentaires*, Delachaux et Niestlé, 1959.
70. Houdé O., *Catégorisation et développement cognitif*, PUF, 1992.
71. Bideaud, J., *Logique et bricolage chez l'enfant*, PUL, 1988.
72. Bideaud, J., Lautrey, J. (1983). De la résolution empirique à la résolution logique du problème d'inclusion. *Cahiers de psychologie cognitive*, 3, 295-326.
73. Piaget J., Garcia R., *Vers une logique des significations*, Murionde, 1987.
74. *Ibid.*, Piaget, 1987.
75. *Ibid.*, Houdé, 1992.
76. Behl-Chada G. (1996). Basic-level and superordinate-like categorical representations in early infancy. *Cognition*, 60, 105-141.
77. Langer J., *The Origins of Logic: Six to Twelve Months*, Academic Press, 1980 ; (2000). The descent of cognitive development. *Developmental Science*, 3, 361-378.
78. Teglas E. et al. (2011). Pure reasoning in 12-month-old infants as probabilistic inference. *Science*, 332, 1054-1059.
79. Gopnik A., *Le bébé philosophe*, Le Pommier, 2012 ; (2012). Scientific thinking in young children. Theoretical advances, empirical research and policy implications. *Science*, 337, 1623-1627.
80. Borst G. et al. (2013). Inhibitory control efficiency in a Piaget-like class-inclusion task in school-age children and adults: A developmental negative priming study. *Developmental Psychology*, 49, 1366-1374.
81. Borst G. et al. (2012). Inhibitory control in number-conservation and class-inclusion tasks: A neo-Piagetian inter-tasks priming study. *Cognitive Development*, 27, 283-298.
82. Moutier S. et al. (2006). Syllogistic reasoning and belief-bias inhibition in schoolchildren. *Developmental Science*, 9, 166-172.
83. *Ibid.*, Casey et al., 2005 ; *Ibid.*, Changeux, 2008.
84. Houdé O. et al. (2000). Shifting from the perceptual brain to the logical brain: The neural impact of cognitive inhibition training. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, 721-728 ; Houdé O. (2007). First insights on neuropsychology of reasoning. *Thinking & Reasoning*, 13, 81-89.
85. *Ibid.*, Kahneman, 2012.
86. *Ibid.*, Houdé, 2017.
87. *Ibid.*, Houdé, 2014.
88. *Ibid.*, Houdé et al., 2000.
89. *Ibid.*, Houdé, 2018.
90. Prado J., Noveck I. (2007). Overcoming perceptual features in logical reasoning: A parametric functional magnetic resonance imaging study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19, 642 -657.
91. *Ibid.*, Houdé, 2017.
92. *Ibid.*, Changeux, 2002, 2008.

93. Aïte A. et al. (2016). Taking a third-person perspective requires inhibitory control: Evidence from a developmental negative priming study. *Child Development*, 87, 1825-1840.
94. *Ibid.*, Houdé, 2017.
95. Berthoz A., Jorland G., *L'empathie*, Odile Jacob, 2004 ; Gallagher H., Frith C. (2003). Functional imaging of theory of mind. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 77-83 ; Mahy C. et al. (2014). How and where: Theory-of-mind in the brain. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 9, 68-81.
96. Beauchamp M. (2015). The social mysteries of the superior temporal sulcus. *Trends in Cognitive Sciences*, 19, 489-90 ; Deen B. et al. (2015). Functional organization of social perception and cognition in the superior temporal sulcus. *Cerebral Cortex*, 25, 4596-4609 ; Isik L. et al. (2017). Perceiving social interactions in the posterior superior temporal sulcus. *PNAS*, 114.
97. *Ibid.*, Houdé, 2018.

Du sens des quantités au raisonnement mathématique

par Jérôme Prado

L'apprentissage des mathématiques a ceci de particulier qu'il repose sur un processus cumulatif. Ainsi, les connaissances acquises à un moment donné s'appuient sur des connaissances qui ont été acquises par le passé. Impossible d'appréhender complètement la géométrie sans connaissances solides en algèbre, et impossible d'acquérir des connaissances en algèbre sans maîtriser l'arithmétique. Un peu comme pour construire une tour avec des blocs de construction, il est donc primordial d'avoir une fondation solide sur laquelle d'autres connaissances vont pouvoir s'appuyer. Même si l'apprentissage des mathématiques est souvent vu comme débutant à l'école élémentaire, cette fondation est à chercher avant dans le développement de l'enfant. En effet, nous venons au monde avec des intuitions portant sur les quantités numériques, intuitions qui peuvent être regroupées sous le terme de « sens des quantités ». Ce sens des quantités permet aux bébés de se représenter déjà précisément des petites quantités numériques (allant de 1 à 3) lorsque celles-ci sont présentées de façon non-symboliques (par exemple par des nuages de points). Il permet aussi de comparer approximativement des quantités plus grandes¹. Au moins deux constats permettent de penser que ce sens des quantités est une

fondation sur laquelle les apprentissages mathématiques ultérieurs sont bâtis.

Le sens des quantités, une fondation des apprentissages mathématiques

Premièrement, grâce aux techniques d'imagerie qui permettent de voir le cerveau en action, des études ont pu localiser les neurones responsables de ce sens des quantités dans une région appelée le sillon intra-pariétal (SIP) chez le jeune enfant (*cf.* figure 1)². En fait, ces neurones sont constamment activés lors de la pratique des activités mathématiques chez l'enfant plus âgé ou chez l'adulte, que ces activités impliquent de faire du calcul arithmétique symbolique³ ou de comprendre des propositions complexes d'algèbre chez l'expert en mathématique⁴. En d'autres termes, les neurones du sens des quantités seraient toujours impliqués dans les tâches mathématiques, y compris lors des raisonnements les plus complexes. Il est donc probable que nos connaissances mathématiques s'appuient sur un « recyclage » de régions cérébrales supportant ces intuitions sur les quantités numériques⁵.

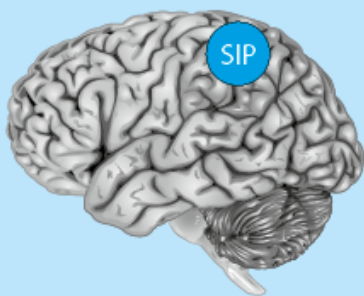


Figure 1. Localisation du sillon intra-pariétal (SIP) sur une représentation de l'hémisphère gauche du cerveau.

Deuxièmement, ce sens des quantités est plus ou moins précis chez l'enfant et ces différences ont un impact sur les apprentissages formels ultérieurs. Dans une certaine mesure, il va être plus facile pour des enfants avec un sens des quantités précis de rentrer dans les mathématiques formelles à l'école⁶. Ce développement serait

notamment rendu possible par l'apprentissage de la comptine numérique et l'acquisition du principe de cardinalité (c'est-à-dire la compréhension que le dernier mot-nombre prononcé correspond au nombre d'éléments). Les enfants dépasseraient ainsi ces intuitions numériques approximatives et se représenteraient les quantités de façon exacte, ouvrant ainsi la voie à une compréhension plus poussée du nombre et de l'arithmétique. À l'autre extrême, un peu comme une tour de blocs de construction à laquelle il manquerait les premiers blocs, les mécanismes cérébraux supportant le sens des quantités pourraient être déficitaires chez d'autres enfants. Ceux-ci auraient alors un risque de manifester un trouble spécifique de l'apprentissage des mathématiques appelé « dyscalculie »⁷.

Ce rôle fondateur du sens des quantités n'implique évidemment pas que tout ce qui concerne les capacités mathématiques d'un enfant serait déterminé à la naissance. S'il existe à peu près 5 % d'enfants dyscalculiques pour lesquels un trouble neurologique serait présent⁸, la grande majorité des enfants n'ont pas de dysfonctionnement cérébral. Comment alors expliquer les difficultés en mathématiques de beaucoup d'enfants à l'école ? La réponse est plutôt à chercher du côté de l'environnement, qui joue un rôle prépondérant dans les aptitudes en mathématiques des jeunes enfants.

L'importance de l'environnement scolaire et familial

Bien sûr, les activités en classe vont être importantes. Si un enfant possède des intuitions quantitatives dès la naissance, il va être fondamental de stimuler et de tirer avantage de ces capacités dès la maternelle. Cela signifie mettre en place en classe des activités autour du dénombrement, de la compréhension des grandeurs, de la géométrie ou des opérations arithmétiques. Mais l'apprentissage des mathématiques repose également sur un aspect interactif et social très fort. Par exemple, l'attitude de l'enseignant vis-à-vis des

mathématiques va être cruciale. Une appréhension (anxiété) des mathématiques chez les enseignants peut se transmettre aux enfants et affecter leur développement numérique⁹. Enfin, les activités numériques ne s'arrêtent pas aux portes de l'école. L'environnement familial va également jouer un rôle fondamental dans le développement du sens des quantités chez le jeune enfant¹⁰. Ainsi, plus les parents vont mettre en place un environnement propice aux activités impliquant les mathématiques à la maison, plus l'enfant pourra développer ses connaissances sur les nombres. Cela signifie qu'il est important pour les enseignants d'inciter les parents à parler des nombres avec leurs enfants, par exemple en les impliquant dans des activités propices à la manipulation de quantités numériques comme la cuisine ou les jeux de société. Ainsi, des jeux comme le jeu de l'oie peuvent aider les enfants à développer leur compréhension de ce qu'est un nombre car ils permettent d'associer celui-ci à plusieurs indices, comme le nombre de mouvements d'un jeton, le nombre de mots-nombres énoncés ou la distance parcourue par le jeton¹¹. Au final, la présence d'un sens précoce des quantités chez l'enfant suggère de multiples leviers pour s'assurer que, tels les premiers blocs de construction d'une tour, cette fondation est solide et donne toutes les chances à un enfant de bâtir ses connaissances mathématiques ultérieures. ●

1. Feigenson L., Dehaene S., Spelke E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(7), 307-14.

2. Cantlon J.F. et al. (2006). Functional imaging of numerical processing in adults and 4-y-old children. *PLoS Biology*, 4(5), e125.

3. Prado J., Mutreja R., Booth J.R. (2014). Developmental dissociation in the neural responses to simple multiplication and subtraction problems. *Developmental Science*, 17(4), 537-52.

4. Amalric M., Dehaene S. (2016). Origins of the brain networks for advanced mathematics in expert mathematicians. *PNAS*, 113(18), 4909-17.

5. Dehaene S., Cohen L. (2007). Cultural recycling of cortical maps. *Neuron*, 56(2), 384-98.

6. Feigenson L., Libertus M.E., Halberda J. (2013). Links Between the Intuitive Sense of Number and Formal Mathematics Ability. *Child Development Perspectives*, 7(2), 74-79.

7. Butterworth B. (2010). Foundational numerical capacities and the origins of dyscalculia. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(12), 534-41.

8. Devine A. et al. (2013). Gender differences in developmental dyscalculia depend on diagnostic criteria. *Learning and Instruction*, 27, 31-39.

9. Beilock S.L. et al. (2010). Female teachers' math anxiety affects girls' math achievement. *PNAS*, 107(5), 1860-3.

10. Levine S.C. et al. (2010). What counts in the development of young children's number knowledge?. *Developmental psychology*, 46(5), 1309-1319.

11. Siegler R.S. (2016). Magnitude knowledge: the common core of numerical development. *Developmental Science*, 19(3), 341-61.

5

L'attention

par Jean-Philippe Lachaux

« La capacité à ramener encore et encore une attention vagabonde est à la racine du jugement, du caractère et de la volonté. Une éducation qui améliorerait cette capacité serait l'éducation par excellence »¹. On doit cette citation à William James, l'un des pères fondateurs de la psychologie à la fin du XIX^e siècle, également connu pour sa définition de l'attention reprise depuis par tous les spécialistes de la question : « Tout le monde sait ce qu'est l'attention. L'attention est la prise de possession par l'esprit, sous une forme claire et vive, d'un objet ou d'une suite de pensées parmi plusieurs qui semblent possibles. La focalisation, la concentration et la conscience en sont l'essence. Elle implique le retrait de certains objets afin de traiter plus efficacement les autres, et elle s'oppose à l'état d'esprit dispersé et confus que l'on nomme en français distraction [...] ».

Un bon siècle plus tard, nous devons bien admettre que la première affirmation de James n'a jamais été autant d'actualité et que la deuxième reste intemporelle. L'attention est devenue en quelques années l'un des grands sujets de notre société : on ne cesse de parler des troubles déficitaires de l'attention chez l'enfant et chez l'adulte, dont le nombre de diagnostics ne cesse d'augmenter, de l'hyperconnexion dans le monde de l'entreprise et de la souffrance qu'elle génère, des différentes « addictions » aux nouvelles technologies et aux réseaux sociaux, de l'omniprésence du mode « multi-tâche » et du zapping... Les problèmes d'attention, car c'est bien d'elle qu'il s'agit à chaque fois, semblent omniprésents dans une époque

où les sollicitations, l'information et les stimulations diverses n'ont jamais été aussi accessibles et aussi abondantes. On dit même de l'attention qu'elle constitue la nouvelle richesse que tentent de s'accaparer les géants du web à grand renfort d'intelligence artificielle pour nous proposer sans cesse des contenus de mieux en mieux conçus pour la capturer et surtout, la retenir². L'attention, cette fonction cérébrale dont l'une des missions principales est de faire le tri entre tous ces possibles pour consacrer notre « temps de cerveau disponible » à ce qui est vraiment pertinent, n'a jamais été aussi nécessaire et sollicitée.

Il est donc grand temps de parler explicitement de l'attention aux enseignants et aux élèves, et d'éduquer celle-ci, car comment concevoir aujourd'hui qu'un jeune puisse encore traverser le système scolaire sans jamais en avoir entendu parler autrement que par le biais de remarques négatives en classe ou sur ses bulletins (les fameux : « Fais attention », « Devrait se concentrer davantage ») ? À une époque où n'importe qui peut retrouver une date historique ou une règle grammaticale en quelques secondes sur Internet, une grande bascule est d'ailleurs en train de s'opérer d'une éducation privilégiant la mémorisation d'informations (et notamment l'apprentissage de faits) vers une éducation privilégiant la capacité à sélectionner à chaque moment les informations dont nous avons vraiment besoin et à ignorer les autres, ce que James appellerait... l'attention. Mais pourquoi enseigner ce qu'est l'attention, si tout le monde sait ce que c'est ? Parce que James n'a pas totalement raison : tout le monde sait « ce que cela fait » d'être attentif, mais peu savent vraiment ce qu'est l'attention, en tant que mécanisme biologique soumis à des lois et des contraintes qui expliquent pourquoi nous nous laissons aussi facilement distraire. Et surtout, personne, ou presque, ne sait « ce qu'il faut faire » pour être attentif. Pour cela, il faut dépasser la définition de James et approfondir considérablement notre compréhension de l'attention, tant d'un point de vue théorique que pratique. C'est l'objet de ce chapitre, qui vise à vous faire part de ce qu'ont découvert au fil des ans les centaines de chercheurs en sciences cognitives qui s'emploient quotidiennement à mieux comprendre l'attention, car l'étude de l'attention et de ses mécanismes est l'un des champs de

recherche les plus dynamiques et les plus productifs des sciences du cerveau³.

I. Qu'est-ce que l'attention ?

1 L'attention en classe

Il convient d'abord de vérifier que les chercheurs et les enseignants ont bien la même conception de ce qu'est l'attention. Et malheureusement... ce n'est pas si simple.

Pour tenter de mieux comprendre ce à quoi les enseignants font référence quand ils parlent d'attention (et de difficultés d'attention), j'ai un jour proposé à une trentaine de chefs d'établissements de plancher sur la question suivante : « Que devrait-on attendre concrètement d'un programme éducatif censé développer la capacité d'attention des élèves ? Et sur quels critères objectifs pourrait-on juger de son efficacité ? » Il est ressorti de ce travail six critères principaux, très révélateurs de la manière dont l'attention est perçue et « sert » en classe. Les voici : à l'issue d'une éducation de l'attention réussie...

- 1)... les élèves adopteraient rapidement une attitude calme, de regard et d'écoute, à chaque fois qu'un adulte demande leur attention, en classe ou lors des regroupements par exemple ;
- 2)... les élèves feraient preuve d'une bonne qualité d'écoute pendant chaque explication ou chaque lecture de texte. Les enseignants n'auraient par exemple plus à répéter plusieurs fois les consignes ;
- 3)... une fois engagés dans un travail en autonomie, les élèves resteraient continuellement impliqués jusqu'à ce qu'ils aient terminé ;
- 4)... le travail serait à chaque fois soigné et pas bâclé, sans erreur d'étourderie ;
- 5)... les élèves sauraient travailler de manière autonome et continue

même sans la surveillance d'un adulte, par exemple lors des devoirs à la maison ;

6)... enfin, la qualité de l'ambiance en classe serait améliorée, avec moins d'agitation, de bavardage et plus d'écoute.

« On ne peut pas progresser dans sa maîtrise de l'attention sans améliorer toutes les fonctions exécutives. L'apprentissage de l'attention, tel qu'il est désiré en classe, est donc en réalité un apprentissage des fonctions exécutives en général. »

Ces six points me semblent assez révélateurs de la demande des professeurs et de la manière dont ils envisagent l'attention et son intérêt. J'ai d'ailleurs eu maintes fois l'occasion d'en faire part à des publics enseignants, avec à chaque fois une réaction globale d'acquiescement, accompagnée parfois de sourires tant l'objectif paraît irréaliste et éloigné des comportements réellement observés en classe. Personnellement, je serais tenté de rajouter 7) que les élèves donneraient l'impression de travailler avec moins d'effort et plus de plaisir et 8) qu'ils s'intéresseraient facilement à des enseignements nouveaux qu'ils ne connaissaient pas jusqu'ici.

Sachez pourtant qu'un spécialiste en sciences cognitives n'associerait pas forcément ces différents critères à la seule « attention », mais plus généralement à ce qu'il appellerait les « fonctions exécutives » (cf. Chapitre 7 de Grégoire Borst dans cet ouvrage). Ces fonctions incluent certes le contrôle attentionnel, mais également la capacité d'inhibition (motrice et cognitive), la mémoire de travail, la flexibilité cognitive (la capacité à basculer rapidement et volontairement d'une tâche à une autre), la régulation émotionnelle et la planification (la capacité à organiser ses actions dans le temps pour atteindre un objectif lointain).

Malgré tout, réduire un enseignement de l'attention à une seule de

ces composantes (le contrôle attentionnel) n'aurait pas grand sens. Car on ne peut pas progresser dans sa maîtrise de l'attention sans améliorer toutes les fonctions exécutives. L'apprentissage de l'attention, tel qu'il est désiré en classe, est donc en réalité un apprentissage des fonctions exécutives en général.

Force est donc de reconnaître que la frontière entre l'attention, telle qu'elle intéresse réellement l'enseignant dans sa dimension naturaliste et écologique, et les différentes fonctions exécutives est très poreuse. Et la confusion vient principalement du fait que l'attention peut se porter non seulement sur des éléments du monde extérieur (on parle alors d'attention sensorielle, pour faire attention à un détail d'un tableau par exemple) mais également sur des perceptions internes, mentales, que personne d'autre que nous ne peut percevoir.

« La quasi-totalité des processus mentaux qui nécessitent de former une représentation mentale stable (sous forme d'image, de son, ou de n'importe quelle autre sensation imaginaire) nécessite une certaine capacité à contrôler son attention, ne serait-ce que pour faire une liste de courses, un calcul mental ou apprendre une poésie. »

Le psychologue Walter Pillsbury remarquait déjà au début du siècle dernier que « l'essence de l'attention, en tant que processus conscient, est d'augmenter la clarté d'une idée ou d'un groupe d'idées au détriment des autres »⁴. Pour qu'elle corresponde avec l'idée que nous nous en faisons, la définition de l'attention ne doit donc pas se limiter à la sélection d'informations disponibles à nos sens. Elle doit étendre la notion de sélection à un champ plus large, qui inclue ces éléments privés de notre vie mentale..., ce qui nous ramène une nouvelle fois à James qui distinguait d'ailleurs

l'attention *sensorielle*, tournée vers les objets des sens, de l'attention *intellectuelle*, tournée vers les idées⁵.

C'est là où les choses se compliquent un peu, car par exemple, du point de vue des sciences cognitives, garder un nom quelques instants en tête n'est pas considéré à proprement parler comme un exercice d'attention, mais comme un exercice de mémoire (de mémoire de travail verbale, précisément). Donc si au moment de noter le titre d'un livre que vous venez d'entendre à la radio, vous êtes distrait par votre fille qui vous appelle depuis sa chambre, on peut simplement décrire ce qui s'est passé en expliquant qu'il y a eu interruption d'un processus de mémoire de travail, et que la capacité que vous devez entraîner pour éviter que cela ne se reproduise est votre mémoire de travail..., ou bien est-ce votre contrôle attentionnel ? Et si vous ne vous êtes pas laissé déconcentrer, doit-on vous féliciter pour votre capacité de concentration, ou pour votre capacité d'inhibition (parce que vous avez su inhiber une réponse réflexe à votre fille qui vous aurait fait oublier le titre du livre) ? Si vous répondez « tout cela à la fois », vous allez donner des sueurs froides à ceux qui tentent d'étudier indépendamment ces fonctions, car il y a des spécialistes de l'attention et des spécialistes de la mémoire de travail (et des spécialistes de l'inhibition, et de la planification, etc.).

Vous l'aurez compris, la quasi-totalité des processus mentaux qui nécessitent de former une représentation mentale stable (sous forme d'image, de son, ou de n'importe quelle autre sensation imaginaire) nécessitent une certaine capacité à contrôler son attention, ne serait-ce que pour faire une liste de courses, un calcul mental ou apprendre une poésie. Donc s'intéresser à l'attention d'un élève, c'est s'intéresser à toutes ses fonctions exécutives, car ce qui est en jeu, finalement à travers la maîtrise de l'attention, c'est le contrôle endogène – ou volontaire – de sa propre vie mentale. Et c'est bien à ce titre que James qualifie l'éducation de l'attention, dans ce sens, « d'éducation par excellence », car en éduquant

l'attention, on éduque la capacité de contrôle qu'a un individu sur *lui-même*.

Être attentif, ça s'apprend !

Nous pouvons tous prendre de bonnes habitudes attentionnelles. À minima, nous pouvons prendre l'habitude de poser notre attention sur la bonne cible dans des situations que nous retrouvons régulièrement : des études montrent par exemple que l'attention d'un conducteur arrivant à un rond-point vient spontanément se placer sur la gauche, là d'où viennent les voitures qu'il faut laisser passer. C'est une habitude attentionnelle acquise à force de regarder toujours à cet endroit, à ce moment-là. Plus généralement, il est tout à fait envisageable d'entraîner l'attention des élèves pour les amener progressivement à améliorer leur maîtrise de celle-ci. C'est l'objet du programme ATOLE (Apprendre l'ATtention à l'école) que j'ai développé avec mon équipe et qu'ont déjà suivi 12.000 enfants de l'école élémentaire au cours de l'année scolaire 2017-2018. C'est un programme libre et accessible à tous, dont les piliers principaux sont a) l'acquisition d'une culture métacognitive pour identifier et reconnaître dans sa vie quotidienne l'action des grands systèmes qui orientent l'attention, b) l'apprentissage d'une méthode de découpage des tâches complexes en une suite de tâches simples et courtes dont l'objectif est le plus clair possible, c) le développement de la capacité à détecter les signes précoces de la distraction pour les compenser immédiatement, ce que nous appelons le « sens de l'équilibre attentionnel », et d) la capacité à programmer son attention pour une tâche donnée, en précisant la perception, l'intention et la manière d'agir à privilégier. Ce programme vise explicitement à répondre aux six demandes des enseignants que je rappelais en début de chapitre. Mais sachez qu'il n'y a pas de recette miracle et que l'éducation de l'attention, comme l'éducation sportive ou l'éducation musicale est une aventure au long cours, qui ne peut être menée que par des enseignants ayant un vrai désir de mieux comprendre et maîtriser l'attention, à titre personnel et professionnel.

2 Une tentative de définition de l'attention

L'attention dont il est question en classe est donc surtout celle qui permet de privilégier des phénomènes mentaux internes comme la pensée ou l'imagination. Pour ne pas la confondre avec l'attention sélective « sensorielle » – qui permet de chercher ses chaussettes dans un tiroir –, les chercheurs attachés au concept d'attention ont choisi de lui donner un nom différent : l'attention *exécutive*, qui sélectionne et stabilise des processus mentaux, plutôt que des perceptions sensorielles.

Pour bien comprendre ce dont il s'agit, je vous propose de vous intéresser à un test très classique de la psychologie cognitive, le test de Stroop⁶, au cours duquel le participant voit s'afficher sur un écran des noms de couleurs, eux-mêmes écrits en couleur : par exemple, le mot JAUNE écrit en vert ou le mot ROUGE écrit en rouge. L'exercice consiste simplement à nommer le plus vite possible la couleur des lettres, ce qui trouble considérablement les personnes qui savent bien lire quand le mot écrit à l'écran n'est pas celui de la couleur des lettres (le mot JAUNE écrit en vert, par exemple). Car spontanément, un bon lecteur lit et prononce mentalement ou oralement le mot qui s'affiche sous ses yeux selon un processus très automatisé de *conversion grapho-phonémique*. Pour réussir le test de Stroop, ce lecteur doit s'efforcer d'inhiber le processus spontané de lecture pour prononcer à la place le *nom* de la couleur : « vert » et non « jaune ».

« Plutôt que des stimuli, l'attention exécutive sélectionne des processus cognitifs, et des manières de réagir à certains éléments perçus. Quand les enseignants parlent d'attention, il s'agit donc principalement de l'attention exécutive. »

Cette tâche demande beaucoup d'attention, mais cette attention ne

sert pas tant à sélectionner un stimulus sensoriel parmi d'autres, puisque qu'il n'y a après tout qu'un seul mot à la fois à l'écran, qu'à sélectionner une certaine façon de réagir à ce stimulus menant à l'identification et l'énoncé de la couleur de l'encre plutôt qu'à la prononciation du mot. À cause de la consigne particulière de l'exercice, le cerveau ne réagit donc plus comme il le ferait d'habitude : il doit réagir en utilisant des processus cognitifs différents, exécutés par des populations de neurones différentes de celles chargées de la lecture. C'est cette forme de sélection que désigne l'attention exécutive : plutôt que des stimuli, l'attention exécutive sélectionne des processus cognitifs, et des manières de réagir à certains éléments perçus. Quand les enseignants parlent d'attention, il s'agit donc principalement de l'attention exécutive, même si les élèves utilisent aussi leur attention sensorielle, ne serait-ce que pour rester attentifs à l'énoncé qu'ils sont en train de lire sur leur livre de classe, plutôt que de s'intéresser à leur trousse. Il y a donc théoriquement plusieurs formes d'attention.

Rassurez-vous, il y a tout de même moyen d'envisager une définition un peu unifiée de l'attention, et vous n'aurez pas à réclamer à vos élèves une « meilleure attention sélective visuelle spatiale » ou une « attention auditive diffuse plus soutenue ». Il suffit de remarquer que l'attention privilégie toujours une chose au détriment d'une autre, et de réfléchir à ce que peuvent bien être ces « choses ». Qu'il s'agisse de « tout ce qui est bleu », de « la voix de la personne sur votre droite » ou « du titre du livre que vous êtes en train de vous répéter mentalement », ces cibles possibles pour l'attention correspondent toutes à l'activité de réseaux de neurones bien précis dans votre cerveau.

« Les cibles de l'attention ne sont donc pas des objets du monde extérieur mais des réseaux et des activations neuronales, et c'est à ce niveau de description que

**l'attention peut être envisagée de manière unifiée,
comme un processus de sélection. »**

À ce niveau de description biologique, il n'y a pas de différence de nature entre ces cibles, car la mémoire de travail fait simplement intervenir un certain réseau de neurones et la perception de la voix de votre voisine un autre, mais il s'agit toujours de neurones interagissant les uns avec les autres. Dans le cerveau, il n'y a donc pas de gauche, de droite, de bleu, ou de pensées verbalisées, mais seulement des réseaux de neurones parcourus par des signaux chimiques et électriques. Le biais attentionnel revient toujours à privilégier l'un de ces réseaux au détriment des autres, d'une manière qui peut s'appuyer sur une simple amplification de l'activité des neurones concernés, ou sur des changements subtils leur permettant de mieux communiquer entre eux ou avec le reste du cerveau, mais l'essentiel est qu'un ensemble de neurones bénéficie pendant quelques instants d'un traitement de faveur. Les cibles de l'attention ne sont donc pas des objets du monde extérieur mais des réseaux et des activations neuronales, et c'est à ce niveau de description que l'attention peut être envisagée de manière unifiée, comme un processus de sélection. Cela n'empêche pas de dire qu'une personne fait attention à la tasse de café devant elle car c'est bien pratique, mais sachez seulement que cela relève de l'abus de langage. L'attention ne se porte pas sur des objets ou des positions dans l'espace, mais sur les groupes de neurones occupés à les analyser. Lorsque l'attention privilégie un réseau de neurones, elle privilégie fatalement la fonction ou l'objet qui lui est associé. Et c'est pourquoi il est possible de porter son attention sur l'ensemble des poissons d'un banc de sardines aussi bien que sur une sardine unique, car chacune de ces cibles active un réseau de neurones bien particulier qu'il est possible de sélectionner avec son attention.

3 L'attention, clef de voute de l'apprentissage

L'attention étant ainsi définie, nous pouvons maintenant nous intéresser à ce qu'elle apporte dans le cadre d'un apprentissage et je vais tenter de vous convaincre à l'aide de trois exemples que l'attention est indispensable à la mémorisation, à la compréhension et plus généralement à la perception du monde. En bref, sans attention, aucun apprentissage n'est possible.

a. Être attentif pour mémoriser

Le premier exemple provient d'une expérience que nous avons réalisée en mesurant à l'aide d'électrodes placées directement dans le cerveau⁷, l'activité du gyrus frontal inférieur, une région située dans le cortex préfrontal très impliquée dans la mémoire de travail verbale (celle qui permet de se répéter mentalement un numéro de téléphone avant de l'écrire).

La tâche expérimentale utilisée dans cette première étude⁸ présentait aux participants une succession de dix lettres une par une au centre d'un écran, au rythme d'une lettre toutes les deux secondes. Chaque lettre était précédée d'un point coloré indiquant si la lettre à venir devait être mémorisée (point vert) ou non (point rouge). Les participants de l'expérience voyaient d'abord apparaître cinq lettres précédées d'un point rouge auxquelles ils ne devaient donc pas prêter attention puisqu'elles ne leur étaient d'aucune utilité pour la tâche, puis cinq lettres précédées d'un point vert. La tâche était donc conçue pour induire un changement net de l'engagement attentionnel après la sixième lettre, et c'est ce que nous avons directement observé d'un point de vue neuronal en mesurant l'activité du gyrus frontal inférieur. Cette zone restait muette lors de la présentation des cinq lettres à ignorer, et ne s'activait qu'à la sixième avec une activité de plus en plus forte jusqu'à la dixième et pendant un temps de maintien de ces cinq lettres en mémoire. Autrement dit, l'attention portée par les participants aux lettres se traduisait directement par une activation de cette région cruciale pour la mémorisation, avec une règle

simple : pas d'attention, pas de mémorisation.

Pistes de pratiques

La tâche expérimentale des dix lettres

En classe, cette situation (la tâche expérimentale des dix lettres) se retrouve très régulièrement, ne serait-ce qu'au moment où l'élève doit recopier une phrase écrite au tableau, ou une liste de mots : celui-ci doit alors mettre en jeu sa mémoire de travail verbale le temps où son regard passe du tableau à sa feuille. S'il a regardé le tableau distraitement, il n'aura pas encodé la totalité des mots dans sa mémoire de travail et oubliera d'en noter certains. Plus généralement, la mémoire de travail verbale est utilisée dès qu'il faut se répéter verbalement, mentalement, avec ce que l'on appelle couramment « la petite voix » (ou parole interne, en anglais *covert-speech*), une phrase, des mots, des lettres, des nombres... et sans attention au moment de l'écoute ou de la lecture, le processus d'encodage en mémoire ne se met pas en jeu correctement et l'élève oublie des éléments ou la totalité de ce qu'il doit retenir. Il lui devient impossible d'apprendre une poésie, par exemple, ou tout simplement de retenir une instruction.

La deuxième expérience mentionnée dans le texte montre quant à elle l'importance de l'attention pendant la lecture. Sans attention, l'élève ne comprendra pas la consigne qu'il doit pourtant lire, il ne comprendra pas l'explication dans un livre... tout enseignement devient compliqué !

b. Être attentif pour comprendre

La deuxième expérience, réalisée dans les mêmes conditions, nous éclaire encore davantage quant au rôle de l'attention⁹. Nous avons tous fait l'expérience de lire un paragraphe ou une page d'un livre de manière un peu distraite, au point de ne rien en retenir. La lecture demande donc d'être attentif, et nous souhaitons savoir pourquoi. Pour répondre à cette question, nous avons utilisé une expérience

simple qui demandait aux sujets de regarder s'afficher sur un écran d'ordinateur une suite de mots rouges et verts, présentés l'un après l'autre. Les mots de chaque couleur s'enchaînaient pour former progressivement deux histoires, l'histoire verte et l'histoire rouge. L'enchaînement des couleurs étant aléatoire, nous ne demandions pas aux sujets de lire tous les mots, et pour cause – « L'histoire *il était* est *une* donc lue *fois* mot à *dans* mot *une forêt* » – mais seulement l'histoire verte, pour nous la raconter à la fin de l'expérience : « *Il était une fois dans une forêt* ». Pour corser les choses, les mots apparaissaient pendant un temps si bref – un dixième de seconde – qu'il était impossible pour les sujets de regarder ailleurs ou de fermer les yeux pendant la présentation des mots rouges. C'est donc bien les yeux ouverts et fixés sur le centre de l'écran qu'ils voyaient apparaître chaque mot, quelle que soit sa couleur, mais aucun des participants ne pouvait raconter l'histoire rouge à la fin de l'expérience, comme après avoir lu une page d'un livre de manière distraite. L'histoire verte ne leur posait en revanche aucun problème si bien que manifestement, leur cerveau s'était rendu « perméable » aux mots verts, et « imperméable » aux mots rouges.

L'analyse des signaux cérébraux nous a permis de reconstruire sur une maquette informatique la réaction du cerveau à la présentation des mots de l'expérience, en fonction de leur couleur. Ce film était animé d'un jeu de couleurs vives représentant, milliseconde après milliseconde, l'activité des différentes régions du cerveau après la présentation des mots verts et rouges. On y voyait le cortex visuel, spécialisé à l'arrière du cerveau dans l'analyse des objets et des formes, réagir de la même manière aux mots rouges et aux mots verts pendant environ deux dixièmes de seconde. Ce n'était pas si surprenant, car l'inattention ne rend pas aveugle : même si vous n'avez rien retenu de l'histoire, vous vous souvenez bien avoir regardé la page de votre livre et ce n'était pas « tout noir » ! La grande différence n'apparaissait qu'après un tiers de seconde environ, avec une vague d'activation envahissant la partie gauche du

lobe frontal et tout le réseau de la mémoire de travail et de la lecture uniquement dans le cas de la lecture attentive. Des régions essentielles pour associer une signification et une prononciation à ces groupes de lettres présentés à l'écran, et pour garder en mémoire l'enchaînement des mots successifs pour en faire une phrase, ne réagissaient que grâce à l'attention. Sans attention au contraire, la vague d'activation cérébrale ne parvenait pas à engager ces réseaux cérébraux de la lecture, de la mémoire et de la compréhension et retombait « comme un soufflé », largement cantonnée dans les régions visuelles consacrées à l'analyse dite de « bas niveau ».

c. Être attentif pour percevoir

Mais ce n'est pas tout. Un troisième exemple d'expérience nous apprend que l'attention change notre rapport au monde à un point que peu d'entre nous soupçonnaient. Et cette fois, la démonstration ne nécessite même pas de mesurer l'activité cérébrale, mais simplement de retrouver sur internet l'un des nombreux petits films indexés par le mot-clef « change blindness »¹⁰ (en français : cécité au changement). Ces films nous montrent deux photos en apparence identiques alterner, entrecoupées seulement par un petit flash, et il faut un examen scrupuleux de l'image pour constater qu'un élément marquant disparaît une fois sur deux, par exemple un énorme réacteur au premier plan qui devrait en principe nous sauter aux yeux ! Ce que révèlent ces films, c'est que notre cerveau ne mémorise pas ces « détails » tant que nous n'y faisons pas attention, et que sans cette mémoire du passé immédiat, il est impossible de comparer l'image qui vient de disparaître avec celle présente sous nos yeux pour remarquer la différence. Plus profondément, cette expérience nous apprend que sans attention, le monde file comme le sable entre nos doigts. Un monde auquel nous ne faisons pas attention est donc non seulement un monde sans signification mais également un monde immédiatement disparu, sans laisser de trace.

II. Le contrôle volontaire de l'attention

Quand notre attention vacille, c'est donc tout notre rapport au monde qui bascule. La phrase que nous lisons n'a plus aucun sens, la voix de la personne qui nous parle devient un bruit de fond, le film que nous regardons perd toute sa cohérence, etc. Qu'il s'agisse de lire ou d'écouter, l'esprit semble alors imperméable au monde qui l'entoure, ou comme le dit plus prosaïquement l'expression populaire, « ça rentre par une oreille et ça ressort par l'autre ». Cela ne nous fait plus rien qu'il se passe ceci ou cela, ou que quelqu'un nous parle. Tout pourrait disparaître, cela ne changerait... rien.

« L'attention nous connecte à ce avec quoi nous interagissons et lui permet de nous influencer et d'exister dans notre esprit. La condition primordiale d'un bon d'apprentissage est donc l'établissement d'une connexion suffisamment stable pour que cette influence ait lieu. »

C'est pourquoi je décris volontiers l'attention comme une connexion grâce à laquelle ce que dit la personne que nous écoutons avec attention, ou ce que nous lisons avec attention agit sur les régions de notre cerveau chargées des fonctions cognitives de plus haut niveau. L'attention nous connecte à ce avec quoi nous interagissons et lui permet de nous influencer et d'exister dans notre esprit. La condition primordiale d'un bon d'apprentissage est donc l'établissement d'une connexion suffisamment stable pour que cette influence ait lieu.

La caractéristique d'une attention maîtrisée est alors la stabilité. Car nous sommes tout le temps attentif à quelque chose, même si ce

n'est qu'un souvenir ou une rêverie. Notre attention est en effet toujours occupée à sélectionner certains réseaux neuronaux et à favoriser leur activité aux dépens d'autres possibles et à tout moment, pour s'inspirer de la formulation de James, quelque chose domine notre expérience. Ce n'est donc pas l'attention qu'il convient de développer, mais la stabilité de l'attention. D'ailleurs, les nombreux adjectifs faisant directement référence à une bonne qualité d'attention impliquent tous une notion de durée : appliqué, impliqué, intéressé, studieux, assidu, concerné, réactif...

« Le problème n'est pas donc tant d'arriver à être attentif, que d'arriver à stabiliser l'attention sur une cible pertinente par rapport à ce que nous cherchons à faire. »

À chaque fois, l'activité dans laquelle s'est engagé l'élève semble au premier plan de ses préoccupations pendant tout le temps qu'il décide de lui consacrer et la distraction intervient au contraire comme une rupture, une interruption, une déstabilisation. Le problème n'est pas donc tant d'arriver à être attentif, que d'arriver à stabiliser l'attention sur une cible pertinente par rapport à ce que nous cherchons à faire. Et la question principale qui se pose alors à propos de l'attention, est la suivante : « Qu'est-ce qui décide, dans le cerveau, moment après moment, de ce sur quoi se porte mon attention ? ». C'est à ce stade que les neurosciences cognitives peuvent vraiment nous aider.

1 Deux grandes formes d'orientation de l'attention

On peut distinguer deux grands systèmes d'orientation de l'attention : un système implémentant une forme de contrôle « volontaire » de l'attention, et un autre implémentant plutôt une forme de capture et de saisie réflexe de l'attention par un stimulus

en fonction de sa saillance particulière. Ce deuxième système peut à son tour être décomposé en deux composantes, selon que le stimulus capture l'attention en fonction de ses caractéristiques physiques simples (le gilet jaune fluo d'un cycliste attire spontanément l'attention) ou de caractéristiques plus complexes, plus personnelles et émotionnelles (ce qui est plaisant, excitant, ou au contraire effrayant).

Prenons tout de suite un exemple concret. Quand un enfant joue à « chercher Charlie » dans une image de ces fameux livres, il s'aide – consciemment ou non – du fait que Charlie est vêtu de son célèbre pull rayé rouge et blanc et s'intéresse en priorité à tout ce qui reprend ce motif dans l'image. Dans son cerveau, ce motif fait office de cible attentionnelle très précise, maintenue en mémoire dans le cortex dit « préfrontal » d'où partent pendant toute la durée de la recherche des signaux en direction du cortex visuel pour y favoriser le travail de certains groupes de neurones en particulier : les plus efficaces pour détecter ce motif particulier. Nous retrouvons bien le mécanisme de sélection de certains réseaux de neurones qui caractérise l'attention. Même si nous avons l'impression que l'attention de cet enfant se porte sur les rayures rouges, en réalité, l'attention ne sélectionne pas une couleur mais un réseau de neurones particulièrement sensible à cette couleur. Les autres groupes de neurones, plus sensibles à la couleur bleue par exemple, sont au contraire « inhibés » pour ne pas déranger le processus de recherche. Cette modulation est dite « *top-down* », du haut vers le bas, en référence à l'idée commune que le cortex préfrontal s'occupe des fonctions cognitives les plus élevées (au sommet, ou « top », de la hiérarchie fonctionnelle cérébrale) et qu'il influence les régions sensorielles dites « de bas niveau » (en bas de cette même hiérarchie, ou « bottom ») pour les spécialiser temporairement dans un certain type de détection¹¹. Grâce à l'attention, le cerveau de l'enfant se réorganise temporairement pour se transformer en un détecteur efficace de formes rayées rouges et blanches. Autrement

dit, il adapte son mode de fonctionnement pour se spécialiser en fonction de la tâche à réaliser.

Ce mécanisme *top-down* est ce qui s'apparente le plus à un contrôle volontaire de l'attention. Et si vous avez l'impression que ce système manque d'efficacité parce que vous vous laissez souvent distraire, détrompez-vous. Cette influence *top-down* peut influencer de manière spectaculaire la manière dont nous percevons le monde. Un film très célèbre parmi les aficionados de l'attention – « The invisible gorilla » – en a déjà convaincu des millions de personnes.

Il s'agit d'un film assez court où deux équipes de trois personnes se font chacune des passes avec un ballon. L'une des deux équipes porte des T-shirts blancs et l'autre des T-shirts noirs, et un message en ouverture du film prévient le spectateur qu'il devra simplement compter le nombre de passes que vont se faire les joueurs blancs. Si vous avez accès à internet maintenant, je vous encourage à aller voir le film avant de lire la suite (.... c'est-à-dire maintenant !).

« Dès que nous cherchons à faire quelque chose, cette intention établit une hiérarchie entre tous les signaux qui parviennent à nos sens et ceux qui ne sont pas jugés importants pour cette tâche sont autant que possible ignorés. »

La raison pour laquelle ce film est devenu viral, c'est que de très nombreux spectateurs ne voient pas un acteur traverser la scène déguisé en gorille, et se tambouriner la poitrine face caméra. Et si c'est votre cas, je vous rassure tout de suite : c'est le signe que votre système attentionnel *top-down* fonctionne bien ! Il a en effet pleinement joué son rôle car les joueurs blancs se font des passes assez rapidement et se déplacent, et la principale difficulté consiste à faire abstraction des joueurs habillés de noir¹². Votre cortex préfrontal « chercheur de Charlie » a résolu le problème en modulant

l'activité de votre cortex visuel pour le rendre plus sensible aux formes claires et moins sensible aux formes sombres, qui n'ont pas été traitées de manière détaillée par le cerveau – souvenez-vous de l'exemple du réacteur d'avion. Voilà donc comment opère le contrôle « volontaire » de l'attention : dès que nous cherchons à faire quelque chose, cette intention établit une hiérarchie entre tous les signaux qui parviennent à nos sens et ceux qui ne sont pas jugés importants pour cette tâche sont autant que possible ignorés. C'est bien ce qu'écrivait déjà Nicolas Malebranche en 1674 : "l'esprit n'apporte pas une égale attention à toutes les choses qu'il aperçoit"¹³.

2 Au commencement était l'intention

Il n'y a donc pas de contrôle volontaire de l'attention sans intention. Et il n'y a d'ailleurs pas non plus de distraction sans intention, car la distraction n'a de sens que si elle éloigne l'attention de ce qu'elle devrait viser. Assis dans un café, le téléviseur au fond de la pièce est une distraction si vous cherchez à écouter la personne face à vous, mais elle n'en est pas une si vous souhaitez regarder le reportage diffusé à la télé. Pour bien comprendre comment fonctionne l'attention, nous devons donc nous intéresser plus précisément à la manière dont le cerveau mémorise et utilise une intention pour diriger l'attention et le comportement.

Les recherches menées chez le singe suggèrent que les *intentions* sont principalement mémorisées dans le cortex préfrontal, tout à l'avant du cerveau. Par exemple, lorsqu'un singe a pour consigne d'appuyer sur une manette quand un *rond* apparaît à l'écran, et de ne rien faire si la forme est un *triangle*, cette consigne est mémorisée par des neurones situés dans la partie latérale du cortex préfrontal, appelée LPFC (de l'anglais, Lateral PreFrontal Cortex). Ces neurones restent en effet actifs pendant toute la tâche au point qu'il est possible, en décodant leur activité, de savoir quelle consigne suit

l'animal parmi plusieurs possibles (les neurones dont l'activité est maintenue dans le temps seront différents si l'instruction est d'appuyer en réponse aux triangles, et pas aux ronds). Ces neurones implémentent alors une forme de règle logique : s'ils reçoivent du cortex visuel l'information qu'un rond est apparu à l'écran, ils envoient un signal vers le cortex moteur pour déclencher le mouvement. Le LPFC est effectivement directement connecté aux cortex pré-moteur et moteur pour transmettre aisément un signal aux régions motrices afin de déclencher une réponse de la main lorsque la figure cible apparaît à l'écran¹⁴.

« Lorsqu'un singe a pour consigne d'appuyer sur une manette quand un rond apparaît à l'écran, et de ne rien faire si la forme est un triangle, cette consigne est mémorisée par des neurones situés dans la partie latérale du cortex préfrontal, appelée LPFC (de l'anglais, Lateral PreFrontal Cortex). »

Lorsque la forme est un triangle, ces neurones n'envoient aucun signal vers le cortex moteur car la consigne est de ne pas réagir. Ils peuvent même envoyer une commande d'inhibition motrice pour stopper net un mouvement qui se serait déclenché par erreur.

À travers la description de ce petit mécanisme finalement assez simple, on s'aperçoit que l'animal est parfaitement concentré sur la tâche tant que les neurones du LPFC sont actifs pour maintenir activement en mémoire la consigne. Si leur activité fléchit, l'animal commence à faire des erreurs et on dira qu'il s'est « déconcentré ». Le LPFC est au cœur d'un système qualifié « d'exécutif » dans le cerveau, et dont l'une des fonctions principales est d'ajuster de manière flexible notre manière de réagir à notre environnement en fonction de ce que nous cherchons à faire. Quand notre comportement est piloté par le système exécutif, il est qualifié dans

la littérature scientifique anglo-saxonne de « *goal-driven* », c'est-à-dire « conduit par un but ».

Mais nous voyons tout de suite la double contrainte auquel est soumis ce système, qui doit à la fois être suffisamment stable pour garder en mémoire la consigne jusqu'à ce que le but soit atteint, mais également flexible, pour adapter le comportement quand la consigne change, par exemple si le singe doit soudainement réagir aux triangles, ou si vous décidez de ne plus chercher Charlie mais son chien, ou de compter les passes des joueurs habillés en noir, etc. Dans l'idéal, les neurones du LPFC devraient donc être capable de maintenir une activité stable tout le temps nécessaire à une tâche, tout en se désactivant immédiatement au profit d'autres neurones dès que l'objectif et la consigne changent. Malheureusement, les neurones ne fonctionnent pas comme des interrupteurs, et nous pouvons facilement constater dans notre expérience de tous les jours que la solution trouvée par la Nature pour assurer stabilité et flexibilité est une sorte de compromis qui n'assure aucune de ces propriétés parfaitement. Il nous arrive fréquemment d'oublier ce que nous cherchions à faire (« mais qu'étais-je venu chercher dans la cuisine ? ») et nous éprouvons régulièrement des difficultés à passer rapidement d'une activité à une autre. Malgré tout, notre cortex préfrontal est relativement stable et relativement flexible chez la plupart d'entre nous, et ce n'est pas la moindre des prouesses.

« Gardons bien à l'esprit qu'il est toujours préférable pour la qualité de notre attention d'agir avec des intentions à court terme (pour une meilleure stabilité) et de prendre le temps nécessaire pour reprogrammer son système exécutif au moment de passer d'une tâche à une autre (pour une meilleure transition). »

Il est difficile de proposer une limite précise concernant la durée

pendant laquelle les neurones du LPFC peuvent maintenir activement une consigne car cette limite dépend de multiples facteurs, notamment motivationnels : le type d'expérience décrit plus haut chez le singe a montré par exemple que l'activation des neurones du LPFC est mieux soutenue si l'animal est récompensé par un aliment qu'il aime bien (du raisin) que par un met qu'il n'aime pas (de la pomme de terre)¹⁵. Mais gardons bien à l'esprit qu'il est toujours préférable pour la qualité de notre attention d'agir avec des intentions à court terme (pour une meilleure stabilité) et de prendre le temps nécessaire pour reprogrammer son système exécutif au moment de passer d'une tâche à une autre (pour une meilleure transition, en visualisant par exemple ce que nous cherchons à faire dans cette nouvelle tâche).

Dans le vocabulaire des neurosciences cognitives, l'implémentation neuronale de la consigne suivie pendant une tâche porte le nom de « *task-set* ». Dans sa forme la plus simple, le *task-set* est donc un ensemble de règles d'associations de type « si A se produit, alors faire B » (ou ne pas faire C). Une personne est bien concentrée quand elle maintient activement un *task-set* adapté à la tâche qu'elle tente d'accomplir. Mais cela ne signifie pas que toutes les associations stimulus-réponse sont stockées dans le cortex préfrontal, loin de là. Avec l'apprentissage, les associations qui se répètent souvent finissent par avoir leur petit réseau de neurones spécialisés, et l'apparition du stimulus entraîne automatiquement la réponse qui lui est le plus couramment associée. Le cerveau prend l'habitude de réagir de cette façon précise à ce stimulus; et l'association est devenue *habituelle*. S'il n'y a pas de *task-set* actif dans le cortex préfrontal, le cerveau peut tout de même réagir à l'apparition d'un stimulus, en fonction de ses habitudes, par automatisme, nous y reviendrons. C'est l'une des clefs pour faire plusieurs choses à la fois comme je l'expliquerai aussi un peu plus loin, et c'est aussi l'une des principales sources de distraction.

« Avec l'apprentissage, les associations qui se répètent souvent finissent par avoir leur petit réseau de neurones spécialisés, et l'apparition du stimulus entraîne automatiquement la réponse qui lui est le plus couramment associée. »

Il est alors facile de comprendre qu'un des grands buts de l'apprentissage (scolaire ou autre) est de créer des habitudes utiles et efficaces, qui permettront de réagir rapidement de manière adéquate aux stimuli rencontrés. Ces habitudes peuvent concerner des gestes moteurs, mais pas seulement. Par exemple, il est possible d'apprendre en quelques minutes à prononcer une dizaine de caractères japonais, au point de pouvoir les « lire » sans erreur ; mais ce faisant, vous devez maintenir activement un *task-set* dans votre LPFC, qui stocke les associations stimulus-réponse « si je vois tel caractère, je dois le prononcer de cette manière ». Ce système a un double désavantage : il est très vulnérable à la distraction (à cause du risque de désactivation des neurones du *task-set*) et il est très coûteux en terme de concentration : puisque le LPFC est occupé à stocker ce *task-set*, il lui sera quasiment impossible de mener de front une autre tâche demandant également un autre *task-set*. C'est pourquoi le lecteur expert a automatisé la conversion grapho-phonémique (l'association d'un stimulus visuel avec une manière de le prononcer) et peut lire sans utiliser le LPFC pour cette tâche. On comprend assez facilement que les troubles de l'apprentissage qui limitent le répertoire d'automatismes dans un certain domaine (la dyslexie, semble-t-il) placent souvent l'enfant dans une situation beaucoup plus exigeante sur le plan de la concentration que les autres.

Pistes de pratiques

Agir avec des intentions à court terme

Il peut être très utile d'amener les élèves à prendre l'habitude d'agir toujours en ayant très clairement en tête ce qu'ils cherchent à faire. Par exemple, dans notre programme ATOLE, nous apprenons à chaque élève à prendre successivement deux postures : d'abord celle de « Maximoi », qui face à une tâche complexe, commence par réfléchir pour la décomposer en une suite de « mini-missions » simples pour lui et à l'objectif clair et à court-terme. Il adopte ensuite la posture de « minimoi » qui accomplit chacune de ces mini-missions les unes après les autres. Pour prendre un exemple concret, la relecture d'une rédaction pourra passer par une étape de correction des accords grammaticaux, puis par une étape de vérification de l'orthographe lexical, etc., avec un découpage qui dépend de ce que cet élève en particulier a maîtrisé. Pour un adulte ou un élève plus vieux ayant une bonne maîtrise de la langue française, sa première mini-mission consistera par exemple à corriger d'éventuelles fautes de style, une deuxième mini-mission consistera à rechercher d'éventuelles fautes d'orthographe ou de grammaire, etc., dès que l'attention risque de se perdre dans des objectifs multiples, cette méthode permet de ramener autant que possible le système exécutif dans un mode de fonctionnement qui lui convient bien : avec une dissociation la plus claire possible entre d'une part les informations pertinentes pour la tâche à réaliser et les distracteurs d'autre part.

3 Attention et intention

Dans l'exercice proposé au singe, on voit que le *task-set* donne un statut privilégié à certains éléments du monde que l'animal ne peut se permettre d'ignorer : l'écran d'ordinateur, et plus précisément encore la forme des figures qui y apparaissent (et pas leur couleur). De manière générale, et comme nous l'avons vu dans l'exemple de Charlie ou du gorille invisible, le cerveau doit – pour réussir une

tâche – développer momentanément une hyper-sensibilité pour certaines propriétés physiques et pour certains types d'objets ou d'évènements, qui ensemble constituent le set attentionnel – ou en anglais *attentional-set* – qui se déduit naturellement du *task-set*¹⁶. Le set attentionnel définit ce qui est pertinent pour la tâche et ce qui ne l'est pas. Si la tâche proposée au singe consistait à appuyer sur un levier dès qu'il entendait un son aigu, le *task-set* privilégierait la modalité auditive par rapport aux autres modalités sensorielles, et le set attentionnel donnerait donc la priorité aux sons aigus. Le set attentionnel définit donc toutes les informations sensorielles que l'individu doit prendre en considération pour réaliser correctement la tâche, et par exclusion, tout ce que l'individu peut ignorer sans craindre pour sa performance. D'une certaine façon, tout ce qui ne fait pas partie du set attentionnel – dans l'environnement du joueur ou du sujet – peut être modifié, voire enlevé, sans que l'exercice en soit affecté, et sans que le joueur vraiment concentré le remarque. C'est pour cela que le gorille passe le plus souvent inaperçu.

Sur le plan neuronal, c'est la mise en place de cet *attention-set* qui se traduit par le phénomène de préparation, ou de préactivation, des régions cérébrales spécialisées dans le type d'information à traiter, que nous avons qualifié de « *top-down* ». Ce principe peut se reformuler en disant que selon un mécanisme qualifié de « compétition biaisée » (*biased competition*)¹⁷, l'activité des neurones ou des régions cérébrales impliquées dans le traitement des informations qui sont importantes pour la tâche augmente, tandis que celle des autres régions diminue, et ce phénomène s'amplifie avec la difficulté de la tâche. Dans les cas extrêmes où la tâche à réaliser est très difficile, l'activité de ces régions « inutiles » peut même aller jusqu'à s'annuler. Par exemple une aire visuelle appelée V5, d'ordinaire active dès que le cerveau perçoit des objets en mouvement, peut quasiment s'annuler chez une personne occupée à examiner de façon très attentive la couleur d'un objet en mouvement¹⁸.

III. L'attention et la concentration

J'ai plusieurs fois parlé de la concentration dans ce chapitre, sans vraiment la définir ni expliquer son lien avec l'attention. Et l'une des questions qui revient le plus souvent pour cette dernière concerne précisément la différence entre l'attention et la concentration. C'est le moment d'y répondre.

Combien de temps un enfant peut-il rester concentré ?

Ne cherchez pas, vous ne trouverez pas de meilleure réponse à cette question que celle que vous pourrez déduire de l'observation en classe d'un enfant donné, dans une activité donnée, un jour donné. Car la fatigue mentale causée par la concentration, et la résistance à cette fatigue dépendent de nombreux facteurs, comme l'âge de l'enfant, son degré de motivation pour la tâche, le niveau de continuité de sa concentration, les processus cognitifs exigés par la tâche elle-même, ou la pression et la crispation sur la performance... Nous savons bien que la concentration sur un calcul mental compliqué pendant un examen n'induit pas la même fatigue que la concentration sur un coloriage en vacances. Certains chercheurs vont d'ailleurs jusqu'à questionner l'idée même que stabiliser son attention nécessite un effort¹⁹, car effectivement, la fatigue vient-elle de l'attention ou de la nature même de l'activité que l'on est en train de réaliser ? Un enfant qui vient d'être bien concentré sur un devoir à l'école, bondit dans la cour dès que la cloche sonne comme si son temps maximum de concentration avait été largement dépassé. Mais que fait-il ensuite ? Peut-être va-t-il discuter avec un camarade, ce qui demande d'être attentif à ce que dit l'autre, peut-être va-t-il jouer « au loup », ce qui lui demande de faire attention à la position des autres joueurs et à bien suivre les consignes : il est concentré ! Et si être concentré sur une chose à la fois, sans pression ni crispation n'était pas finalement un excellent moyen de détendre son cerveau ?

1 Tentative de définition de la concentration

Si l'attention est toujours une forme de sélection, la concentration implique surtout une stabilisation de cette sélection: ce qui a été sélectionné va continuer à l'être qu'il s'agisse d'un élément perçu ou d'une manière d'interagir avec cet élément. J'ai déjà eu l'occasion de

vous dire que nous étions toujours attentifs à quelque chose et que la capacité à rechercher était celle de pouvoir stabiliser l'attention. C'est là qu'intervient la concentration. L'intensité de la concentration se traduit alors par sa continuité autant que par sa sélectivité. J'ai eu la chance de pouvoir m'entretenir un jour avec deux champions de parachutisme de précision, qui me décrivaient que dans les dix dernières secondes du saut (dont le but est de toucher du talon une cible de la taille d'une pièce d'un euro), leur attention visuelle ne peut pas dévier ne serait-ce qu'une fraction de seconde de la cible. Il s'agit donc d'un état de concentration maximal, bien caractérisé par une stabilité quasi-parfaite de l'attention.

Mais ce n'est pas tout, car le parachutiste concentré sur sa cible ne se contente pas de la regarder, il la regarde *pour corriger* la moindre déviation de son corps par rapport à celle-ci et arriver droit sur elle. La concentration est donc associée de manière plus globale que l'attention à une tâche et à une intention, plutôt qu'à un objet, et les phases de distraction s'accompagnent d'un oubli momentané de cette intention et une perte de vue de l'objectif à atteindre.

« Certains chercheurs vont d'ailleurs jusqu'à questionner l'idée même que stabiliser son attention nécessite un effort, car effectivement, la fatigue vient-elle de l'attention ou de la nature même de l'activité que l'on est en train de réaliser ? »

Et bien sûr, la concentration stabilise également une manière d'interagir avec la cible de l'attention sensorielle. Ainsi, le parachutiste maintient-il actifs des schémas d'association perception-action (« s'il se passe A, je dois faire B ») qui lui permettent de réagir de manière adéquate dès qu'il remarque une déviation de sa trajectoire : « Si je constate que la cible s'écarte sur ma gauche, je dois tirer sur la voile, etc. ». C'est le fameux *task-set*. Même si ces

consignes ne sont pas verbalisées de cette manière, elles n'en sont pas moins présentes à l'esprit du parachutiste qui les maintient en mémoire pendant toute la dernière phase du saut. Si ce n'était pas le cas, on dirait qu'il est « distrait », ou qu'il a « la tête ailleurs ». De même le lecteur concentré stabilise un ensemble de processus actifs qui le « couplent » à son livre, comme dans une danse, à travers le déchiffrement, la compréhension et la mémorisation du texte qu'il est en train de lire.

Il est donc clair que ce qui est stabilisé lors de la concentration va au-delà de la simple perception et tient plus du processus actif. On peut donc schématiser le mode de fonctionnement de la concentration en disant qu'elle implique de stabiliser trois composantes distinctes : une perception, une intention et une manière d'agir toutes trois sélectionnées parmi d'autres perceptions, d'autres intentions et d'autres manières d'agir possibles par l'attention. La personne qui est bien concentrée stabilise certaines perceptions particulières, c'est-à-dire que parmi tout ce qu'elle serait en mesure de percevoir (les rideaux, les spectateurs, etc.), elle en favorise volontairement certaines grâce à son attention, soit dans son environnement extérieur (le joueur adverse ou le livre) soit en elle (une image mentale). La concentration établit alors une différence très nette entre ce qui est pertinent pour la tâche à réaliser et qui doit bénéficier de toute l'attention, et le reste, ramené au rang de bruit de fond. Cette concentration vise ensuite un objectif, une intention, qui est de toucher la cible du pied pour le parachutiste. Enfin, la personne concentrée stabilise une manière de réagir à ce qu'elle perçoit, qui va lui permettre de s'y coupler grâce à certains processus moteurs ou cognitifs bien spécifiques, selon le mode « s'il se passe A, je fais B ».

La concentration favorise donc une perception particulière, une intention particulière et une manière d'agir ou de réagir particulière. Ces trois composantes, perception, intention et manière d'agir (P, I, M), assurent la concentration de l'attention. La concentration

stabilise donc un « programme attentionnel », défini par ces trois lettres P, I et M. Se concentrer, c'est stabiliser un programme attentionnel, ou une suite prédéfinie de programmes attentionnels. Nous nous approchons ainsi d'une définition de la concentration qui a une véritable valeur pratique, puisqu'elle nous encourage, pour bien nous concentrer, à avoir une conscience très claire de chacune des trois composantes qui constituent notre *programme attentionnel* : à quoi dois-je faire attention, à quelle perception (P) ? Pour quoi faire, dans quelle intention (I) ? De quelle manière dois-je agir pour faire évoluer cet objet d'attention, ou réagir quand il évolue (M) ?²⁰

Pistes de pratiques

Le programme ATOLE

Dans le programme ATOLE, nous essayons autant que possible de faire expliciter aux élèves les trois composantes P, I et M qui définissent la manière de se concentrer sur la tâche qu'ils s'approprient à réaliser (quand celle-ci demande effectivement de la concentration). Par exemple, la perception à privilégier quand quelqu'un raconte une histoire est évidemment la voix de cette personne, et la manière de réagir à ce qui est dit peut être d'associer quand c'est possible les mots entendus à des images mentales (« le renard sortit de la forêt »), dans l'intention de se fabriquer « dans la tête » une sorte de petit film que l'on pourra raconter ensuite. Ces « PIM » constituent des sortes de petits modes d'emploi expliquant à l'enfant « ce qu'il suffit de faire » pour être concentré pendant une activité en particulier.

« On peut donc schématiser le mode de fonctionnement de la concentration en disant qu'elle implique de stabiliser trois composantes distinctes : une perception, une intention et une manière d'agir toutes trois

sélectionnées parmi d'autres perceptions, d'autres intentions et d'autres manière d'agir possibles par l'attention. »

Prenons tout de suite un exemple simple : ce jeu consistant à maintenir un manche à balai en équilibre vertical sur la paume de la main. Une personne bien concentrée réagit en bougeant la main à chaque mouvement du balai pour le garder le plus droit possible. Elle privilégie donc avec son attention une perception (les mouvements du balai, par exemple en fixant du regard le haut du manche pour détecter la moindre accélération), une intention (garder le balai aussi droit que possible) et une manière d'agir (en bougeant la main). Si cette personne réagit au contraire un peu au hasard à tout ce qui se passe autour d'elle sans intention précise, elle n'est pas concentrée et le balai tombe par terre. Elle est d'autant plus concentrée qu'elle a clairement en tête ce qu'elle cherche à faire (son intention), ce qu'elle doit percevoir, et la manière dont elle doit agir ou réagir pour y arriver. Ces trois composantes P, I et M, définissent une forme de mode d'emploi précisant ce qu'il faut faire concrètement pour se concentrer sur cette tâche (et enfin répondre à l'élève qui demande « Maitresse, ça veut dire quoi être concentré ? »).

2 Peut-on faire deux choses à la fois ?

Cette définition de la concentration implique directement qu'il est impossible de réaliser en même temps deux tâches nécessitant chacune d'être concentré, parce qu'il faudrait alors privilégier deux cibles perceptives différentes, et réagir en même temps de deux manières différentes, en maintenant dans le cortex préfrontal simultanément actifs deux task-sets différents. Si vous souhaitez vous en convaincre, relisez ce paragraphe en comptant simultanément et séparément, le nombre de 'e', de 's' et de 't'. Dans

toute situation d'enseignement, prenez donc toujours garde à ce que les élèves n'aient pas à se concentrer sur deux tâches en même temps. Cela peut sembler trivial, mais en développant votre capacité à observer l'attention chez l'autre, vous vous rendrez vite compte que les élèves sont très souvent en train de se concentrer (en vain) sur deux choses à la fois, et la plupart du temps sans le savoir. Présenter un exposé tout en se souciant du regard des autres est une forme de concentration double, tout comme essayer d'écouter l'enseignant tout en réfléchissant à autre chose (ou à ce qui vient d'être dit).

« Prenez l'habitude de vous demander ce que l'enfant cherche à faire, de manière consciente ou inconsciente car cela détermine quelles informations lui paraissent importantes et vont retenir son attention. »

Situation de « mauvais multi-tâche »

Il est extrêmement facile de mettre les élèves en situation de « mauvais multi-tâche » (c'est-à-dire, une situation exigeant une attention vraiment simultanée sur deux cibles bien distinctes). Par exemple, quand vous affichez des mots sous les yeux d'un élève, son réflexe est de commencer à les lire, ce qui n'est pas compatible avec l'écoute attentive d'instructions orales si bien que fatalement, la qualité de l'écoute sera réduite pendant le temps passé à lire. De même, un élève qui commence à réfléchir à la consigne qu'il a sous les yeux sera moins réceptif à une consigne orale. Prenez l'habitude de vous demander ce que l'enfant cherche à faire, de manière consciente ou inconsciente car cela détermine quelles informations lui paraissent importantes et vont retenir son attention. L'exemple cité dans le texte est révélateur : un élève qui présente un exposé accumule les intentions qui parasitent son attention. Il cherche certes à présenter clairement son histoire, mais aussi à ce que ses camarades réagissent bien à ce qu'il dit, et peut-être qu'ils ne se moquent pas de lui, que vous soyez content(e), peut être aussi cherche-t-il à se dépêcher si vous lui avez fait signe qu'il allait trop lentement... Chaque intention le met naturellement en recherche de certaines informations importantes pour ce but particulier : les réactions des autres élèves, votre expression faciale, les propres réactions émotionnelles de l'enfant... L'attention est alors très facilement distraite par toutes ces informations.

3 Voir ou penser, il faut choisir

Les expériences menées en neuroimagerie depuis presque trente ans montrent une déactivation quasi-systématique d'un réseau bien spécifique de régions cérébrales dès que le sujet porte son attention sur un élément extérieur (par exemple pour chercher un objet)²¹. Ce réseau, appelé « Réseau par défaut » englobe assez largement les

régions du cerveau qui nous permettent de nous projeter dans le passé ou dans l'avenir, pour générer des images mentales et des petits scénarios imaginaires de « la dernière fois que nous avons pris le train » ou de « ce que je vais faire ce week-end ». Ces scénarios constituent l'une des bases de ce que nous appelons « réfléchir » mais aussi plus prosaïquement « être dans la lune » : ils sont générés grâce à la réactivation et l'assemblage en mémoire de travail, généralement sous la forme d'images mentales, d'éléments de souvenirs puisés dans notre mémoire à long-terme. Parmi les structures impliquées, la partie avant du lobe temporal médian (mémoire à long-terme) et le precuneus (imagerie), se désactivent ainsi spontanément pendant des tâches qui nécessitent d'interagir avec son environnement extérieur, ce qui limite alors nos capacités de réflexion. Voilà pourquoi, comme on le savait bien, l'élève un peu dans la lune n'écoute rien de ce qui se passe en classe. Mais c'est aussi le cas d'un élève un peu décalé par rapport au cours, qui réfléchit tout simplement à une notion abordée ou au problème suivant, au moment d'une explication. Nous voyons donc que pour des raisons finalement assez simples de mécanique cérébrale, la réflexion demande un désengagement temporaire du monde extérieur qui n'est pas possible dans un contexte de sollicitation permanente.

4 Faire deux choses à la fois... quand même

Il y a tout de même deux cas de figure où une personne peut mener de front plusieurs tâches à la fois (ou en donner l'impression). C'est d'abord le cas lorsque cette personne réalise des tâches largement automatisées. Nous l'avons vu, le cerveau finit à force de répétition par automatiser certaines tâches au point de pouvoir les réaliser avec très peu d'attention. Depuis les travaux menés par les psychologues Walter Schneider et Richard Shiffrin dans les années 1970, nous savons que le cerveau peut alors rediriger son attention

vers une seconde tâche, sans baisse de performance pour la tâche automatisée²².

« C'est l'un des grands enjeux de tout processus d'apprentissage que de développer un répertoire d'automatismes, qui permettent ensuite d'agir efficacement avec un minimum d'attention. »

Avec l'habitude, et donc l'entraînement, il devient effectivement possible de faire deux choses à la fois, comme conduire et tenir une conversation, voire même écrire un texte sous la dictée tout en lisant un autre. C'est pour cela qu'un enfant peut parler tout en faisant du vélo. Je le répète, c'est l'un des grands enjeux de tout processus d'apprentissage que de développer un répertoire d'automatismes, qui permettent ensuite d'agir efficacement avec un minimum d'attention.

En dehors de ces cas de figure, une personne peut donner l'impression de faire attention à deux choses à la fois, alors que son attention ne fait que basculer de l'une à l'autre. Dans ce cas, sa capacité à mener plusieurs actions de front repose alors sur un système exécutif efficace capable de programmer optimalement l'attention dans le temps, pour passer d'une tâche à l'autre selon les mécanismes de *task-switching*, c'est-à-dire de bascule d'une tâche à une autre (grâce à la capacité connue sous le nom de flexibilité cognitive)

« Dans le multi-tâche observé chez les élèves, la bascule d'une tâche à une autre (cesser d'écouter l'enseignant pour discuter ou regarder son téléphone) n'est pas vraiment raisonnée mais déclenchée par des envies soudaines, sous l'impulsion de systèmes de capture réflexe de l'attention »

C'est possible, car la plupart des activités quotidiennes n'exigent pas, heureusement, la stabilité de l'attention du parachutiste en fin de saut. Au moment d'écrire ces lignes, par exemple, je peux jeter des petits coups d'oeil par la fenêtre sans pour autant abandonner ce que je suis en train de faire et je reste « globalement » concentré. Cette petite pause de quelques secondes dans mon attention aura comme seule conséquence de ralentir de quelques secondes l'écriture de ce paragraphe. Selon ce que nous avons à faire, une « bonne concentration » peut donc impliquer une stabilisation de l'attention à des échelles de temps différentes, depuis la seconde ou même la fraction de seconde chez le parachutiste ou le skieur olympique, jusqu'à des durées beaucoup plus longues pour l'écriture ou la révision d'examens.

Les techniques de lecture rapide démontrent par exemple qu'il est possible de comprendre le sens général d'un texte en piochant seulement certains mots ici et là et il en est de même pour un exposé oral. C'est pourquoi certains élèves peuvent donner l'impression d'écouter tout en faisant autre chose, surtout s'ils sont intellectuellement précoces.

La concentration ne s'oppose donc pas fondamentalement au « mode multi-tâche », si caractéristique de notre époque, puisqu'il est en effet possible de jongler efficacement entre plusieurs tâches tout en restant concentré, mais cela demande d'alterner consciemment entre les programmes attentionnels qui leur sont associés en décidant à chaque fois du bon moment pour basculer d'une tâche à l'autre. Dans le multi-tâche observé chez les élèves, ce n'est généralement pas le cas. La bascule d'une tâche à une autre (cesser d'écouter l'enseignant pour discuter ou regarder son téléphone) n'est pas vraiment raisonnée mais déclenchée par des envies soudaines, sous l'impulsion de systèmes de capture réflexe de l'attention que nous allons bientôt aborder. Il en résulte que l'élève rate des éléments d'explication importants. C'est pourquoi il est toujours préférable de préciser à l'avance, le niveau de

concentration (en terme de continuité) que va nécessiter l'activité que vous abordez, et la durée de concentration nécessaire.

5 Un peu de distraction

J'ai pour l'instant surtout détaillé les mécanismes qui permettent de rester concentré. Mais vous l'aurez sans doute remarqué, il arrive que nous soyons malgré tout distrait, sous l'effet d'un système général permettant la capture de l'attention par des stimuli ayant soit des caractéristiques physiques particulières les rendant particulièrement saillantes (comme la sirène du camion de pompier) soit une valeur émotionnelle particulièrement forte (qu'elle soit plaisante ou déplaisante). Cette fois, la redirection de l'attention ne s'effectue pas « depuis le haut » (*top-down*) mais depuis les structures situées en bas de la hiérarchie cérébrale et on parle alors d'orientation « bottom-up » de l'attention.

6 La distraction par des évènements physiquement saillants

De par sa nature sélective, l'attention crée non seulement des zones de « lumière » dans notre champ perceptif, mais également des zones « d'ombre », comme l'illustre à merveille le film du gorille. Mais ces zones d'ombre peuvent être gênantes, voire franchement dangereuses, quand il s'y passe des choses que nous ne devons surtout pas ignorer, comme lorsqu'un camion de pompier traverse un carrefour à pleine vitesse. Pourtant, nous remarquons le camion même si nous faisons attention de l'autre côté de la route l'instant d'avant, et fort heureusement. Notre espèce n'aurait pas survécu jusqu'ici sans un système capable d'attirer l'attention de manière automatique vers des évènements potentiellement importants dans des zones de l'espace laissées jusqu'ici « dans l'ombre ». Ce système est dit préattentif, car il analyse et réagit à ce qui parvient à nos sens (qu'il s'agisse d'images, de sons, ...) avant même que nous n'y fassions attention et les évènements qui le font réagir sont dits

« saillants », car propres à attirer spontanément l'attention²³. Plus quelque chose est saillant, plus il stimule notre système préattentif, et réciproquement. Si vous avez du mal à travailler à côté d'un bébé qui pleure, c'est parce que les cris du bébé sont saillants. Vous comprenez donc que ce système qui vise au départ à nous protéger, est aussi un magnifique système de distraction. Et il est conçu pour capturer notre attention en moins d'une demi-seconde, car c'est à cette vitesse qu'il faut généralement réagir pour éviter le danger. En classe, c'est ce système qui amène tous les élèves à tourner la tête quand la porte s'ouvre soudainement, bien qu'ils ne l'aient pas « décidé »

Ce système préattentif calcule à tout moment des cartes de saillance, indiquant les zones de l'espace où il se passe quelque chose d'important, et qui se situent, au moins en partie, dans le lobe pariétal²⁴. Ces cartes de saillance sont le résultat de calculs automatiques menés au sein des aires visuelles qui analysent rapidement l'image que nous avons sous les yeux, en moins de deux dixièmes de seconde – pour en extraire les contours des différents objets, leur vitesse, leur couleur, et toutes sortes d'informations utiles pour déterminer les éléments de l'image qui se démarquent nettement de leur environnement immédiat. Les caractéristiques propres à attirer l'attention sont alors le mouvement (sur l'écran d'une télévision en face de vous par exemple), la luminosité, la couleur, et dans le cas des sons, l'intensité, entre autres. Et il faut ajouter à ce tableau la capacité pour ces aires sensorielles de détecter dans une scène des éléments un peu complexes, mais stéréotypés et d'une grande importance écologique, et de les rendre saillants : c'est pour cela que les visages attirent particulièrement l'attention, ou bien les bruits de votre bébé au milieu de la nuit même s'il toussote doucement.

7 La capture et la captivation de l'attention

Il n'existe pas vraiment de manière de résister à ces captures de l'attention qui font partie intégrante de notre système de survie. Essayer de les empêcher, c'est surtout risquer de s'épuiser en passant plus de temps à vérifier que l'on est bien concentré (et à constater avec regret que ce n'est pas le cas) plutôt qu'à se concentrer vraiment. Bien sûr, il peut arriver d'être « pris » par ce que l'on fait au point de ne plus remarquer les petites distractions alentour, mais cela reste un cas assez exceptionnel et potentiellement dangereux (par exemple, en lisant un sms en traversant la rue). La bonne nouvelle, c'est que la capture de l'attention est un phénomène bref, qui ne vise qu'à analyser rapidement ce qui a capturé l'attention et évaluer sa réelle importance.

Ce qu'il faut par contre surveiller, c'est le déclenchement éventuel à la suite de cette capture d'une cascade de réactions dans le cerveau pour sur-analyser et sur-réagir à la distraction initiale. J'ai appelé captivation cette deuxième phase qui suit souvent la capture²⁵, pendant laquelle nous sommes pris dans un emballement d'actions automatiques déclenchées par le distracteur. Une fenêtre s'ouvre dans un coin de votre écran pour vous prévenir de l'arrivée d'un mail et vous la remarquez : c'est la capture. Vous cliquez sur le bouton « répondre » sans trop savoir pourquoi, juste parce c'est ce qu'on fait en général avec un bouton et vous commencez machinalement à lire et à rédiger une réponse, alors que vous étiez concentré sur un document important : c'est la captivation. Vous partez chercher quelque chose dans la cuisine et vous apercevez une chaussette d'un enfant dans le couloir : c'est la capture. Vous la ramassez pour la ranger en oubliant ce que vous étiez parti chercher : c'est la captivation.

8 Le circuit de la récompense et la saillance affective

Au-delà des stimuli saillants physiquement, notre attention est aussi

spontanément attirée par tout ce qui est susceptible de déclencher en nous une sensation agréable (et parfois désagréable). C'est heureux, car les stimuli émotionnels se doivent d'attirer l'attention : nous ne pouvons pas nous permettre d'ignorer un serpent ou une personne furieuse s'avançant vers nous. Il est donc normal que la saillance d'un événement ou d'un stimulus dépende aussi de sa valence émotionnelle, positive ou négative. C'est en partie dû à une petite structure en forme d'amande tapie dans le lobe temporal, l'amygdale, grâce à laquelle notre cerveau peut très rapidement évaluer la valence émotionnelle d'un stimulus et y déplacer l'attention. Les stimuli ayant une valence émotionnelle forte capturent plus facilement l'attention que les stimuli neutres et comme l'écrit le neurologue Antonio Damasio, « la réponse émotionnelle que nous ressentons en présence de tel ou tel objet joue un rôle majeur dans sa capacité à attirer ou non notre attention »... et, pourrais-je rajouter, à la captiver ; ce que Damasio désigne sous le terme anglais d'*attention dwelling*²⁶, qui traduit bien cette idée de durée – *to dwell* signifie rester, habiter, résider. Cette forme de captivation dépend principalement de l'intensité et de la qualité du ressenti, plaisir ou déplaisir, en présence de l'objet, comme si la captivation avait pour but de prolonger cette sensation ou de la réduire. D'ailleurs, en français, le mot distraction fait souvent référence à cette notion de plaisir. Se distraire, c'est s'amuser, s'extraire de son travail par exemple, pour passer à une autre activité agréable qui change les idées : « arrête un peu ton boulot, viens te distraire un peu ! »²⁷.

La recherche du plaisir est effectivement l'un des grands moteurs de la distraction. Par chance, ce circuit du plaisir commence à être bien connu, depuis les travaux de James Olds et Peter Milner, à l'université McGill de Montréal dans les années cinquante, qui eurent l'idée étrange de relier chez des rats plusieurs régions sous-corticales à une petite pédale²⁸. En appuyant sur la pédale, les rats activaient les neurones connectés grâce à de petites stimulations

électriques. Olds et Milner eurent la surprise de constater que leurs rats privilégiaient cette occupation à toute autre activité, au point d'appuyer jusqu'à sept cent fois par jour plutôt que de boire ou de manger. Le « circuit de récompense » du cerveau venait d'être découvert. Il existe donc dans le cerveau des neurones dont la stimulation directe constitue à elle seule une récompense plus forte qu'un bon diner pour un ventre affamé. Ce circuit, en interaction étroite avec l'amygdale, existe également chez l'homme, et les lésions qui l'affectent engendrent une difficulté à ressentir du plaisir, que l'on appelle l'anhédonie.

Et n'allez pas croire que ce circuit ne sert qu'à déclencher des comportements d'addiction, car si c'est effectivement lui qui est au centre des addictions aux drogues dures, il réagit aussi à toute sorte de récompenses, même les plus inoffensives : un sourire, une conversation agréable, voire simplement le plaisir de découvrir et d'apprendre. Il peut donc soit nous distraire, soit nous aider à nous concentrer, selon la situation. Mais une éducation de l'attention passe par la prise de conscience que notre cerveau passe son temps à poser virtuellement des petits post-it verts et rouges sur tout ce qui nous entoure pour signaler leur caractère agréable ou désagréable, voire dangereux, et pour nous prévenir en y attirant l'attention ou en déclenchant au contraire des comportements d'évitement : pour ne surtout pas faire attention à un exposé jugé « barbant » par exemple. C'est donc une force extrêmement puissante qui s'exerce sans relâche sur notre attention, pour l'attirer ou l'éloigner et qu'il faut simplement savoir observer sans la laisser prendre tout le contrôle. Sans quoi, nous en sommes réduits à ne plus pouvoir faire attention à autre chose que ce que nous jugeons immédiatement plaisant, distrayant, excitant, amusant, « rigolo », « cool » ... et à fuir tout ce qui demande un peu d'approfondissement et d'effort. Ce serait malheureusement se priver de toutes les satisfactions qui « se méritent ».

9 Résister à la distraction

Sous l'effet de ces mécanismes, notre attention s'oriente spontanément vers les éléments les plus naturellement saillants, physiquement et émotionnellement, de l'environnement, comme les affiches publicitaires ou les écrans vidéo. Malgré tout, le film du gorille montre que ce système très distrayant a ses limites, quand il est contré par le système exécutif animé par un but clair : bien qu'un gorille qui se frappe la poitrine en face de nous soit en principe un stimulus très saillant, il est possible de ne même pas le remarquer. C'est ce que l'on peut appeler le pouvoir de la concentration.

Finalement, la clef de la résistance à ces distractions réside donc dans la capacité du système exécutif à contrer un par un chacun de ces mécanismes à l'aide d'objectifs clairs. Nous l'avons vu : au sein du cortex préfrontal, le système exécutif sait maintenir activement en mémoire un objectif précis et favoriser l'activité des réseaux de neurones qui permettent de l'atteindre. Sous cette influence, l'attention ne se déplace plus au gré du vent, vers les stimuli les plus colorés, les plus brillants, les plus bruyants ou les plus sympathiques, mais en fonction de l'objectif que l'on s'est fixé ; il y a quelqu'un à la barre pour maintenir le cap, et pour en changer le moment venu.

Mais tout cela n'est valable chez un enfant (et un adulte) que s'il a effectivement un cap bien défini (et pas plusieurs en même temps). Car tant qu'il agit avec plusieurs objectifs en tête qui ne sont pas clairement hiérarchisés, toutes les informations qui lui parviennent sont d'importance égale, et son attention ne sait pas où se placer. Pour être bien concentré, il est donc important de privilégier consciemment un objectif à la fois et de s'y tenir, ne serait-ce que pendant quelques minutes. Cette capacité à programmer l'attention permet alors de définir des « bulles de simplicité », pendant lesquelles on ne s'autorise à se concentrer que sur une seule activité, sans craindre que le monde ne s'effondre. Et rien n'empêche de visualiser très rapidement ce que l'on souhaite faire pendant chaque

« bulle », avant de lancer le compte à rebours. Ces petites bulles conviennent parfaitement au mode de fonctionnement du cortex préfrontal. En vous focalisant sur un objectif simple et unique, celui-ci bénéficie naturellement d'une activité neuronale forte et soutenue dans le cortex préfrontal dorsal latéral, qui se maintient d'autant plus facilement que la « bulle » est de courte durée. Et cette activité est encore renforcée sous l'influence des neurones du circuit de récompense, très actifs en prévision de la satisfaction rapide et certaine d'une mission accomplie²⁹.

Mais sachez tout de même que même avec un objectif clair, la capacité de concentration dépend toujours de l'efficacité du cortex préfrontal, qui peut varier au fil de la journée sous l'effet de la fatigue et du stress³⁰. Chez un élève stressé ou fatigué, les concentrations de deux types de neurotransmetteurs (ces molécules qui assurent la transmission de l'activité d'un neurone à un autre), la dopamine et la noradrénaline, s'éloignent des valeurs optimales pour le système de stabilisation de l'attention dans le cortex préfrontal. Un enfant fatigué ou stressé aura donc plus de difficultés à se concentrer. La capacité de concentration dépend donc de l'hygiène de vie en général.

Pistes de pratiques

Apprendre à résister à la distraction

L'un des exercices que nous proposons en classe consiste à faire identifier à l'élève tout ce qui autour de lui va l'aider dans la tâche qu'il s'apprête à accomplir, et tout ce qui risque de le distraire. Un distracteur est d'autant plus puissant que l'enfant ne peut pas se convaincre qu'il peut totalement l'ignorer, sans risque. Si bien que les distracteurs les plus puissants sont bien sûr les autres élèves; parce qu'ignorer totalement ses camarades, et ne pas réagir du tout à leurs « appels d'attention », c'est donner l'impression qu'on cherche à s'isoler du groupe et de sa vie sociale avec toutes les conséquences que cela implique. C'est pourquoi les élèves qui ont le plus de difficultés à rester attentifs sont souvent placés au premier rang, pour ne pas avoir les autres élèves entre eux et le tableau.

Conclusion

Si vous devez retenir deux idées de ce chapitre, c'est que l'attention peut s'enseigner et qu'elle devrait l'être (non seulement auprès des élèves d'ailleurs, mais aussi auprès des enseignants et des parents). Et j'ai bon espoir que l'engouement actuel pour les neurosciences cognitives aura au moins comme apport positif d'entraîner cette prise de conscience que l'attention est un phénomène biologique malléable. A l'heure où la capture de l'attention est en train de devenir un enjeu économique majeur, cette éducation de l'attention sera l'une des grandes réponses que nous pourrions proposer pour assurer que les générations émergentes décideront par elles-mêmes de ce qui occupera leur univers sensoriel et mental.

Les Essentiels

- Les moteurs de la distraction sont des systèmes qui, dans le cerveau, sont là pour permettre la survie de l'espèce.
- Le sens de l'équilibre attentionnel se développe non pas en éliminant avec force toutes les distractions, mais en sachant ressentir et compenser rapidement leur action.
- Il est d'autant plus simple de se concentrer qu'on agit avec une intention claire.
- La capacité à stabiliser son attention est une compétence transverse, indispensable pour toute forme d'apprentissage.

1. James W., "the faculty of voluntarily bringing back a wandering attention, over and over again, is the very root of judgment, character, and will [...]. An education which should improve this faculty would be the education par excellence", *The Principles of Psychology*, Holt, 1890.

2. Citton Y. (Ed.), *L'économie de l'attention. Nouvel horizon du capitalisme ?*, La Découverte, 2014.

3. Tout ce qui est expliqué rapidement dans ce chapitre l'est de manière beaucoup plus exhaustive dans mes deux ouvrages sur l'attention à destination du grand public dont voici les références : Lachaux J. P., *Le cerveau attentif. Contrôle, maîtrise, lâcher-prise*. Odile Jacob, 2011 ; Lachaux J. P., *Le cerveau funambule. Comprendre et apprivoiser son attention grâce aux neurosciences*, Odile Jacob, 2015.

4. "The essence of attention as a conscious process is an increase in the clearness on one idea or a group of ideas at the expense of others": Pillsbury W. B., *L'attention*, Doin, 1906.

5. James W., *The principles of psychology*, Holt, 1890.

6. Stroop J. R. (1935). Studies of inference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643-662.

7. Ce type d'enregistrements cérébraux est effectué à l'aide d'électrodes placées directement dans le cortex chez des patients à des fins thérapeutiques. Ce sont les enregistrements les plus précis que l'on puisse réaliser d'un cerveau humain en activité, et toutes les précautions méthodologiques sont bien sûr prises à fin d'assurer que les conclusions obtenues sont également valables chez un sujet en bonne santé.

8. Mainy N., Kahane P., Minotti L., Hoffmann D., Bertrand O., Lachaux J. P. (2007). Neural correlates of consolidation in working memory. *Human Brain Mapping*, 28(3), 183-193 ; voir aussi : Jensen O., Kaiser J., Lachaux J. P. (2007). Human gamma-frequency oscillations associated with attention and memory. *Trends in Neurosciences*, 30(7), 317-324.

9. Jung J., Mainy N., Kahane P., Minotti L., Hoffmann D., Bertrand O., Lachaux J. P. (2008). The neural bases of attentive reading. *Human Brain Mapping*, 29(10), 1193-1206.

10. Rensink R. A., O'Regan J. K., Clark J. J. (1997). To see or not to see: The need for attention to perceive changes in scenes. *Psychological Science*, 8(5), 368-373.

11. Corbetta M., Shulman G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 3(3), 201.

12. Chabris C., Simons D., *The invisible gorilla: And other ways our intuitions deceive us*, Harmony, 2011.

13. Malebranche N., *De la recherche de la vérité*, 1674, livre 6 chapitre 2.

14. Tanji J. et al. (2007). Concept-based behavioral planning and the lateral prefrontal cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(12), 528-34.

15. Watanabe M. (1996). Reward expectancy in primate prefrontal neurons. *Nature*, 382, 629-32 ; je renvoie également le lecteur à l'article de Luis Pessoa sur le lien entre motivation et cognition : Pessoa L. (2008). On the relationship between emotion and cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(2), 148-58.

16. Sakai K. (2008). Task set and prefrontal cortex. *Annual Review of Neuroscience*, 31, 219-245.

17. Desimone R., Duncan J. (1995). Neural mechanisms of selective visual attention. *Annual Review of Neuroscience*, 18(1), 193-222.

18. Rees G. et al. (1997). Modulating irrelevant motion perception by varying attentional load in an unrelated task. *Science*, 278(5343), 1616-9.

19. Bruga B. (Ed.), *Effortless attention: A new perspective in the cognitive science of attention and action*, MIT Press, 2010.

20. Lachaux J.P., *Le cerveau funambule. Comprendre et apprivoiser son attention grâce aux neurosciences*, Odile Jacob, 2015.
21. Fox M. D., Snyder A. Z., Vincent J. L., Corbetta M., Van Essen D. C., Raichle M. E. (2005). The human brain is intrinsically organized into dynamic, anticorrelated functional networks. *PNAS*, 102(27), 9673-9678.
22. Shiffrin R. M., Schneider W. (1977). Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending, and a general theory. *Psychological Review*, 84, 127-190 ; Hirst W. et al. (1980). Dividing attention without alternation or automaticity. *Journal of Experimental Psychology: General*, 109, 98-117.
23. Gottlieb J. (2007). From thought to action: the parietal cortex as a bridge between perception, action, and cognition. *Neuron*, 53(1), 9-16.
24. Une région du lobe pariétal appelée LIP, correspondant à la partie latérale (L) du sillon intrapariétal (IP), possède des neurones dont l'activité ne signale pas simplement la présence ou l'absence d'une forme ou d'un mouvement particulier; mais surtout, lorsqu'elle est élevée, que l'individu va orienter son attention vers cette région de l'espace. Autrement dit, il suffirait de mesurer dans votre cerveau l'activité de tous les neurones de cette région pour deviner, sans trop se tromper, où va s'orienter votre attention l'instant d'après. Et comme la nature est bien faite, ces neurones sont voisins d'autres neurones très impliqués dans le déplacement du regard, ce qui permet au cerveau de coordonner facilement les déplacements du regard avec ceux de l'attention, avec l'aide d'une région sous-corticale répondant au joli nom de colliculus supérieur.
25. Lachaux J.P., *Le cerveau attentif. Contrôle, maîtrise, lâcher-prise*, Odile Jacob, 2011.
26. Damasio A. R., *The Feeling of What Happens*, Harcourt Brace, 1999.
27. Rappelons quand même que le mot distraction vient du mot latin *distrahere* (déchirer) : l'attention est alors tiraillée entre « ce qu'on est en train de faire » et « ce qu'on devrait aussi faire », ce qui peut laisser l'impression désagréable d'un esprit déchiré.
28. Olds J. Milner P. (1954). Positive reinforcement produced by electrical stimulation of septal area and other regions of rat brain. *Journal of Comparative Physiology and Psychology*, 47(6), 419-27. Les régions concernées étaient principalement les noyaux du septum et le nucleus accumbens.
29. Nous pouvons nous inspirer des plongeurs qui pêchent des perles en apnée. Ces pêcheurs remontent régulièrement à la surface pour reprendre leur respiration, et hors de l'eau décident du prochain endroit qu'ils vont explorer (ce qu'ils vont faire dans la minute qui suit). Une fois sous l'eau, ils nagent précisément vers l'endroit qu'ils ont choisi, regardent s'ils voient une perle et remonte (phase d'exécution), et ainsi de suite. Planification, exécution, planification, exécution... sur des durées courtes et avec à chaque fois un objectif très clair.
30. Arnsten A. F. (2009). Stress signalling pathways that impair prefrontal cortex structure and function. *Nature Reviews Neuroscience*, 10(6), 410-22.

La méditation pour les enfants

par Christophe André

Simple mode ou vague de fond ? La méditation a envahi notre quotidien depuis quelques années : on médite à l'hôpital, dans les prisons, à l'Assemblée nationale, en entreprise, dans les écoles... Voilà pourtant près de 2500 ans que les premiers enseignements du Bouddha évoquent cette pratique, et presque deux millénaires que les premiers ermites chrétiens en ont décrit, eux aussi, les bases : rien de bien nouveau, donc.

La pleine conscience

Mais ce qui a changé, c'est que la méditation dont notre société semble s'être éprise est aujourd'hui une méditation laïque : la pleine conscience. Cette approche recommande de s'entraîner très régulièrement à poser son attention dans l'instant présent, et d'observer, simplement d'observer, phénoménologiquement, les composantes de son expérience subjective : ressentir son souffle, son corps, écouter les sons environnants, observer ses pensées en s'efforçant de ne pas les suivre ni les alimenter¹. Il s'agit donc d'une démarche très simple, basée sur des consignes très concrètes, impliquant notamment l'observation du corps, et que les enfants comprennent immédiatement.

De très nombreuses recherches scientifiques attestent aujourd'hui des bénéfices de la pratique méditative. Ses impacts favorables sur

la santé, par exemple, ont convaincu le monde médical, qu'il s'agisse d'un impact biologique (amélioration de l'immunité, ralentissement du vieillissement cellulaire, inactivation de l'expression de nombreux gènes liés au stress et à l'inflammation) ou d'un impact clinique (régulation de la souffrance physique ou psychique, prévention des rechutes dépressives, amélioration de la qualité de vie et diminution du stress lié aux pathologies chroniques). En outre, ses bénéfices sur plusieurs composantes psychologiques, au premier plan desquelles l'attention et la régulation émotionnelle, indispensables pour tout apprentissage, sont en train de convaincre nombre de parents et de pédagogues.

Car la méditation est un remarquable entraînement attentionnel : elle aide ses pratiquants à mieux identifier le fonctionnement de cette capacité essentielle à toute forme d'apprentissage, mais aussi au bien-être personnel. Lorsqu'on médite, l'esprit tend bien évidemment à vagabonder : notre cerveau est une machine à produire des pensées, et il est illusoire d'espérer les arrêter. Il est par contre possible d'apprendre à reconnaître ce phénomène, à en observer la survenue dans son esprit, et à régulièrement ramener son focus attentionnel vers sa respiration. Pourquoi la respiration ? Parce qu'il s'agit d'une cible attentionnelle mouvante, et non fixe, et que notre attention – que nous soyons adultes ou enfants – est plus facilement captée par ce qui bouge que par ce qui est fixe. D'où la fascination exercée sur les humains par les feux de bois ou les vagues de l'océan : mouvement permanent et doux, qui capte l'attention et apaise les émotions.

L'amélioration de l'équilibre émotionnel est une autre des conséquences favorables de la pratique méditative. D'où son intérêt pour les psychothérapeutes, qui y ont aujourd'hui recours notamment pour la prévention des rechutes dépressives, le traitement des troubles anxieux et la gestion du stress. La méditation de pleine conscience apprend à ses pratiquants, adultes ou enfants, à se rendre présents aux mouvements émotionnels.

Qu'ils soient agréables : être plus attentifs aux bons moments et aux petits bonheurs, mieux en observer l'inscription corporelle (d'où la célèbre remarque de Camus, dans *L'Envers et l'endroit* : « Ce n'est plus d'être heureux que je souhaite aujourd'hui, mais d'être conscient »). Ou qu'ils soient douloureux : en apprenant à mieux comprendre leurs émotions désagréables, la manière dont elles crispent leur corps, dont elles modifient leurs pensées, les enfants s'initient à l'une des bases de l'intelligence émotionnelle. Qu'il s'agisse d'attention ou d'émotions, la méditation est ainsi une forme d'entraînement de l'esprit, et vu sous cet angle, elle est au cerveau ce que l'exercice physique est au corps.

La méditation pour l'enfant

Jusqu'à ces dernières années, elle était surtout une affaire d'adultes. Mais de nombreuses codifications de ces apprentissages à la méditation, spécifiquement destinées aux enfants², ont été récemment proposées, et leur intérêt validé. L'expérience des psychologues praticiens auprès de leurs jeunes patients anxieux, comme celle des enseignants qui en proposent une forme simplifiée dans leurs classes, est que les enfants adoptent facilement les exercices proposés et adaptés à leur manière de comprendre la distraction ou l'inquiétude. Les exercices se font à peu près toujours en groupe. Ils sont brefs et incluant tous les élèves, s'il s'agit d'une simple sensibilisation à l'école ou au collège, par exemple des « temps calmes » de quelques minutes, en début de travail ou lorsque l'attention fléchit, durant lesquels on se centre ou se recentre sur une cible attentionnelle simple, respiration ou sons. Ils sont plus longs et hors des horaires de classe s'il s'agit d'un apprentissage approfondi, réunissant alors une dizaine d'enfants ou adolescents de même classe d'âge, dans un cycle de séances hebdomadaires de 30 mn à 2 h, pendant 2 à 3 mois. Contrairement à certaines critiques, il ne s'agit pas de formater les

enfants, ou de détourner les adultes qui en ont la charge de s'interroger aussi sur les causes de leur distraction ou de leur anxiété. La méditation ne prétend pas se substituer à une thérapie, ni à quoi que ce soit d'autre, mais simplement s'inscrire dans les composantes d'un mode de vie adapté, se rangeant aux côtés, par exemple, d'une activité physique régulière, d'une alimentation équilibrée, de contacts fréquents avec la nature, etc., toutes choses dont les bienfaits sur les enfants (et les adultes) sont largement attestés.

Et puis, l'intérêt de la méditation, sous cette forme simple et accessible de la pleine conscience, se situe aussi dans la protection qu'elle offre face à des perturbations liées à notre société d'hyperconsommation, notamment les perturbations liées aux sur-sollicitations : l'exposition quotidienne, notamment en milieu urbain, à une pléthore de publicités, d'images, d'écrans, d'intrusions attentionnelles, sources de dispersion, est considérée par beaucoup de chercheurs comme un facteur aggravant des troubles attentionnels et émotionnels. Une pratique méditative régulière offre sans doute une forme de protection aux enfants ; protection, là encore, à compléter par l'implication directe des parents, notamment sur l'exposition excessive aux écrans.

Last but not least, comme le meilleur moyen de motiver un enfant à méditer, que l'on soit parent ou enseignant, c'est de méditer à ses côtés, la pleine conscience est une activité rapprochant adultes et enfants, et faisant du bien aux uns comme aux autres. Il serait dommage de s'en priver... ●

1. André C., *Méditer jour après jour*, L'Iconoclaste, 2011.

2. Greenland S., *Un cœur tranquille et sage*, Les Arènes, 2014 ; Snel E., *Calme et attentif comme une grenouille. La méditation pour les enfants*, Les Arènes, 2012.

6

La mémoire

par Bérengère Guillery-Girard et Francis Eustache

Les différentes formes de mémoire sont indispensables pour la formation et la consolidation des apprentissages et cela à tous les âges de la vie. Il est important de connaître l'organisation d'ensemble de la mémoire et ses principales règles de fonctionnement. Le fonctionnement de la mémoire n'est pas le même aux différents âges de la vie. Ce point est bien sûr crucial lorsque l'on traite du neurodéveloppement ou de la neuroéducation et que l'on s'attache à comprendre le profil mnésique de l'enfant d'âge scolaire ou de l'adolescent. Ce chapitre prend en compte cette dimension essentielle. Il est structuré en quatre parties. La première fournit les grandes bases de la structure et du fonctionnement de la mémoire humaine. Elle introduit et définit de nombreux concepts, indispensables à la compréhension du sujet, puis procure une vision d'ensemble. Les deuxième et troisième parties traitent respectivement du développement cognitif de la mémoire et des liens avec la maturation cérébrale. Enfin, la quatrième partie est plus pratique et expose différentes stratégies de mémorisation, utiles à connaître dans un cadre éducatif.

I. La mémoire ou les mémoires ?

I Encodage, stockage, récupération

La mémoire peut être définie comme la fonction mentale qui

permet d'encoder, de stocker (ou consolider) et de rappeler des informations. Ces trois concepts sont fondamentaux, car ils renvoient aux étapes obligées de toute activité mnésique, qui permettent à des informations d'entrer dans la mémoire, d'y être maintenues et d'être rappelées. Pour autant, les mécanismes incriminés sont différents selon la situation concernée et les systèmes de mémoire sollicités.

Les mécanismes d'encodage sont très diversifiés. Nous pouvons par exemple lire une liste de mots, en nous intéressant au graphisme, sans même considérer leur signification, ce qui nous permettra difficilement de conserver la trace des mots en mémoire au-delà de quelques secondes. En revanche, si nous lisons ces mots en traitant leur sens et en les mettant en lien avec un de nos domaines d'intérêt, ces nouvelles informations feront alors l'objet d'un traitement dit « profond » (sémantique) et seront intégrées aux connaissances préexistantes et conservées de façon durable. De nombreux facteurs favorisent le traitement profond de l'information lors de la phase d'encodage et ont en conséquence un effet positif sur la formation d'une trace mnésique durable.

Le stockage peut être passif et, dans ce cas, la durée de la rétention est brève. Au contraire, la phase de stockage peut donner lieu à la mise en œuvre de mécanismes qui permettent une conservation durable de l'information. Le terme de consolidation, utilisé pour en rendre compte, fait référence à des processus variés. La consolidation à court terme renvoie aux processus qui permettent à une information d'être transférée d'un système de mémoire à court terme à un système de mémoire à long terme ; l'échelle de temps est alors de quelques secondes à quelques minutes. De nombreux travaux portent sur la consolidation à plus long terme. Le concept de consolidation est toutefois ambigu, car il ne doit pas être compris comme un maintien figé des informations telles une photographie que l'on archive. Celles-ci sont nécessairement modifiées et subissent différentes transformations, souvent à l'insu du sujet. Là

encore, différents facteurs favorisent ce travail de consolidation de la mémoire, la qualité du sommeil étant un élément clé dans le bon déroulement de ces processus.

« Le stockage peut être passif et, dans ce cas, la durée de la rétention est brève. Au contraire, la phase de stockage peut donner lieu à la mise en œuvre de mécanismes qui permettent une conservation durable de l'information. »

Les mécanismes de récupération en mémoire sont également très divers. L'information peut être récupérée de façon implicite (c'est-à-dire sans que l'individu ait conscience de faire appel à sa mémoire) ou, au contraire, de façon explicite. Dans ce deuxième cas, la récupération peut être suscitée par un indice qui génère, de façon irrépressible, l'information à rappeler. Dans d'autres situations, la récupération repose sur des mécanismes stratégiques et coûteux en effort. La personne doit alors trouver d'elle-même les indices qui conduisent à l'information recherchée. Le rappel de l'information peut être plus ou moins complet et satisfaisant : la personne peut avoir l'impression de revivre la situation initiale (comme si elle se retrouvait à nouveau dans la scène) ; elle peut au contraire n'éprouver qu'un simple sentiment de familiarité avec un lieu, un visage ou un objet sans identifier précisément l'origine de son souvenir.

Le bon fonctionnement de la mémoire ne tient pas uniquement à l'efficacité des mécanismes d'encodage, de stockage et de récupération des informations. Il est également dépendant des liens et parfois de la similarité entre les processus qui interviennent à ces différentes phases de l'activité mnésique, tout particulièrement entre l'encodage et la récupération. Ainsi, les indices contextuels présents lors de la récupération sont d'autant plus efficaces qu'ils

sont nombreux et ressemblent à ceux qui étaient présents dans la situation d'encodage.

« Le bon fonctionnement de la mémoire ne tient pas uniquement à l'efficacité des mécanismes d'encodage, de stockage et de récupération des informations. Il est également dépendant des liens et parfois de la similarité entre les processus qui interviennent à ces différentes phases de l'activité mnésique, tout particulièrement entre l'encodage et la récupération. »

Après avoir défini les étapes obligées de toute activité mnésique, il convient maintenant de s'attarder sur les différentes composantes de la mémoire. Certaines d'entre elles ont été décrites de façon dichotomique. Dans les pages qui suivent, nous définirons les termes les plus importants et terminerons par une vision d'ensemble de la mémoire qui sera utilisée dans la suite du chapitre.

2 Mémoire à court terme versus mémoire à long terme

Cette opposition fait référence à l'intervalle de rétention entre le moment où l'on crée le souvenir, c'est-à-dire l'encodage, et le moment où on le récupère. Il n'excède pas quelques secondes ou dizaines de secondes pour la mémoire à court terme, et il porte sur des durées plus longues pour la mémoire à long terme. De plus, la mémoire à court terme est caractérisée par une capacité réduite à quelques éléments, alors que les capacités de la mémoire à long terme sont considérables. Aujourd'hui, le concept de mémoire à court terme est surtout utilisé pour désigner le maintien passif d'informations en mémoire pendant une durée brève. Le concept de mémoire de travail lui est préféré pour mettre l'accent sur le caractère dynamique et stratégique des opérations qui ont lieu pour manipuler une information qui est présente à la conscience. La

mémoire de travail correspond donc à l'espace de travail conscient qui maintient, manipule et transforme des informations pendant des durées brèves. Certaines de ces informations sont transférées dans les systèmes de mémoire à long terme. Le concept de mémoire de travail est important, car ce système joue un rôle majeur lors de l'encodage et la récupération en mémoire. Différents processus complexes, nommés fonctions exécutives¹, sont particulièrement sollicités. Ces fonctions exécutives ont un rôle de coordination et de contrôle des activités complexes. La maturation lente des structures cérébrales sous-tendant la mémoire de travail et les fonctions exécutives, notamment le lobe frontal, doit être prise en compte dans les projets pédagogiques impliquant des enfants et des adolescents.

3 Mémoire déclarative versus mémoire procédurale

La mémoire déclarative correspond à ce qui peut être déclaré. Celle-ci n'est pas pour autant restreinte au matériel verbal, mais peut être évaluée en utilisant des dessins d'objets ou toutes sortes de matériels. Au contraire, la mémoire non déclarative (ou procédurale) porte sur un matériel difficilement verbalisable. La mémoire procédurale est un système d'action (elle est indissociable de l'action), ce qui la distingue des autres systèmes de mémoire qui sont considérés comme des systèmes de représentation. La mémoire procédurale est sollicitée quand je fais du vélo, du ski ou toute autre activité qui a été automatisée. L'apprentissage procédural, phase parfois très longue, conduit à l'automatisation d'une procédure et met en jeu des systèmes cognitifs variés.

4 Mémoire épisodique, mémoire sémantique, mémoire perceptive

La mémoire déclarative a donné lieu à son tour à un fractionnement très important sur le plan théorique et clinique : c'est l'opposition

entre la mémoire sémantique et la mémoire épisodique.

« La mémoire perceptive est souvent sollicitée, à notre insu, de même que la mémoire procédurale. Ces formes de mémoire sont d'une grande aide dans la vie quotidienne car nous réalisons ainsi des tâches sans effort cognitif : la mémoire procédurale me permet de conduire ma voiture et la mémoire perceptive m'aide à me repérer dans un trajet familial. »

La mémoire sémantique est la mémoire des connaissances générales sur le monde et sur soi : je sais que Rome est la capitale de l'Italie.

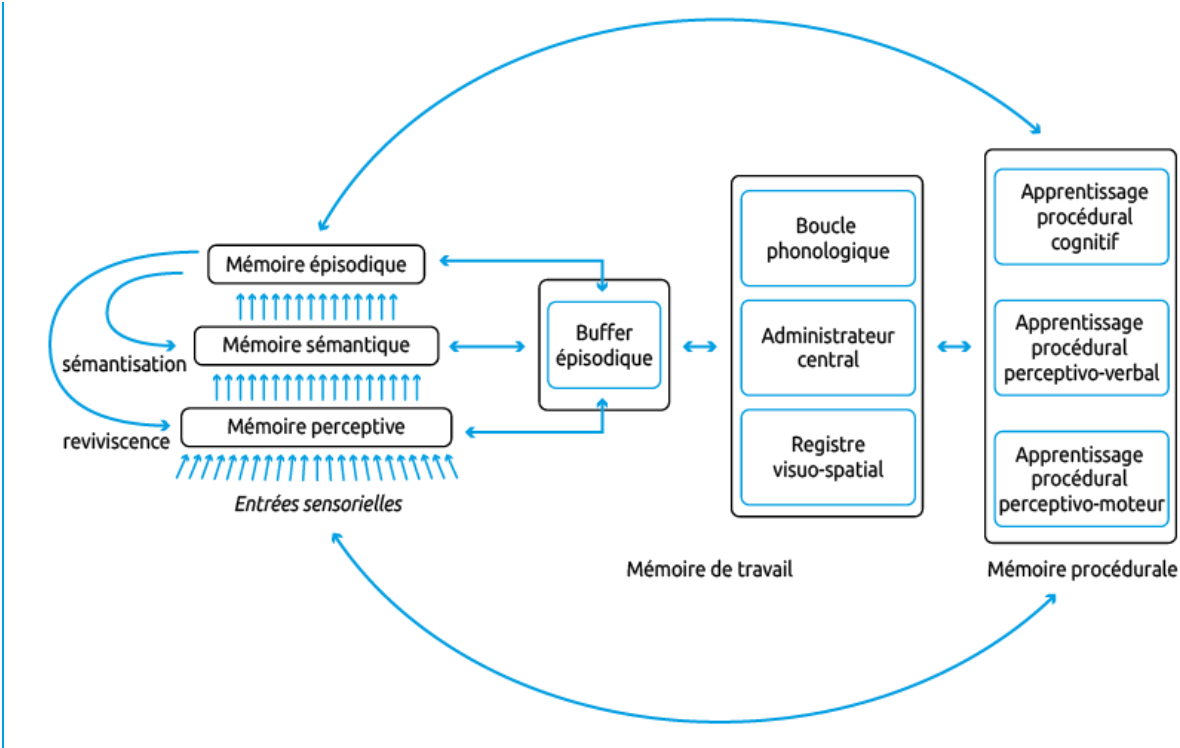
La mémoire épisodique permet de voyager mentalement dans le temps et donne l'impression de se réinstaller au cœur de l'évènement vécu, tout en sachant que celui-ci appartient au passé : je me souviens de ma soirée au restaurant de samedi dernier. J'ai l'impression de revivre certains éléments de la scène. Les mécanismes en jeu dans la mémoire épisodique sont également très proches de ceux qui nous permettent d'envisager des événements plausibles dans le futur : j'irai en Suisse au mois de novembre prochain. La mémoire épisodique ressemble donc à une boucle qui permet à la flèche du temps de revenir transitoirement vers le passé mais pour se tourner délibérément vers l'avenir.

La mémoire perceptive correspond au fait qu'être en contact avec une information perceptive facilite son traitement ultérieur, même si cette information est présentée sous une forme modifiée ou dégradée. La mémoire perceptive est souvent sollicitée, à notre insu, de même que la mémoire procédurale. Ces formes de mémoire sont d'une grande aide dans la vie quotidienne car nous réalisons ainsi des tâches sans effort cognitif : la mémoire procédurale me permet de conduire ma voiture et la mémoire perceptive m'aide à me repérer dans un trajet familial. Cette économie cognitive, qui repose sur des

traitements relativement automatiques de l'information, favorise la réalisation simultanée de tâches plus complexes : discuter avec mon passager, réfléchir à un problème difficile, mais aussi vagabonder dans mes pensées. Le modèle MNESIS² fournit une représentation d'ensemble de la mémoire humaine.

Figure 1. Le modèle MNESIS.

Ce modèle place la mémoire de travail telle qu'elle est décrite par Alan Baddeley au cœur du fonctionnement mnésique. Elle comprend des composantes spécifiques au traitement du matériel verbal (la boucle phonologique), visuo-spatial (registre visuo-spatial), multimodal (buffer épisodique), le tout coordonné par l'administrateur central. La mémoire de travail est impliquée dans l'apprentissage procédural et dans l'actualisation de la mémoire procédurale, à droite, qui stocke des procédures perceptivo-motrices comme faire du vélo, perceptivo-verbales comme la lecture et cognitives impliquant la résolution de problèmes. Enfin, cette mémoire de travail intervient dans le fonctionnement des systèmes de mémoire manipulant des représentations mentales : la mémoire perceptive, la mémoire sémantique (ou mémoire des connaissances) et la mémoire épisodique (ou mémoire de nos souvenirs). La formation de souvenirs nécessite un passage par les systèmes de niveau inférieur : mémoire perceptive permettant d'encoder les propriétés sensorielles et mémoire sémantique pour la signification. Les flèches sur la gauche du modèle indiquent que les souvenirs peuvent également se sémantiser au fil du temps, notamment *via* la répétition et devenir une connaissance. C'est le cas des apprentissages, alors que d'autres souvenirs resteront très vivaces, émaillés de nombreux détails perceptivo-sensoriels et rappelés avec un sentiment de reviviscence.



II. Développement de la mémoire chez l'enfant

Comprendre le développement de la mémoire est essentiel pour appréhender les apprentissages. Les différentes formes de mémoire interviennent dans de nombreuses activités scolaires, des plus académiques, comme l'acquisition de la lecture et la compréhension de textes, aux plus créatrices comme les arts visuels. Chaque enfant a une progression qui lui est propre et les fonctions cognitives qui apparaissent à un âge donné chez l'un n'apparaîtront pas forcément au même âge chez l'autre. Aussi, quand nous évoquons un âge de développement dans les paragraphes suivants, cela reste un âge moyen qui est valable pour la plupart des enfants, mais pas forcément pour tous. Cette diversité, parfois difficile à gérer dans le contexte scolaire, constitue une richesse et un argument pour

encourager le partage d'expériences. Dans les pages qui suivent sont présentées les différentes composantes de la mémoire en fonction des différentes étapes du développement de l'enfant. Ces mises en place ne sont pas pour autant strictement successives et de nombreuses interactions ont lieu entre ces différentes formes de mémoire.

1 Mémoire implicite

La mémoire à long terme a tout d'abord été abordée sous l'angle de la dichotomie implicite/explicite : ce que nous faisons automatiquement versus ce qui nécessite un effort conscient de récupération en mémoire. La mémoire implicite est essentielle à certains apprentissages, comme celui des régularités dans la lecture ou l'écriture. Le fait de rencontrer plusieurs fois une même information conduit l'enfant à retenir certaines règles et cela à son insu, comme le doublement de certaines consonnes telles que « m » ou « p » et non « h », ce doublement se fait en milieu de mot et non à la fin. Au-delà, la mémoire implicite intervient dans l'apprentissage de nouvelles connaissances. Elle est la première forme de mémoire à se mettre en place chez le bébé avec une certaine stabilité, contrairement à la mémoire explicite impliquant le rappel conscient d'informations, comme se rappeler la sortie en forêt faite la veille, dont le développement est plus tardif et prolongé. En effet, la mémoire implicite est beaucoup moins associée à la métamémoire, c'est-à-dire la connaissance de son propre fonctionnement mnésique, et au développement des stratégies mnésiques en comparaison de la mémoire explicite. Son fonctionnement est donc observable très tôt dans le développement. Les travaux sur le conditionnement opérant de l'équipe de Rovee-Collier ont démontré que, dès 2 mois, les nourrissons étaient capables de faire bouger un ruban attaché à leur pied pour faire remuer un mobile et de se souvenir de cette association ruban/mobile 24 heures après.

Il est possible d'aborder la mémoire implicite sous l'angle de l'amorçage : le fait que la présentation d'une information modifie le traitement ultérieur de cette même information ou d'une information très proche d'un point de vue perceptif ou sémantique et cela, à notre insu. Prenons l'exemple des courses en supermarché, nous détectons très rapidement les articles que nous avons l'habitude d'acheter sans nous rappeler consciemment l'apparence de ces articles. Ils facilitent notre quotidien et sont très impliqués dans les apprentissages, ils nous conduisent même à faire des erreurs ! En effet, ces phénomènes implicites nous permettent de former des représentations et des connaissances de façon automatique, par exposition et imprégnation, et qui vont en retour modifier notre comportement. Nous pouvons distinguer deux formes d'amorçage, l'une fondée davantage sur les propriétés perceptives (images, dessins, sons) et l'autre sur des propriétés sémantiques (signification des mots). L'exemple du plagiat littéraire involontaire illustre bien ce phénomène d'amorçage sémantique. Les travaux de recherche s'intéressant à l'amorçage perceptif observent peu de variations entre des enfants de 3 ans et des enfants plus âgés, soulignant le développement précoce de la mémoire implicite. Toutefois, il est important de moduler ces résultats en tenant compte de la complexité de l'information. En effet, il est possible d'observer une amélioration avec l'âge pour des informations complexes, que ce soit pour l'amorçage perceptif ou sémantique. Dans ce cas, le développement semble encore plus tardif et cette sensibilité à l'âge pourrait être liée à l'évolution du réseau de connaissances tenant compte de l'enrichissement du vocabulaire et des concepts.

« Plus les enfants grandissent, plus ils ont conscience du lien entre ce sentiment de familiarité et le fait d'avoir vu l'information au préalable. »

Bien que conceptualisées comme deux formes de mémoire distinctes, il existe de nombreuses interactions entre la mémoire implicite et la mémoire explicite. L'amorçage favorise la reconnaissance même consciente ou explicite, c'est-à-dire que le fait d'avoir traité une information, par exemple un mot ou un objet, facilite son identification ultérieure et cela de façon automatique. En effet, les informations qui sont reconnues comme ayant été mémorisées sont identifiées plus rapidement chez les grands enfants (c'est cette vitesse d'identification qui traduit l'amorçage). Ces interactions ne semblent s'observer qu'à partir de 5 ou 8 ans selon les études. Plus les enfants grandissent, plus ils ont conscience du lien entre ce sentiment de familiarité et le fait d'avoir vu l'information au préalable. Ils intégreront donc cette information dans leur jugement de reconnaissance. Nous pouvons donc voir en ces mécanismes les prémices de la métamémoire, c'est-à-dire la capacité que nous avons à réfléchir sur le fonctionnement de notre propre mémoire et adapter nos stratégies en conséquence.

2 Mémoire sémantique

La mémoire sémantique est centrale dans le fonctionnement cognitif, fondamentale pour la production et la compréhension du langage, la lecture et l'écriture, mais aussi la perception des objets, des visages, etc. Elle participe également à notre identité par le biais des connaissances autobiographiques comprenant à la fois des informations personnelles, telles que notre adresse ou les noms de personnes de notre entourage, et des événements généraux comme savoir que nous allons en vacances en Bretagne chaque année. Elle se met en place globalement plus tôt que la mémoire épisodique.

Deux périodes peuvent être distinguées dans le développement des connaissances sémantiques : les périodes préverbale et verbale. Les connaissances sont dépendantes des interactions avec l'environnement (fréquence d'exposition et contexte). Lors de la

période préverbale, le bébé détaille progressivement ses connaissances, de la catégorie aux exemplaires. Ainsi, il va par exemple identifier tous les fruits comme des « pommes » puis progressivement identifier les pommes en tant que telles et les différencier des oranges et autres fruits. Les informations perceptives seront essentielles puis, avec l'apparition du langage, s'ajouteront des concepts non spatiaux (couleurs par exemple). Ces connaissances sont utilisées pour faciliter l'acquisition et la rétention de nouvelles informations. Dans l'acquisition d'un stock lexico-sémantique, il est important de dissocier le nom (ou l'étiquette lexicale) du concept, à la fois dans le développement normal et dans différentes pathologies. Nous avons également tous fait l'expérience de constater que les jeunes enfants de plus de deux ans acquièrent de nouveaux mots très rapidement, après même une seule exposition. Cet effet rapporté sous le terme de « *fast mapping* » ou d'intégration rapide a été décrit dès les années 1978 par Carey et Bartlett. Ce phénomène comprend deux phases : la création d'un lien entre un mot nouveau et un référent connu, puis la rétention et l'enrichissement de la signification de ce nouveau concept permettant son utilisation dans différents contextes. Ainsi, si un adulte montre une corbeille de fruits dans laquelle se trouvent des pommes et des grenades et qu'il demande à l'enfant de lui donner une grenade, fruit exotique qu'il ne connaît pas, il déduira de lui-même que la grenade correspond au fruit rouge à côté des pommes. L'enfant intégrera dès cette phase quelques informations syntaxiques et sémantiques sur ce nouveau concept qu'est la grenade, au moins le fait que ce soit un fruit comestible, rond et rouge. Carey et Bartlett avaient réalisé en 1978 le même type d'expérience sur des couleurs avec des enfants de 3 ans et avaient montré que la moitié d'entre eux possédait encore cette nouvelle connaissance une semaine après l'exposition. Certains facteurs tels que mettre en évidence la nouvelle connaissance par rapport aux autres (saillance), répéter cette connaissance et demander aux

enfants de la produire à leur tour améliorent la rétention. À partir de deux ans environ, on assiste donc à une explosion du lexique pouvant atteindre l'acquisition de 10 mots par jour. Les enfants acquièrent le sens des mots au travers de différents supports oraux et écrits en comprenant leur relation avec le contexte d'utilisation. Les discussions et la lecture ont ainsi un impact direct sur l'acquisition du vocabulaire.

« Le phénomène de *fast mapping* comprend deux phases : la création d'un lien entre un mot nouveau et un référent connu, puis la rétention et l'enrichissement de la signification de ce nouveau concept permettant son utilisation dans différents contextes. »

Le développement du réseau de connaissances a des répercussions sur d'autres activités cognitives : les capacités d'inférence qui peuvent conduire dans certains cas à la création de faux souvenirs. Par exemple, penser que comme nous avons vu des oranges et des pommes dans une corbeille, il devait y avoir d'autres fruits de saison comme des clémentines. Ce phénomène peut être induit de façon expérimentale : si nous apprenons une liste de mots appartenant à la catégorie « bonbon » tels que « guimauve », « sucette », etc., mélangés à d'autres mots et qu'au moment de la phase de reconnaissance, nous représentons ces mots ainsi que « bonbon » qui n'a pas été proposé initialement, nous aurons tendance à reconnaître ce mot comme déjà vu, et donc faire une « fausse reconnaissance ». Ce paradigme a été adapté à l'enfant et les données montrent que les jeunes enfants font moins de fausses reconnaissances que les adultes car leur réseau sémantique ou réseau de connaissances n'est pas suffisamment détaillé et organisé pour activer automatiquement des concepts proches. En revanche, ces résultats peuvent s'inverser si nous utilisons comme support une

vidéo sur des événements de la vie quotidienne : les enfants font alors plus de fausses reconnaissances que les adultes.

« Les jeunes enfants font moins de fausses reconnaissances que les adultes car leur réseau sémantique ou réseau de connaissances n'est pas suffisamment détaillé et organisé pour activer automatiquement des concepts proches. »

Les informations présentées pourraient à elles seules activer de façon inconsciente et rapide tout le thème qui est évoqué par la vidéo, ce qui pousserait les enfants à reconnaître des détails qui ne sont pas présentés en réalité. Prenons l'exemple d'un film sur une fête d'anniversaire, quelques images pourraient activer en mémoire de nombreuses représentations sur les fêtes d'anniversaire et encourager l'enfant à reconnaître certains détails comme faisant partie de la vidéo, tels que la présence de bonbons, alors qu'ils n'ont pas été présentés.

3 De la mémoire événementielle à la mémoire épisodique

Les souvenirs épisodiques sont des souvenirs d'événements et d'expériences autobiographiques spécifiques en lien avec soi et au sujet desquels nous pouvons avoir des émotions, des pensées, des réactions et des réflexions. Les souvenirs autobiographiques renvoient à des événements survenus une seule fois (et non récurrents), que l'on peut exprimer verbalement, et qui persistent dans le temps. La mémoire autobiographique se définit par la capacité à construire une suite de souvenirs d'événements courts liés temporellement, tels que ceux que l'on retrouve dans une histoire de vie ou une autobiographie. Cela implique que le rappel en mémoire autobiographique repose sur une conscience autobiographique définie comme la conscience de soi dans le

présent qui est différente, mais liée temporellement, du soi dans le passé qui a vécu l'événement. Ce n'est vraiment qu'à l'adolescence que l'on observe des récits spontanés qui marquent cette différence.

L'amnésie infantile

Une fois adulte, il est quasiment impossible de se souvenir d'événements survenus avant l'âge de 3 ans. Faites l'expérience de recherche dans votre mémoire, le premier souvenir que vous avez en évitant les événements qui sont souvent évoqués en famille ou ailleurs ? Quel âge aviez-vous au moment de cet événement ? Les souvenirs d'événements survenus entre 3 et 7 ans sont rares. Le plus souvent, les souvenirs qui seront rappelés à ce moment ont une connotation émotionnelle particulière. Ce phénomène a été décrit par Freud sous le terme d'« amnésie infantile » (Freud, 1905/1935). Depuis cette date, plusieurs hypothèses explicatives ont été formulées :

1. Les expériences des enfants seraient non verbalisables et ne peuvent être accessibles à la conscience en tant que représentation mentale. Il est vrai que le langage permet de reformuler et de réactiver les souvenirs autobiographiques dans les échanges avec les parents le plus souvent ; il permet de structurer le souvenir qui sera plus accessible une fois adulte. En ce sens, le langage est un élément essentiel du développement de la mémoire autobiographique. Lorsque des parents échangent le soir avec leurs enfants sur la journée d'école, le plus souvent, ils proposent d'emblée une structure temporelle en évoquant les activités du matin puis le repas et enfin, l'après-midi. Ces échanges permettent d'organiser les souvenirs selon une certaine chronologie avec un début de l'action puis une fin et d'y associer des détails ou des impressions. Ces mêmes détails pourront être repris dans d'autres échanges pour évoquer d'autres souvenirs et créer une certaine continuité ;

2. Le contexte perceptif des premières années de vie est très différent de celui de l'adulte et, en conséquence, ne peut être rappelé une fois adulte. Faites l'expérience du terrain de football ! Nous avons tous fréquenté un lieu quand nous étions enfant, comme un terrain de football, que nous avons redécouvert une fois adulte, après plusieurs années. Nous constatons que les dimensions que nous avons en mémoire sont bien

différentes de celles perçues aujourd'hui que nous sommes adultes et c'est ainsi que notre terrain qui semblait faire plusieurs hectares dans notre souvenir d'enfant se transforme en terrain de moins de 5 000 m²...

3. Le *self* (ou l'identité) serait encore immature, et un développement suffisant du *self* est nécessaire, car il procure un réseau personnel de référence pour organiser les souvenirs autobiographiques. En effet, le petit enfant ne se reconnaît dans un miroir que vers l'âge de 18 mois, il ne pourra se décrire physiquement que vers 4 ans environ et un peu plus tard pour les traits de caractère. Il en est de même avec la théorie de l'esprit qui renvoie à la capacité à attribuer et comprendre ses propres états mentaux et ceux des autres. (*theory of mind*, ou ToM) : un développement suffisant de la ToM est nécessaire pour rappeler un souvenir comme personnellement vécu et non simplement n'en conserver qu'un sentiment de familiarité ;

4. La maturation cérébrale des régions dévolues à la mémoire consciente, et notamment les régions frontales, n'est pas suffisante pour maintenir les traces des expériences ; elle ne permettrait pas d'encoder et de restituer le souvenir et sa source (c'est-à-dire où et quand l'événement s'est déroulé). Ces régions préfrontales suivent en effet une lente maturation jusqu'à la fin de l'adolescence ;

5. Les souvenirs d'enfance seraient plus facilement oubliés : l'oubli est d'autant plus important que l'enfant est jeune. Cette observation est en phase avec la découverte récente d'un phénomène biologique, la neurogénèse, c'est à dire la naissance permanente de nouveaux neurones dans le cerveau. Dans la plupart des régions du cerveau, la neurogénèse est en grande partie terminée à la naissance sauf dans deux régions dont l'hippocampe, zone carrefour de la mémoire, dans lesquelles la production atteint son maximum durant les premiers mois de vie puis diminue jusqu'à l'âge adulte. Cette neurogénèse excessive décrite en 2012 par Sheena Josselyn et Paul Frankland pourrait modifier l'architecture des réseaux neuronaux et perturber l'intégrité des synapses formées précédemment, empêchant ainsi la stabilisation des traces

mnésiques. Donc au fur et à mesure de la prolifération des nouveaux neurones, les souvenirs des événements antérieurs seraient affaiblis voire effacés et il faudrait attendre que le niveau de neurogénèse diminue pour que des souvenirs stables puissent se former. Une autre hypothèse repose sur l'activité de certains neurotransmetteurs comme l'acide gamma-aminobutyrique (GABA) qui a pour rôle de diminuer l'activité des neurones. En effet, un excès de production de GABA durant la petite enfance inhiberait le rappel des souvenirs durant cette période de la vie. Comme il faut rappeler un souvenir pour qu'il soit consolidé, cette inhibition empêcherait la consolidation et donc l'ancrage d'un souvenir à long terme.

La mémoire sémantique est essentielle au développement de la mémoire épisodique sur laquelle elle s'appuie. La mémorisation est meilleure quand les informations reposent sur des connaissances déjà acquises et que l'information est porteuse de sens pour l'enfant. Pour créer un souvenir épisodique, il est indispensable d'associer tous les aspects du souvenir : les perceptions, les sensations, les pensées, la localisation spatiale et temporelle... l'enfant doit être capable de retenir le contenu de l'événement (« j'ai joué au loup »), mais aussi le contexte dans lequel celui-ci s'est produit (« dans la cour de l'école, avec Charlotte, à la récréation de midi, hier, juste avant d'aller à la cantine »). La mémoire épisodique fait donc intervenir de nombreux processus cognitifs qui nécessitent d'être suffisamment matures pour fonctionner. En conséquence, elle est le système mnésique qui se met en place le plus tardivement chez l'enfant. Les jeunes enfants ne peuvent pas faire le lien avec une information temporelle spécifique, nécessitant un voyage mental dans le temps, et leur capacité de revivre l'épisode reste encore largement immature. Il faut attendre environ 5 ans pour parler véritablement de souvenir épisodique.

« Le petit enfant ne se reconnaît dans un miroir que vers l'âge de 18 mois, il ne pourra se décrire physiquement que vers 4 ans environ et un peu plus tard pour les traits de caractère. »

Il est en revanche possible d'observer avant 5 ans des capacités de rappel pour certains contenus d'événements personnels, d'où le terme de « mémoire événementielle ». Néanmoins, ce type de mémoire n'est pas identique à la mémoire épisodique, en cela qu'elle n'implique pas la « conscience auto-noétique », c'est-à-dire la conscience que nous avons de nous-même au travers du temps, qui nous permet de conserver un sentiment de continuité. La reviviscence d'un événement par l'enfant suppose l'émergence et l'efficacité de processus mnésiques spécifiques (par exemple, la mémorisation d'informations factuelles, spatiales et temporelles) en interaction avec d'autres capacités cognitives (le langage, la métamémoire, la théorie de l'esprit). Ainsi, ce n'est que vers 5 ans qu'émerge véritablement la mémoire épisodique avec un développement rapide jusqu'à 10 ans, puis plus modéré jusqu'à l'âge adulte.

De façon générale, les capacités de reconnaissance d'une information déjà vue (« je t'ai montré le chien ou le chat ? »), moins coûteuses d'un point de vue exécutif, sont mises en place chez l'enfant plus tôt que les capacités de rappel en l'absence d'indice de récupération (« qu'est-ce que je t'ai montré ? »). Le rappel auto-initié d'un souvenir épisodique pourra s'effectuer lorsque les connaissances sémantiques seront suffisantes et que l'enfant aura atteint un niveau de développement cognitif lui permettant d'aller rechercher en mémoire son souvenir.

« De façon générale, les capacités de reconnaissance d'une information déjà vue (« je t'ai montré le chien ou

le chat ? »), moins couteuses d'un point de vue exécutif, sont mises en place chez l'enfant plus tôt que les capacités de rappel en l'absence d'indice de récupération (« qu'est-ce que je t'ai montré ? »). »

De la même façon, l'évolution des performances avec l'âge est différente en fonction du type de contenu à mémoriser. Dans notre laboratoire, nous avons mené une étude auprès d'enfants âgés de 6 à 10 ans et d'adolescents de 11 à 23 ans et les résultats obtenus montrent que la composante temporelle est celle qui évolue la plus tardivement. Il est donc essentiel de tenir compte du type d'information à mémoriser chez l'enfant d'âge scolaire.

4 Les projections dans le futur

La plupart des travaux scientifiques concernent la mémoire du passé, mais il est intéressant de considérer les capacités à se projeter dans le futur ou la « pensée future » qui nous permet d'anticiper le déroulement de certains événements et de prendre des décisions. La capacité à penser à une action future marque une évolution entre 3 et 5 ans. Les jeunes enfants peuvent utiliser leurs connaissances générales pour imaginer un événement futur, mais pas encore des détails épisodiques. Dès 3 ans, ils sont donc capables d'imaginer un événement futur simple, mais leur capacité est influencée par leurs compétences en mémoire de travail et de raisonnement par inférence. Avec le développement de ces dernières compétences, ils peuvent imaginer des actions de plus en plus complexes impliquant plusieurs objectifs. Son évolution suit la même trajectoire développementale que la mémoire des souvenirs et s'appuie sur la capacité à construire une représentation mentale de scènes reposant notamment sur la mémoire associative, la mémoire spatiale et les fonctions exécutives.

La mémoire prospective

La mémoire prospective est une façon d'appréhender la projection dans le futur. Elle se distingue de la mémoire rétrospective par le fait qu'elle concerne la capacité à se rappeler de réaliser une ou plusieurs actions dans le futur, malgré l'interférence que produiront les activités qui auront lieu avant la réalisation de cette action (par exemple, aller chercher du pain après sa journée de travail ou ne pas oublier de donner un message aux parents de la part de l'enseignant en rentrant de l'école). La mémoire prospective est indispensable au quotidien, y compris dans un contexte d'apprentissage et facilite la préparation d'une action. Le développement de la mémoire prospective dépendrait de la capacité à se souvenir du contenu de l'action à réaliser (« ce que je dois faire ») qui évolue avec l'âge mais aussi de métamémoire. La mémoire de travail, les capacités de planification, c'est-à-dire la mise en place des stratégies adaptées pour atteindre un objectif donné, la flexibilité mentale et le contrôle cognitif interviennent à différentes étapes du fonctionnement de la mémoire prospective. Le contrôle cognitif permettrait par exemple d'interrompre (inhiber) l'activité de routine pour réaliser l'action prévue, comme s'arrêter de faire du vélo quand nous passons devant la boulangerie pour acheter du pain. Aussi, il serait nécessaire que les enfants aient un niveau de développement exécutif suffisant pour qu'émerge la mémoire prospective, c'est-à-dire à partir de 3 ans.

Plusieurs facteurs ont un impact sur le fonctionnement de la mémoire prospective : l'intérêt ou la motivation à réaliser l'intention, le nombre d'intentions à mémoriser, la complexité de ces intentions et l'emphasis portée sur ces intentions. La motivation permet de réduire le coût cognitif en mémoire de travail et de faciliter le fonctionnement précoce de la mémoire prospective. Ainsi, des enfants de 2 à 4 ans sont capables de rappeler une action si elle est motivante, comme rappeler à leur mère de leur acheter une glace à la fin de leur activité. L'importance du délai ainsi que le type d'activité réalisée lors de ce délai influent également sur

les performances. Enfin, le type d'indice utilisé pour récupérer l'intention est également important. Un indice extérieur, comme le passage devant la boulangerie, est généralement plus efficace chez l'enfant qu'un indice temporel comme aller chercher du pain dans deux heures. Plus cet indice sera visible, moins l'enfant aura à mobiliser des capacités attentionnelles pour s'engager dans l'action à réaliser.

5 La mémoire de travail

L'intérêt pour le développement de la mémoire de travail et des fonctions exécutives est grandissant du fait de son rôle central dans de nombreuses activités et dans les apprentissages. Dès que l'enfant doit comprendre une consigne et la maintenir en mémoire le temps de l'exercice, passer d'une consigne à une autre, réaliser plusieurs actions en même temps comme écouter ce que l'enseignant dit et écrire, il mobilise la mémoire de travail et les fonctions exécutives. En fait, toutes les activités d'apprentissage mobilisent ces compétences ! La mémoire de travail et les fonctions exécutives poursuivent leur développement jusque tard au cours de l'adolescence, voire même jusqu'à l'âge adulte, notamment en raison du fait qu'elles reposent sur la maturation de connexions fronto-pariétales et fronto-striatales qui se poursuit tardivement.

Les régions frontales sont essentielles pour le fonctionnement de la mémoire de travail et leur engagement dans les tâches mobilisant ce système est observé chez le jeune enfant, mais leur implication varie avec l'âge. Le développement de la mémoire de travail s'accompagne d'une augmentation du recrutement des régions frontales, qui sont plus efficaces pour traiter les informations complexes. Cette implication grandissante des régions frontales est associée à un désengagement des régions postérieures du cerveau qui ne sont pas essentielles pour réaliser la tâche. Pour de nombreux processus cognitifs, il est possible d'observer, en imagerie cérébrale, une diminution du nombre de régions activées et de l'étendue de

ces activations au profit d'une activation plus ciblée, entre des régions qui peuvent être éloignées, en quelque sorte, s'activer moins mais mieux !

La question de la différenciation, ou savoir à quel âge les processus cognitifs se distinguent les uns des autres, est au premier plan de plusieurs travaux : à quel âge peut-on différencier les processus qui composent la mémoire de travail et les fonctions exécutives ? Les modèles unitaires sont privilégiés jusqu'à environ cinq ans, puis ces fonctions deviennent très progressivement indépendantes³. Aussi, il est possible de dissocier les différentes composantes de la mémoire de travail vers 6 ans. Toutefois, ces composantes vont évoluer tout au long de l'enfance et l'adolescence et contribuent au développement tardif de certaines compétences cognitives comme la métacognition décrite ci-dessous.

Gare au tout numérique dans les apprentissages et dans la communication au quotidien

Les différents supports numériques fournissent des moyens quasi illimités pour accompagner et favoriser les apprentissages. Le recours à ces nouvelles technologies modifie la façon d'apprendre et les interactions entre l'enseignant et l'élève. Les possibilités nouvelles fournies par le numérique sont extrêmement positives mais leur utilisation inconsiderée pose un certain nombre problèmes, le plus fondamental étant la remise en cause de l'équilibre entre mémoire interne et mémoire externe. La mémoire interne doit être comprise comme la mémoire de l'individu (ou naturelle, ce terme ayant été utilisé dans le passé ; il est bien sûr critiquable) en opposition à la mémoire externe, devenue aujourd'hui une mémoire majoritairement artificielle. Nos mémoires se sont massivement externalisées, tout particulièrement *via* les outils dont l'utilisation fut d'abord purement technique, mais ces outils ont envahi des fonctions qui ne leur étaient pas dédiées initialement, qui semblaient être le terrain irréductible de l'humain : l'éducation, le soin, la création artistique...

Le concept de disruption renvoie à cette accélération de la place des outils techniques – à leur puissance et à leur omniprésence –, notamment des outils numériques, évolution logarithmique que ne peuvent plus absorber les psychologies individuelles et les organisations sociales. Cette situation créait l'impression d'un temps qui s'accélère, d'une difficulté à le maîtriser, à hiérarchiser les priorités, un sentiment d'être sans cesse dans l'urgence sans traiter les informations en profondeur et sans pouvoir ainsi les synthétiser, les assimiler. On peut quantifier le fait que nous dormons moins qu'il y a dix ou vingt ans, mais il est beaucoup plus difficile de mesurer cette impression d'accélération du temps et les comportements qui en découlent.

Lorsque nous sommes au repos, sans activité particulière, nous mobilisons un réseau cérébral nommé : « réseau du mode par défaut ».

Ce réseau est un substrat cérébral essentiel de notre mémoire et notamment à notre capacité à nous projeter dans le futur. C'est l'une de ses fonctions, comme il semble être impliqué dans la synthèse mentale, la consolidation en mémoire et l'anticipation sur lesquelles reposeront nos décisions. Ce réseau est de plus en plus malmené, notamment chez les enfants et les adolescents, du fait de l'omniprésence des nouvelles technologies de l'information et de la communication et des écrans qui en sont le principal support. L'enfant se retrouve ainsi dans une situation « stimulus-réponse » permanente et adopte ce moyen de communication comme une voie d'accès privilégiée à la connaissance. La notion de « prescription » prend ici tout son sens, à savoir le fait que cette utilisation doit être encadrée et faire l'objet d'une attention particulière.

Nous avons de plus en plus conscience que le monde connecté et numérisé nous manipule et nous uniformise. Certains dispositifs sont construits à cet escient et ce mouvement va encore s'accélérer. Le numérique non contrôlé envahit les secteurs où l'humanité aurait toujours dû prévaloir. L'éducation et la culture des enfants, qui n'ont pas connu l'avant, demeurent les fondamentaux. Une réflexion et une action (une prescription) éthiques devront présider aux choix stratégiques. Cette réflexion ne devrait pas non plus être restreinte aux techniciens et experts du domaine, aux spécialistes généralement parties prenantes, mais faire l'objet d'un vrai débat visant l'intérêt général, où le citoyen (et l'enseignant !) devrait toujours avoir la première place⁴.

6 La métacognition et la métamémoire

Au-delà, les fonctions exécutives affectent le développement de la métamémoire, c'est-à-dire les connaissances que nous avons sur le contenu et le fonctionnement de notre mémoire. La métamémoire facilite l'utilisation de stratégies et a un impact direct sur les performances de mémorisation. Les capacités de métamémoire sont

peu développées jusqu'à une dizaine d'années, âge qui marque une amélioration significative. Auparavant, les enfants possèdent déjà des connaissances sur leur fonctionnement cognitif, mais ont souvent des difficultés à organiser le contenu de leur mémoire, à évaluer les ressources nécessaires pour réaliser une tâche, à choisir les stratégies appropriées pour une tâche donnée et à gérer leurs apprentissages, ce qui peut parfois entraîner un excès de confiance en leur réponse et l'illusion de savoir. Aussi, il sera nécessaire d'accompagner l'enfant dans l'explicitation de ses stratégies, sous forme de verbalisations, de schémas...

« Même si nous pouvons identifier des stratégies de mémorisation plus efficaces que d'autres de manière générale à un âge donné, il est essentiel de tenir compte des spécificités de l'enfant, de ses intérêts et des routines qu'il a pu mettre en place. »

En effet, le jeune enfant a tendance à utiliser des stratégies de manière implicite sans attribuer l'amélioration de ses performances à leur utilisation. Par exemple, nous proposons à des enfants de retenir deux listes de 10 mots, l'une composée de noms de fruits, de meubles et d'animaux alors que l'autre comprend 10 mots de catégories différentes. Le jeune enfant retiendra plus de mots de la première liste car il aura implicitement regroupé les fruits, les meubles et les animaux même s'il n'attribue spontanément pas ses bonnes performances à ce regroupement. Progressivement, le développement de la métamémoire lui permettra d'analyser explicitement l'exercice afin d'engager les traitements les plus appropriés. Le développement de la métamémoire se poursuit jusqu'à la fin de l'adolescence : les connaissances s'acquièrent progressivement par l'expérience, les interactions sociales et le feedback apporté par l'entourage et les enseignants. Même si nous

pouvons identifier des stratégies de mémorisation plus efficaces que d'autres de manière générale à un âge donné, il est essentiel de tenir compte des spécificités de l'enfant, de ses intérêts et des routines qu'il a pu mettre en place. Aussi, certaines conditions seront les plus adaptées : lecture silencieuse, lecture à haute voix, copie, schéma, etc.

Les échanges de procédures avec les autres enfants sont intéressants et permettent à l'enseignant de reprendre différentes techniques adaptées à la situation d'apprentissage en cours. Ces dialogues procurent à l'enfant des connaissances sur son propre fonctionnement mental, en tenant compte du contexte donné. Ces expériences lui permettent progressivement de devenir autonome et efficace dans ses apprentissages. Il faut mentionner également la maturation cérébrale, tant structurale que fonctionnelle, qui sous-tend l'évolution de ces compétences.

7 Mémoire et cerveau

Les techniques non invasives d'imagerie cérébrale, c'est-à-dire sans injection de traceurs radioactifs, ont permis de recueillir un ensemble de connaissances nouvelles sur le fonctionnement cérébral. Désormais, l'imagerie par résonance magnétique (IRM) permet des mesures de l'épaisseur corticale, du volume et de la densité de la substance blanche (SB) et de la substance grise (SG). La SB, composée des faisceaux de fibres axonales gainées de myéline, établit les connexions entre les différentes régions cérébrales (cortico-corticales et cortico-sous-corticales). Elle permet donc à ces régions de communiquer entre elles. L'imagerie par tenseur de diffusion (DTI, pour *Diffusion Tensor Imaging*) permet en particulier d'étudier la macro- et la microstructure de la SB, ce qui est appelé la connectivité structurale. Lors du développement typique de la substance blanche, la densité des gaines de myéline s'accroît, la quantité d'eau cérébrale diminue, et les fibres se réorganisent. Ces

réseaux structuraux composés de fibres de SB connectent différentes régions pouvant être proches, mais aussi éloignées, et sont le support de l'intégration fonctionnelle à l'origine de tout traitement cognitif.

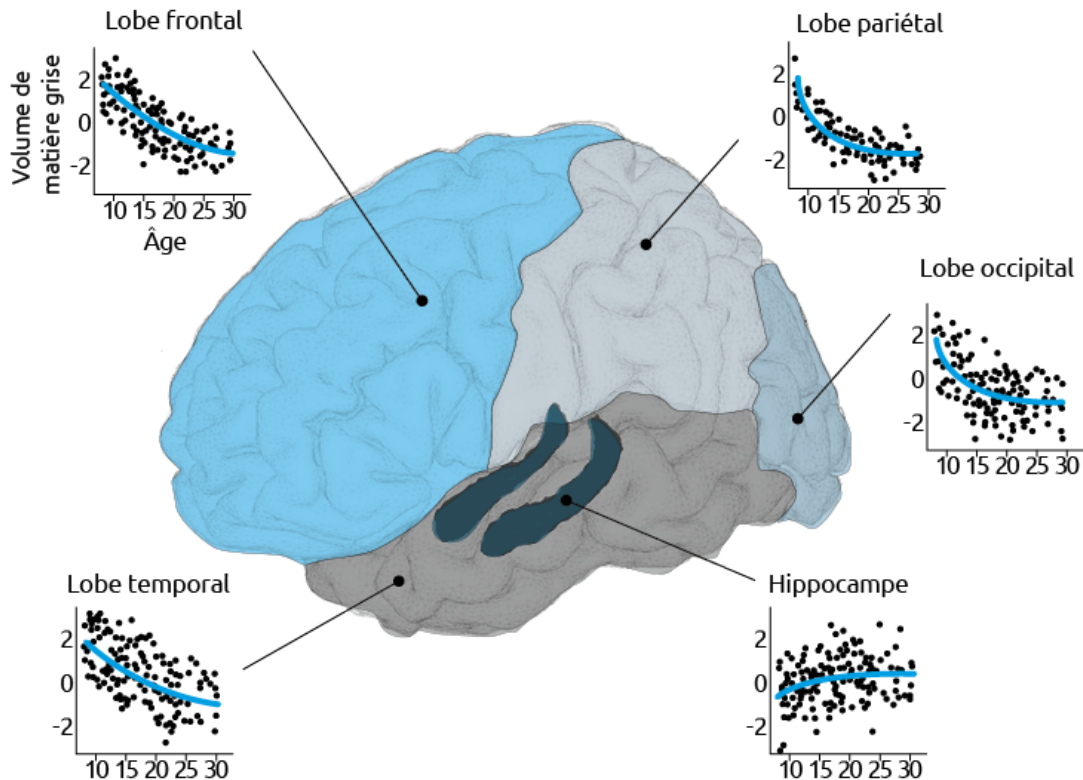
« Plus l'enfant grandit, et plus il sera capable de solliciter les régions cérébrales les plus appropriées, même si elles sont éloignées, pour réaliser un traitement cognitif particulier. »

La SG est formée principalement des corps cellulaires et de l'arbre dendritique des neurones, ainsi que de certaines cellules gliales ; elle est le support des opérations cognitives et mnésiques. Il existe des changements développementaux importants de volume, de densité et d'épaisseur corticale entre l'enfant, l'adolescent et l'adulte. Les études longitudinales montrent que le volume cortical de SG fait plus que doubler lors de la première année (108 %). Ces modifications de substance grise au cours du développement reflèteraient, en partie, la prolifération synaptique première suivie de l'élagage synaptique. La prolifération synaptique correspond à la formation importante de connexions synaptiques (synaptogenèse) qui a commencé avant la naissance et qui continue durant les premières années de vie. L'augmentation de la surface corticale est plus marquée dans les régions temporales supérieures, pariétales, post-centrales et occipitales, en lien avec le développement des fonctions sensorielles qui est important à cet âge. Lors de la seconde année, l'augmentation est plus modeste et concerne préférentiellement les régions impliquées dans la planification motrice, le traitement visuo-spatial et attentionnel (régions frontales supérieures, temporales inférieures et pariétales). Par ailleurs, le volume régional de SG tend à augmenter en phase prépubertaire dans les régions frontales et temporales pour se réduire après la puberté de façon marquée. Cette diminution du volume est due

principalement à une diminution massive du nombre de synapses (élagage synaptique) et des ramifications axonales, ainsi qu'à une myélinisation axonale intra-corticale croissante. Ce phénomène de régulation neurologique permet la sélection des synapses en grande partie sur la base de leur fonctionnement : les connexions neuronales sous-utilisées sont supprimées alors que les connexions neuronales actives sont renforcées (*cf.* Chapitre 1 de Jean-Pierre Changeux). Cet élagage, observé à un niveau neuronal, a un impact sur l'organisation hiérarchique et la connectivité interrégionale au sein des réseaux corticaux et sous-corticaux. Au cours du développement, les connexions courtes (proximales) tendent à disparaître alors que les connexions longues (distales) sont renforcées, permettant de mobiliser de façon synchrone des régions cérébrales plus éloignées à l'âge adulte. Ce phénomène permet de solliciter un réseau cérébral plus vaste formé de régions spécialisées pour un traitement cognitif optimal. Plus l'enfant grandit, et plus il sera capable de solliciter les régions cérébrales les plus appropriées, même si elles sont éloignées, pour réaliser un traitement cognitif particulier.

Figure 2. Maturation de la substance grise de 8 à 30 ans⁵.

Diminution du volume cortical régional de matière grise, signe de maturation par variation-sélection neuronales en fonction de l'âge (à noter que l'Hippocampe est déjà mature à ces âges).



Les études de neuro-imagerie soulignent l'existence d'une vaste réorganisation des circuits neuronaux pendant l'enfance et l'adolescence, en particulier dans les régions du cerveau impliquées dans le fonctionnement de la mémoire. Cette réorganisation est à la fois locale (substance grise) et étendue aux fibres assurant la connexion avec d'autres structures cérébrales (substance blanche). Le développement cognitif repose sur l'amélioration de la collaboration fonctionnelle entre ces réseaux neuronaux spécialisés. Parmi les régions qui forment ces réseaux, deux jouent un rôle particulièrement important dans le fonctionnement de la mémoire : l'hippocampe et le cortex frontal. L'hippocampe mature rapidement pendant les deux premières années de vie, alors que le cortex

préfrontal mature progressivement tout au long de l'enfance et de l'adolescence. En parallèle, les fonctions mnésiques dépendantes des régions frontales se développeraient plus lentement que les fonctions hippocampo-dépendantes. Ainsi les trajectoires développementales des différentes composantes de la mémoire seraient donc dissociables : (a) la composante stratégique de la mémoire, dépendante des régions frontales, suivrait une maturation prolongée, alors que (b) la composante associative impliquant les hippocampes serait mature plus tôt. Par ailleurs, la maturation lente de la connectivité entre les régions sous-tendant la mémoire conditionne son développement. Par exemple, le faisceau unciné reliant l'hippocampe antérieur et le cortex préfrontal achève sa maturation après 25 ans !

Figure 3. Mémoire et cerveau.

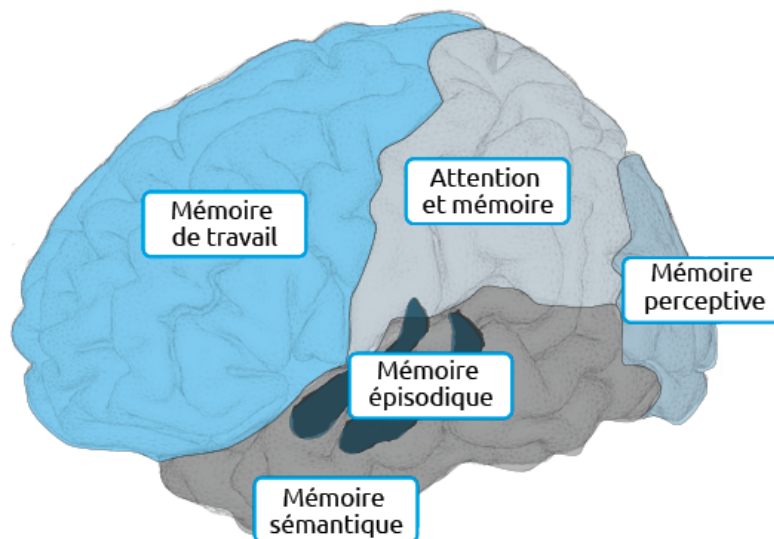
La mémoire de travail mobilise un vaste réseau antéro-postérieur impliquant notamment les régions frontales et pariétales.

La mémoire perceptive recrute des réseaux neuronaux dans différentes régions corticales, à proximité des aires sensorielles (les lobes occipitaux pour la vision dans cet exemple).

La mémoire sémantique implique des réseaux neuronaux disséminés dans des régions très étendues et plus spécifiquement dans les lobes temporaux, notamment dans leurs parties les plus antérieures.

La mémoire épisodique fait appel à des réseaux neuronaux impliquant l'hippocampe et plus largement la face interne des lobes temporaux.

Enfin, **la mémoire procédurale**, non représentée dans ce schéma, recrute des réseaux neuronaux sous-corticaux (noyaux gris centraux) et le cervelet.



III. Soutien aux apprentissages

L'apprentissage doit être appréhendé en tenant compte du

développement cognitif de l'enfant, de la variabilité interindividuelle, mais aussi des dimensions psychosociales et psychoaffectives. L'enfant peut être dans un état psychologique particulier, aux prises avec des préoccupations affectives si envahissantes qu'elles le rendent peu disponible pour les apprentissages en ayant un impact direct sur ses capacités à mobiliser son attention. De façon générale, et plus encore dans ce contexte, les conditions de préparation aux apprentissages sont importantes : les rituels qui peuvent améliorer la réceptivité jusqu'à l'anticipation ou la projection qui le conduisent à se préparer à réaliser une activité donnée. De nombreuses méthodes visent à améliorer les trois étapes de la mémorisation : l'encodage, la consolidation et/ou la récupération des informations en mémoire⁶. Les neurosciences cognitives apportent un regard nouveau sur la manière dont on peut soutenir ces différentes étapes comme en témoignent les travaux de Stanislas Dehaene qui aime à rappeler les quatre piliers de l'apprentissage, à savoir l'attention⁷, l'engagement actif, le retour d'information et consolidation.

1 Encodage et récupération

Les étapes d'encodage et de récupération sont intimement liées. L'efficacité de la récupération d'informations en mémoire dépend de l'adéquation entre le contexte d'encodage et celui de récupération. La récupération est facilitée lorsque le contexte ou les indices fournis rappellent l'étape d'encodage⁸. Par ailleurs, tout épisode de restitution constitue en soi un nouvel épisode d'encodage lors duquel l'information est labile et susceptible d'être modifiée. Ce phénomène est à l'origine des théories de la « reconsolidation ». Toute réactivation d'un souvenir permet sa consolidation et en même temps sa réorganisation, l'intégration de nouveaux éléments et/ou l'élimination d'autres.

Les stratégies de mémorisation ont toutes comme point commun

d'améliorer la profondeur de l'encodage : la création d'une représentation mentale qui permet notamment un double codage, visuel et verbal par exemple (écouter un texte et se créer une image mentale) ; la réalisation sensori-motrice (poésie théâtralisée) ; l'émotion ; la création de liens avec des représentations déjà en mémoire (sémantiques, personnelles...) ; la structuration de l'information (fresque...)...

De plus, les phases de récupération ou de réactivation alternées avec les phases d'encodage permettent de reformuler et faire le point sur les connaissances acquises et celles qui demandent encore un apprentissage. L'équipe de Roediger souligne l'importance du « test » ou de la pratique du rappel sous forme de quiz, schéma ou autres qui permet de reformuler et se questionner sur les contenus à mémoriser, amenant même à réduire l'anxiété par rapport aux évaluations⁹. Faire le point régulièrement sur ce que l'on sait et ce qu'il reste à apprendre permet d'ajuster ses stratégies de mémorisation. D'autres techniques insistent sur les processus de métamémoire qui permettent d'ajuster ses stratégies en fonction de l'analyse du matériel à mémoriser, par exemple le « *stop think* » qui consiste à évaluer la complexité ou difficulté de mémorisation d'un matériel avant l'apprentissage et après l'apprentissage.

Exemples de stratégies pour mémoriser

Nous préconisons des stratégies de mémorisation pour améliorer l'encodage (entrée) et la récupération (sortie) des informations à l'école : vérifier au préalable l'état affectif de l'enfant, ses éventuelles préoccupations du moment et sa disponibilité attentionnelle à apprendre et à mémoriser ; enrichir l'encodage par une réalisation sensorimotrice qui incarne le souvenir dans une action, un geste (ou éniation) ; associer des émotions lors de l'encodage ; créer des liens avec d'autres connaissances générales pour « accrocher » le souvenir dans un arbre (ou réseau) sémantique ; associer aussi l'information à retenir avec des connaissances plus personnelles, « épisodiques », de l'enfant.

En outre, nous préconisons des stratégies d'organisation du matériel à mémoriser en structurant le document afin de faire une synthèse des éléments essentiels (classement, catégorisation) : création de plans, tableaux, frises ou schémas (cartes mentales : organigramme ou arborescence sémantique d'un concept). Mais, pour que le souvenir s'ancre dans le cerveau, il faut aussi de la répétition, plutôt de façon distribuée (en fractionnant les épisodes de mémorisation) que massée sur une trop longue séance (risque de fatigue, de saturation de la mémoire de travail et d'interférences accrues). Toutefois, dans certains apprentissages dits « procéduraux », comme apprendre à faire du vélo ou de la musique par exemple, l'automatisation exige que la mémoire soit entraînée à la fois de façon massée (dans une séance intense) et distribuée (multiplication des séances).

Enfin, le but de la neuroéducation de la mémoire est l'autonomisation des élèves : apprendre à mémoriser seul à la fin de l'école élémentaire. C'est le domaine de la métacognition, en l'occurrence la métamémoire, qui est la capacité des élèves à analyser eux-mêmes le fonctionnement de leur mémoire : ses forces et ses faiblesses. Ils découvrent ainsi les conditions qui leur seront les plus adaptées : lecture silencieuse, lecture à haute voix, copie, schéma, etc. Le rappel régulier des informations à

mémoriser permettra non seulement de consolider les souvenirs mais aussi d'ajuster ses stratégies pour mémoriser ce qui n'est pas encore totalement retenu.

Ces métaconnaissances se construisent jusqu'à la fin de l'adolescence. Elles s'acquièrent par l'expérience des situations de mémorisation, les interactions sociales et le feedback des enseignants lors de tests. La mémorisation est d'ailleurs optimale lorsque l'élève est testé de façon répétée et alternée – ce nombre de tests étant une variable plus importante que le temps d'étude lui-même. Pour l'aspect social de la métamémoire, on peut se référer à la zone proximale de développement de Vygotski dans laquelle l'enseignant doit ici expliciter à l'élève (a) la façon dont il doit lui-même analyser la situation de mémorisation, tenant compte de la tâche, (b) la gestion de son temps, (c) le type de représentation privilégié, (d) les situations d'échec, etc.

L'hippocampe et les mathématiques

La perception que les enfants ont de leurs compétences¹⁰ est également importante comme le suggère une étude récente de l'équipe de Menon¹¹. Ces auteurs ont évalué chez 240 enfants de 6 à 10 ans la perception qu'ils avaient des mathématiques ou plus précisément la positivité de leur attitude face au mathématiques avec des questions de type : « Évalue combien tu aimes les mathématiques ? » ou « Évalue combien tu aimes faire des problèmes de mathématiques ? » associées à des questions générales sur les autres matières. Ces auteurs observent qu'une attitude positive, et plus particulièrement l'intérêt qu'ils ont et l'estimation de leur niveau de performances, est très liée au degré de réussite. Ils ont également regardé l'activité cérébrale des enfants lorsqu'ils réalisaient des additions simples ou complexes. Ils remarquent que, plus l'attitude est positive, plus l'activité de l'hippocampe qui joue un rôle central dans le fonctionnement de la mémoire est importante. L'hippocampe permet d'associer différentes informations pour former un souvenir cohérent et dans le cas des mathématiques, il pourrait faciliter notamment le souvenir des associations entre les problèmes et leurs solutions et soutenir l'acquisition des compétences mathématiques dès les premières étapes. L'attitude positive faciliterait le recrutement de cette structure et en conséquence, l'encodage et la récupération des traces mnésiques permettant de réussir les tâches mathématiques.

2 Consolidation

La consolidation est un phénomène dynamique. Aussi, la répétition est également importante pour soutenir la formation de nouvelles connaissances. La répétition des épisodes d'apprentissage pour un même concept permet d'effacer progressivement les souvenirs spécifiques des épisodes pour ne conserver que le concept ou la connaissance. La réactivation régulière de ces connaissances

améliore leur maintien à long terme, et c'est dans ce cadre que l'apprentissage distribué présente toute son importance. De nombreux travaux ont montré que l'apprentissage de connaissances sur plusieurs épisodes, intercalés de périodes de repos, est plus efficace et durable que l'apprentissage massé sur une seule période. Cette supériorité doit tenir compte de la durée des épisodes d'apprentissage et, en conséquence, de l'intervalle de temps entre les apprentissages, du type de matériel à mémoriser et de l'exercice lui-même. Cette distribution espacée de la récupération permettra également de réduire les possibles effets d'interférence en oubliant les informations superflues pour ne consolider que la connaissance. Il existe tout de même des conditions où l'apprentissage massé prend tout son sens, c'est dans le cadre de l'apprentissage procédural comme apprendre à faire du vélo. Dans ce cas, l'automatisation de la procédure se fait par la répétition de cette procédure au sein d'une même séance (apprentissage massé) et en multipliant les séances (apprentissage distribué).

Une technique impliquant la répétition et issue de la neuropsychologie peut également se révéler pertinente. La récupération espacée a été proposée dans des pathologies de la mémoire ; elle consiste à tester la récupération d'informations en augmentant progressivement l'intervalle de rétention. L'enfant doit dans un premier temps faire un rappel immédiat de l'information à mémoriser, un nom par exemple. En cas de réussite, l'intervalle est augmenté de cinq secondes puis 10, 20 secondes etc. Cette technique renforce l'implication de la mémoire et, là encore, s'appuie sur un apprentissage à la fois massé et distribué. Enfin, la consolidation des connaissances et des procédures implique nécessairement des périodes de sommeil pendant lesquelles la connectivité neuronale va se renforcer.

Conclusion

La mémoire est avant tout une structure dynamique, mouvante, changeante, qui s'appuie sur des réseaux de structures cérébrales dotées d'une grande plasticité, notamment au cours de l'enfance et de l'adolescence, mais aussi chez l'adulte. Cette mémoire plurielle – que ce soient ses mécanismes qui favorisent les apprentissages ou ses contenus qui forgent à la fois l'identité personnelle et le lien social – est un capital précieux. Elle est fragile, sensible à l'évolution de notre environnement et nécessite un soin particulier, une éducation lors des premières années, quand les apprentissages sont nombreux, comme elle mérite une attention tout au long de la vie.

Les Essentiels

- Les différents systèmes de mémoire se mettent en place très progressivement au cours de l'enfance et de l'adolescence.
- Les mémoires perceptive et procédurale sont les premières opérationnelles et sous-tendent de nombreuses acquisitions, dès les premiers jours et les premiers mois de vie.
- La mémoire sémantique se développe ensuite, ce qui conduit à une organisation structurée des connaissances conceptuelles.
- La mémoire de travail (qui permet d'administrer l'espace conscient) et la mémoire épisodique (la mémoire des souvenirs), deux systèmes complexes, se mettent en place plus lentement et atteignent leur pleine maturité à l'âge adulte.
- Au-delà des apprentissages, la mémoire permet la construction de l'individu, de son identité personnelle, de ses liens avec les autres, de ses valeurs morales et spirituelles, cette construction se prolongeant tout au long de la vie. Elle est un lien transgénérationnel, comme elle est un lien entre les cultures et elle est à la base de la richesse des échanges entre les individus.
- L'éducation a une place prépondérante dans le développement de la mémoire, et plus précisément, l'éducation d'une bonne utilisation de la mémoire et de la cognition. Cette éducation va bien au-delà de techniques d'apprentissage, dans un cadre scolaire ou périscolaire, mais elle a des répercussions tout au long de la vie de l'individu, y compris quand celui-ci vieillit. C'est ce qui renvoie au concept de réserve cognitive, le « capital » que l'on forme tout au long de la vie et qui permet de vieillir dans de meilleures conditions.

1. Voir chapitre 7 sur les fonctions exécutives.

2. Eustache F., Desgranges B., *Les chemins de la mémoire*, Inserm Le Pommier, 2012 ; Eustache F., Guillery-Girard B., *La neuroéducation. La mémoire au cœur des apprentissages*, Odile Jacob, 2016.

3. Voir le chapitre 4 d'Olivier Houdé pour le statut particulier de la fonction d'inhibition et le chapitre 7 de Grégoire Borst sur les fonctions exécutives.

4. Pour aller plus loin : Eustache F. et al., *La mémoire au futur*, Le Pommier, 2018.

5. Ostby Y., Tamnes C.K., Fjell A.M., Westlye L.T., Due-Tønnessen P., Walhovd K.B. (2009). Heterogeneity in subcortical brain development: A structural magnetic resonance imaging study of brain maturation from 8 to 30 years. *Journal of Neuroscience*, 29(38) 11772-11782.
6. *Ibid.*, Eustache, Guillery-Girard, 2016.
7. Voir le chapitre 5 de Jean-Philippe Lachaux pour de plus amples informations sur l'attention.
8. Tulving E., Thomson D. M. (1973). Encoding specificity and retrieval processes in episodic memory. *Psychological Review*, 80(5), 352-373.
9. Brown P. C., Roediger H. L. III., McDaniel M. A., *Make it stick: The science of successful learning*, The Belknap Press of Harvard University Press, 2014.
10. Sur ce point, et plus généralement celui de la motivation, voir le chapitre 8 de Joëlle Proust sur la métacognition et l'auto-évaluation..
11. Chen et al. (2018). Positive attitude toward math supports early academic success: Behavioral evidence and neurocognitive mechanisms. *Psychological Science*, 29(3) 390-402.

Le sommeil et les apprentissages

Par Philippe Peigneux

Le sommeil occupe une place fondamentale dans notre vie. La durée recommandée est de 14 à 17 heures pour un nourrisson, 9 à 11 heures pour un enfant en école primaire, et 7 à 9 heures pour un adulte. Certains ont besoin de plus ou moins de sommeil pour se sentir frais et dispos au réveil, ce qui est tout à fait normal, mais dormir en-dessous de ses besoins est associé à des difficultés cognitives (par exemple, baisse de la vigilance et des capacités d'apprentissage) et/ou physiologiques (par exemple, ralentissement de la croissance, augmentation des risques cardiovasculaires et de diabète). À 8 heures de sommeil par nuit en moyenne, un individu de 80 ans a dormi près de 233 600 heures sur son existence ! Il est logique de penser que le sommeil joue un rôle crucial dans notre vie, mais à quoi est-il utile exactement, et comment ? Nous nous concentrons ici sur le cerveau «endormi» et ses relations avec nos capacités d'apprentissage et de consolidation en mémoire¹, en gardant à l'esprit que le sommeil joue un rôle crucial dans bien d'autres domaines.

Lorsque nous nous endormons, nous arrêtons de jouer, d'étudier, de communiquer avec autrui..., ce qui nous donne l'illusion d'un cerveau inactif, comme un ordinateur éteint. La conception est erronée car tout comme le muscle cardiaque ne cesse de battre, le cerveau et ses milliards de cellules ne s'arrêtent jamais de fonctionner. Si le cerveau cesse d'être alimenté en oxygène (c.-à-d., une hypoxie), cela

entraîne la mort neuronale et des séquelles sévères si les populations de neurones atteintes sont suffisamment larges et/ou situées dans une zone cruciale du cerveau. Par exemple, une atteinte des régions hippocampiques donnera lieu à une amnésie sévère. De plus, le sommeil n'est pas un état homogène, avec des cycles de 90 minutes au cours desquels se succèdent deux états bien distincts : le sommeil lent et le sommeil à mouvements oculaires rapides (aussi appelé sommeil paradoxal). Ces états de sommeil se différencient entre eux et par rapport à l'éveil par les régions cérébrales les plus actives, la manière dont elles coopèrent pour former des réseaux fonctionnels, l'activité électroencéphalographique et l'implication des systèmes de neurotransmetteurs qui stimulent l'activité des cellules cérébrales. Les recherches en neurosciences cognitives ont démontré que l'activité du cerveau en sommeil participe à la consolidation et au stockage en mémoire à long terme de nouvelles informations, et a une influence importante sur l'efficacité de notre fonctionnement cognitif et mental à l'éveil.

Sommeil et processus d'apprentissage

Un apprentissage efficient nécessite la mobilisation de ressources cognitives dans un contexte d'éveil cérébral. Les études de terrain montrent qu'un sommeil insuffisant ou de mauvaise qualité a un effet négatif sur le fonctionnement scolaire, et la santé psychologique et physique. Les effets négatifs sur l'apprentissage peuvent être directs (par ex., réduction des ressources attentionnelles et somnolence diurne) ou indirects (altérations de l'humeur et troubles du comportement interférant avec l'apprentissage). À titre d'exemple, on note une corrélation négative entre la qualité du sommeil de l'enfant et la fréquence en classe des symptômes d'inattention et d'hyperactivité reportés par les enseignants. Les études expérimentales confirment ces observations empiriques. La privation totale d'une nuit de sommeil

entraîne une chute marquée des capacités cognitives, principalement des fonctions attentionnelles et exécutives. La vigilance (c.-à-d., la capacité de maintenir son attention pour une longue durée dans un environnement monotone) est la composante attentionnelle la plus affectée. On peut aussi observer des difficultés dans des tâches qui demandent des ressources cognitives importantes. Par exemple, la limitation des ressources cognitives disponibles suite à une restriction de sommeil peut aisément perturber la résolution de problèmes mathématiques qui demandent à la fois le maintien temporaire d'éléments en mémoire et leur manipulation active sous forme d'opérations (multiplication, report...). De même, les capacités exécutives d'organisation et de planification nécessaires à l'encodage et à la récupération intentionnelle d'informations en mémoire à long terme peuvent être affectées. Bien que l'organisme puisse temporairement mobiliser des ressources cognitives et cérébrales additionnelles pour atteindre un niveau de performance suffisant dans des tâches plus stimulantes, cette compensation ne peut pas être maintenue sur une longue période et on observera rapidement des fluctuations importantes de performance. Par contre, les processus automatisés (routines cognitives, habiletés motrices ou perceptives...) seront peu ou moins affectés. Les études de privation partielle où l'on maintient pendant plusieurs jours le nombre d'heures de sommeil en-dessous des besoins physiologiques mettent en évidence des problèmes cognitifs similaires, même si parfois plus discrets. Enfin, les études interventionnelles qui visent à optimiser le sommeil montrent une amélioration de la performance académique et neurocognitive, ce qui souligne l'importance des programmes d'éducation à l'hygiène du sommeil.

Sommeil et consolidation en mémoire

La consolidation mnésique est le processus temporel qui prend place après la fin de l'apprentissage, par lequel les informations récemment acquises et initialement fragiles sont renforcées en mémoire à long terme. Au cours du sommeil, la réorganisation des réseaux cérébraux et le remodelage des connexions synaptiques sont des mécanismes de plasticité cérébrale qui favorisent la consolidation mnésique. Les études de neuroimagerie suggèrent que l'activité cérébrale associée à un apprentissage est spontanément «rejouée» au cours du sommeil et que les représentations associées à cette activité cérébrale sont progressivement transférées des régions hippocampiques vers le néocortex pour un stockage plus durable, du moins pour les informations verbales qui représentent une large proportion des apprentissages scolaires. Ce processus de transfert d'information au sein du cerveau semble fortement accéléré chez l'enfant par rapport à l'adulte, une efficience pouvant s'expliquer par la plus grande quantité et profondeur du sommeil lent de l'enfant. Le rôle spécifique des stades de sommeil reste débattu. On trouve de manière consistante un rôle favorable du sommeil lent pour la consolidation des mémoires verbales et spatiales. Le rôle du sommeil paradoxal est plus controversé, mais les études suggèrent que ce dernier participe au traitement et à la régulation des composantes émotionnelles associées ou non à un apprentissage, et à la consolidation de certains apprentissages procéduraux complexes. ●

1. Deliens G., Peigneux P. (2011). Sommeil et mémoire, In Billiard M., Dauvilliers Y. (Ed.), *Les troubles du sommeil*, Elsevier Masson, p. 73-82.

Les fonctions exécutives

par Grégoire Borst

Pour résoudre le problème suivant « Mathieu a 30 billes, il en a 10 de moins que Joanne, combien de billes Joanne a-t-elle ? », nous mobilisons non seulement des processus mentaux spécifiques à la résolution de ce type de problème (processus de reconnaissance visuelle et sémantique des mots, de compréhension du sens global de l'énoncé, de traitements du nombre de billes, d'exécution de l'opération arithmétique) mais également des processus plus généraux qui contrôlent la sélection et l'activation de ces processus spécifiques. Ces processus mentaux plus généraux impliqués dans toutes les situations scolaires permettent à notre cerveau (a) de maintenir et de manipuler en mémoire de travail les informations à traiter (ici additionner les 10 billes aux 30 billes pour découvrir que Joanne en a 40), (b) de bloquer (inhiber) les informations ou les associations non-pertinentes à la résolution du problème (ici l'association entre le « moins » de l'énoncé et la soustraction), et (c) d'être flexible en s'adaptant aux changements (ici un possible changement dans l'énoncé du problème qui sera présenté ultérieurement). L'ensemble de ces processus mentaux de haut-niveau constituent les fonctions dites exécutives de notre cerveau. Ces fonctions exécutives sont typiquement requises dans des contextes où nous en remettons à nos automatismes, nos réflexes, nos intuitions ou notre instinct ne nous permet pas d'atteindre nos objectifs. Mobiliser ces fonctions exécutives s'avère coûteux pour notre cerveau, ce qui explique notre tendance à utiliser spontanément nos routines et nos automatismes, moins

gourmands en ressources cognitives, y compris dans des situations où ils ne sont pas adaptés. Il existe trois fonctions exécutives principales de notre cerveau : la mémoire de travail, l'inhibition et la flexibilité cognitive¹. Sur la base de ces trois fonctions exécutives se construisent les fonctions exécutives de plus haut niveau : la planification, la résolution de problème et le raisonnement². Dans ce qui suit, nous présenterons ces trois fonctions exécutives et leur développement, leur rôle dans le développement cognitif et les apprentissages scolaires de l'enfant et de l'adolescent et les pistes qui ont été envisagées pour les entraîner à l'école et à la maison.

I. Les fonctions exécutives et leur développement

1 L'inhibition (ou contrôle inhibiteur)

Dans toutes les situations où nous devons faire preuve de retenue, sortir de nos routines ou traiter une information bien spécifique sans tenir compte des autres informations présentes dans notre environnement, nous engageons notre contrôle inhibiteur. Le contrôle inhibiteur nous permet donc de nous adapter aux changements dans notre environnement et d'exercer notre libre arbitre. Ce contrôle inhibiteur s'exerce à différents niveaux du traitement de l'information (sélection de l'information à traiter, sélection de la réponse ou exécution de cette réponse) et sur différents types d'informations (perceptives, motrices, cognitives, émotionnelles³).

a. Typologie du contrôle inhibiteur et quelques épreuves classiques pour le mesurer

Le contrôle inhibiteur est engagé quand nous devons focaliser notre attention (on parle d'attention sélective ou de contrôle attentionnel)

sur une conversation ou un visage dans un contexte (un hall de gare par exemple) où nous devons ignorer (inhiber) de très nombreuses interférences auditives (autres conversations, bruits des trains,...) et visuelles (autres visages, panneaux publicitaires lumineux,...). Cette attention sélective est volontaire et guidée par des objectifs fixés a priori. Elle se distingue d'une forme plus automatique d'attention guidée essentiellement par les informations auditives ou visuelles saillantes dans notre environnement : notre attention est automatiquement captée par une détonation ou un flash lumineux⁴. Le contrôle attentionnel est mesuré en laboratoire en utilisant, par exemple, une tâche dite de flanker où le participant doit déterminer la direction de la flèche au centre d'un ensemble de flèches pointant dans la direction opposée (> > > < > > >⁵).

Le contrôle inhibiteur ne se limite pas à sélectionner les informations sur lesquelles nous devons porter notre attention dans notre environnement. Il opère également sur toutes nos réponses comportementales comme un signal « stop » qui permet à notre organisme d'attendre avant d'agir, de prendre une décision ou de donner une réponse. Il permet de contrôler notre impulsivité, nos comportements, nos émotions, et nos actions. En psychologie, cette capacité d'inhibition comportementale est mesurée dans des tâches où il faut résister à une réponse dominante par exemple une routine motrice (appuyer sur un bouton à l'apparition d'un stimulus dans la tâche de Go/NoGo) ou une information sémantique non-pertinente (la couleur dénommée par un mot dont il faut identifier la couleur de l'encre, ROUGE) dans la tâche de Stroop⁶. L'inhibition comportementale (ou inhibition de la réponse) permet aussi de rester engagé sur une activité alors que nous aimerions en faire une autre et plus généralement de résister à la tentation de la procrastination. Enfin, elle permet de résister à une récompense (un gâteau ou une somme d'argent par exemple) immédiate pour obtenir une récompense plus importante dans le futur. On mesure classiquement la capacité de l'enfant à se contrôler dans une tâche

dite de gratification différée⁷ où il doit choisir entre manger une guimauve placée devant lui ou attendre (15 mn) sans la manger pour en obtenir une deuxième. Cette étude révèle que dès 4 ans, les enfants sont en mesure de ne pas manger immédiatement la guimauve mais seul un tiers d'entre eux est en mesure de résister 15 minutes. Le choix de différer dans le temps la récompense est directement lié à la confiance accordée à l'adulte : si les enfants ne le jugent pas de confiance, ils s'empressent de manger la guimauve !

« Il opère également sur toutes nos réponses comportementales comme un signal « stop » qui permet à notre organisme d'attendre avant d'agir, de prendre une décision ou de donner une réponse. »

Le contrôle inhibiteur est également requis quand nous devons inhiber certaines stratégies très automatisées, rapides, peu coûteuses cognitivement, qui marchent très bien, très souvent mais pas toujours (des heuristiques) pour activer une stratégie plus lente, plus coûteuse cognitivement mais qui fonctionne toujours (un algorithme exact⁸). Dans le problème arithmétique présenté plus haut, l'enfant a tendance à effectuer une soustraction pour déterminer le nombre de billes que possèdent Joanne alors même qu'il devrait effectuer une addition. Nous avons montré que cette erreur systématique observée chez les élèves de CM1 et CM2 s'expliquait, pour partie, par la difficulté qu'ils avaient à inhiber l'heuristique « si moins dans l'énoncé je soustrais, si plus dans l'énoncé j'additionne »⁹. Nous avons développé au laboratoire¹⁰ un paradigme expérimental dit d'amorçage négatif qui permet de mesurer finement si la résolution d'un problème nécessite d'inhiber une heuristique trompeuse¹¹. Ce paradigme repose sur un principe simple : notre cerveau met un peu plus de temps à activer une information ou une stratégie s'il vient juste de l'inhiber¹². Donc, pour tester si, dans une situation donnée, l'inhibition d'une heuristique

est nécessaire pour résoudre un problème donné, le principe est de créer une séquence expérimentale où les participants doivent résoudre un problème non-piège (où l'heuristique fonctionne) juste après un problème-piège (où l'heuristique doit être, par hypothèse, inhibée comme le problème arithmétique présenté en introduction de ce chapitre) ou juste après un problème neutre qui ne requiert ni l'heuristique ni son inhibition. On démontre expérimentalement que l'inhibition d'une heuristique est nécessaire pour la résolution d'un problème quand les participants mettent un peu plus de temps pour résoudre un problème non-piège précédé par un problème-piège qu'un problème non-piège précédé par un problème neutre. Notons que cette inhibition plus cognitive permet également aux informations non-pertinentes pour la résolution du problème en cours de ne pas interférer avec le contenu de la mémoire de travail¹³.

b. Développement du contrôle inhibiteur

Dès 9-10 mois, les bébés sont capables d'inhiber une réponse inappropriée pour effectuer une tâche¹⁴ et, comme chez l'adulte¹⁵, le cortex préfrontal est impliqué dans ce mécanisme d'inhibition¹⁶. L'efficacité de ce contrôle inhibiteur augmente de l'enfance à l'âge adulte : au cours du développement, on arrive de mieux en mieux à nommer la couleur de l'encre d'un mot dénommant une couleur différente de celle de l'encre à nommer (par exemple VERT écrit en bleu ; tâche de Stroop), à identifier l'orientation d'une flèche quand celle-ci est présentée au milieu d'un ensemble de flèches qui pointent dans la direction opposée (par exemple >>> < >>> ; tâche de Flanker), à ne pas effectuer une saccade (mouvement des yeux) vers un point lumineux qui apparaît à l'écran (tâche d'anti-saccade¹⁷), à stopper une action motrice déjà engagée (tâche de stop-signal¹⁸), ou à ne pas appuyer sur un bouton, sur lequel on a appuyé plusieurs fois dans les essais qui précèdent, en réponse à la présentation d'un stimulus (tâches de Go/NoGo¹⁹).

« Si la capacité à résoudre des conflits de nature non émotionnelle augmente linéairement avec l'âge, la capacité à résoudre des conflits émotionnels est altérée spécifiquement à l'adolescence. »

Si la capacité à résoudre des conflits de nature non émotionnelle (par exemple la couleur de l'encre et la couleur du mot dans la tâche de Stroop couleur) augmente linéairement avec l'âge (de l'enfance à l'âge adulte), la capacité à résoudre des conflits émotionnels (par exemple entre l'émotion d'un visage et l'émotion dénommée par un mot dans la tâche de Stroop émotionnel²⁰) est altérée spécifiquement à l'adolescence. Cette difficulté à résoudre des conflits de nature émotionnelle à l'adolescence est en partie liée à la maturation cérébrale plus précoce des aires émotionnelles sous-corticales (le système limbique enfoui au cœur du cerveau) que des aires préfrontales (à l'avant du cerveau) qui permettent de réguler les émotions²¹. Ce décalage de maturation cérébrale entre ces deux systèmes expliquerait la réactivité émotionnelle accrue observée à l'adolescence et de manière plus générale l'engagement, à cette période de la vie, dans des conduites à risques notamment en contexte social (en présence de pairs²²).

Le développement des différents types de contrôle inhibiteur est sous-tendu par un ensemble de changements dans le cerveau tant au niveau fonctionnel (les réseaux de neurones impliqués dans le contrôle inhibiteur deviennent plus spécifiques avec l'âge²³) qu'au niveau anatomique (la connectivité entre les différentes régions de ces réseaux augmente avec l'âge²⁴).

Le développement cérébral

Le volume du cerveau augmente rapidement au cours des premières années de la vie (95 % du pic à 6 ans) avant d'atteindre un pic vers 12 ans et de se stabiliser²⁵. Cette apparente stabilisation du volume total du cerveau dès l'enfance masque une dynamique développementale de progression et de régression du volume de différents tissus, dans différentes régions, à différents âges. Ainsi, comme pour le développement cognitif, la maturation cérébrale s'apparente à un système dynamique non-linéaire. Le volume de la substance grise corticale et sous-corticale suit, par exemple, une trajectoire en U inversé au cours du développement avec une augmentation du volume suivie d'une diminution qui apparaît plus précocement dans les aires sensorimotrices (aires à l'arrière du cerveau) et plus tardivement dans les aires associatives de haut-niveau, notamment dans le cortex préfrontal (à l'avant du cerveau), siège des fonctions exécutives et de l'inhibition en particulier²⁶. À l'inverse, le volume de la substance blanche augmente de façon linéaire de l'enfance à l'âge adulte suivant un axe rostro-caudal (de l'avant vers l'arrière, Paus et al., 1999). Les faisceaux de substance blanche qui assurent la connexion des différentes aires corticales subissent un certain nombre de changements au cours du développement avec notamment l'apparition progressive de connexions à longues distances qui permettent aux aires préfrontales de contrôler l'activation des autres aires cérébrales²⁷.

2 Mémoire de travail

a. Les mémoires de travail et quelques épreuves classiques pour les mesurer

La mémoire de travail constitue l'atelier du cerveau. Elle permet de maintenir activement des informations et de les manipuler pendant

quelques dizaines de secondes pour atteindre un but défini a priori²⁸. Cette mémoire est mobilisée quand nous devons organiser des informations ou les relier entre elles pour résoudre un problème. Elle est typiquement engagée pour effectuer des opérations arithmétiques complexes de tête (calcul mental) et pour le langage oral et écrit. On distingue classiquement la mémoire de travail verbale et la mémoire de travail visuo-spatiale en fonction de la nature des informations à maintenir et à manipuler mentalement. Le maintien actif des informations en mémoire de travail repose (a) sur le cortex préfrontal qui permet d'allouer des ressources attentionnelles aux informations à maintenir et de gérer les interférences potentielles d'informations présentes dans l'environnement et (b) sur les aires cérébrales impliquées dans le traitement perceptif des informations maintenues en mémoire de travail²⁹.

La mémoire de travail, contrairement à la mémoire à long terme, a une capacité limitée : 7 informations peuvent être maintenues et manipulées simultanément³⁰. La capacité de la mémoire de travail est mesurée classiquement par des épreuves d'empan qui consistent à présenter des séries de longueur croissante de chiffres, de lettres ou de points dans l'espace et de demander au participant à la fin de chaque série de rappeler les éléments de la série dans l'ordre (ou dans l'ordre inverse) de leur présentation. On stoppe le test quand le participant fait plus de deux erreurs successives. Le nombre d'éléments dans la dernière série correctement rappelé constitue la capacité (l'empan) de la mémoire du participant testé. Une version plus motrice de ces épreuves existe dans laquelle le participant doit reproduire la séquence motrice qui vient de lui être présentée (épreuve des blocs de Corsi).

« La mémoire de travail, contrairement à la mémoire à long terme, a une capacité limitée : 7 informations peuvent être maintenues et manipulées »

Pour évaluer la capacité des participants à manipuler des informations en mémoire de travail et notamment leur capacité à rafraichir le contenu de la mémoire de travail, les chercheurs ont développé l'épreuve de n-back³¹. Le principe consiste à présenter une série de stimuli sur un écran d'ordinateur, des lettres par exemple, et de demander au participant de déterminer si la lettre qu'on lui présente est la même que celle qui a été présentée juste avant (condition dite de 1-back), en avant dernière (condition dite de 2-back), ou en avant avant-dernière (condition dite de 3-back) dans la série. Le participant doit donc maintenir en mémoire de travail les n éléments présentés antérieurement dans la série tout en rafraichissant ces n éléments à chaque nouvel élément présenté. On sent intuitivement que cette épreuve de n-back n'évalue pas uniquement les capacités de mémoire de travail³². Et de fait, elle engage également les capacités d'attention sélective et de contrôle inhibiteur. De manière plus générale, il est difficile de dissocier strictement ces deux fonctions exécutives : l'inhibition opère quasiment systématiquement sur des informations qui sont activement maintenues et manipulées en mémoire de travail.

b. Développement de la mémoire de travail

Comme pour le contrôle inhibiteur, le bébé de quelques mois est déjà capable de maintenir un ou deux éléments en mémoire de travail³³. Dès 9 mois, il peut non seulement maintenir des informations en mémoire de travail mais aussi rafraichir le contenu de sa mémoire de travail quand c'est nécessaire³⁴. Le développement de la mémoire de travail se poursuit, néanmoins, pendant toute l'adolescence jusqu'à l'âge adulte³⁵ et ce même dans des tâches très simples : dans une tâche où les participants doivent orienter leur regard vers la position où est apparu un objet quelques secondes

auparavant (ce qui nécessite de maintenir en mémoire de travail la position cet objet dans l'environnement), les performances augmentent linéairement jusqu'à la fin de l'adolescence. Notons que le développement des capacités de mémoire de travail est fortement dépendant (a) du développement des capacités à mettre en œuvre des stratégies pour maintenir les informations à retenir (comme la répétition verbale) et (b) du développement des capacités de contrôle inhibiteur qui permettent de gérer les interférences pendant la phase de maintien des informations en mémoire.

Le développement des capacités de mémoire de travail est soutenu par la maturation progressive du réseau cérébral impliqué dans cette fonction exécutive. La plupart des études en IRMF suggèrent que les mêmes régions sont activées chez les enfants, les adolescents et les adultes quand ils effectuent des tâches de mémoires de travail même si le degré d'activation de ces régions varie avec l'âge. De fait, la mémoire de travail des enfants et des adolescents reposent sur le même réseau fronto-pariétal que celui des adultes et l'amélioration progressive de leurs capacités de mémoire de travail dépend du degré d'activation des régions de ce réseau³⁶. En parallèle, les activations dans les régions qui ne sont pas spécifiquement impliquées dans cette fonction exécutive diminuent³⁷ et la connectivité anatomique entre le cortex frontal et pariétal se renforce³⁸.

3 Flexibilité cognitive

a. Flexibilité cognitive et quelques épreuves pour la mesurer

La flexibilité cognitive se définit comme la capacité à s'adapter aux changements dans notre environnement, qu'il s'agisse de changer de stratégie, d'adopter une perspective différente sur un problème ou plus généralement de chercher d'autres manières de raisonner et de penser. Elle est mobilisée dans toutes les situations où notre cerveau doit s'adapter à un changement de règles, de stratégies de

résolution de problème, ou d'activités. Elle repose donc sur les deux fonctions exécutives présentées précédemment car être flexible nécessite, à minima, de maintenir plusieurs informations ou règles en mémoire de travail et d'inhiber l'une pour activer l'autre au cas par cas³⁹. Pour mesurer les capacités de flexibilité cognitive, les chercheurs ont mis au point la tâche de classement de cartes du Wisconsin (*Wisconsin Card Sorting Task* ou WCST en anglais). Dans ce test, chaque carte comprend une ou plusieurs formes géométriques de couleur et peut donc être classée selon trois critères : la couleur, la forme ou le nombre. Sur la base des feedbacks de l'expérimentateur, le participant doit inférer le critère de classification à utiliser. Une fois que le participant a découvert le critère à utiliser, l'expérimentateur change ce critère et le participant doit s'adapter, le plus rapidement possible, à ce changement. Le test de classement de carte avec changement de dimension (*Dimensional Change Card Sort Test* ou DCCST en anglais⁴⁰) reprend le même principe en le simplifiant pour évaluer la flexibilité cognitive des enfants.

Dans ce test, chaque carte comprend deux dimensions (couleur et forme) et l'enfant doit classer 6 cartes selon une dimension (la couleur) avant de classer ces mêmes cartes selon une autre dimension (la forme). Comme chez l'adulte, on évalue la flexibilité cognitive de l'enfant par les erreurs de persévérations : quand l'enfant continue à classer les cartes selon la première dimension (couleur) alors qu'on lui a demandé de les classer selon une nouvelle dimension (forme). La flexibilité cognitive peut aussi être mesurée dans des tâches plus simples qui nécessitent de relier à l'aide d'un crayon, le plus rapidement possible, alternativement des lettres et des nombres disposés aléatoirement sur une feuille en respectant la suite alphabétique et numérique (*Trail Making Test*) : il faut donc relier A à 1, 1 à B, B à 2, etc...

b. Développement de la flexibilité cognitive

Dès 2 ans et demi, les enfants sont capables de résoudre des tâches simples de flexibilité cognitive. Ils sont, par exemple, en mesure d'associer un bouton réponse spécifique à une catégorie d'objets (des bateaux) dans une première tâche et d'associer, dans la tâche suivante, ce bouton-réponse à une nouvelle catégorie d'objets (des fleurs). Ils ont, en revanche, des difficultés jusqu'à 4 ans et demi à envisager les deux représentations d'une même figure ambiguë une fois qu'ils ont identifié l'une ou l'autre des deux représentations (par exemple une figure où on identifie alternativement un lapin ou un canard en fonction d'où l'on porte son attention⁴¹). Les enfants avant 4 ans et demi éprouvent également des difficultés à changer de dimension pour classer les cartes dans le DCCST³⁴ : s'ils ont commencé par classer les cartes selon la nature de l'objet (le camion avec le camion, l'étoile avec l'étoile), ils ont du mal à classer dans un second temps ces mêmes cartes sur la base de la couleur des objets (le camion rouge avec l'étoile rouge, le camion bleu avec l'étoile bleue). Si vers 4 ans et demi, les enfants sont capables d'ajuster leur comportement à un changement quand il intervient entre deux tâches effectuées successivement, la capacité à être flexible d'un essai à un autre dans une même tâche n'apparaît qu'à partir de 7 à 9 ans⁴². S'adapter aux changements reste coûteux pour le cerveau même chez l'adulte : dans une tâche où les adultes doivent maintenir ou modifier leur critère de classification d'un essai à un autre, ils mettent typiquement un peu plus de temps pour répondre quand ils ont dû changer de critère de classification que quand ils maintiennent le même critère⁴³.

Le développement de la flexibilité cognitive est lié essentiellement à la maturation des réseaux cérébraux engagés respectivement dans le contrôle inhibiteur et la mémoire de travail. Et comme pour les deux autres fonctions cognitives, le développement de la flexibilité cognitive repose sur une spécialisation progressive du réseau cérébral impliqué dans cette fonction⁴⁴.

II. Le rôle des fonctions exécutives dans le développement cognitif et les apprentissages scolaires

Les fonctions exécutives sont impliquées dans tous les domaines cognitifs et socioémotionnels de notre existence à tous les âges de la vie⁴⁵. De fait, de nombreuses études suggèrent que ces capacités exécutives sont essentielles pour la réussite scolaire⁴⁶, pour la santé physique et mentale, pour la qualité de vie⁴⁷, et pour les aptitudes socioémotionnelles⁴⁸. Dans ce qui suit, nous nous limiterons à présenter le rôle que jouent ces fonctions exécutives dans le développement cognitif de l'enfant et dans ses apprentissages scolaires.

1 Développement cognitif

Pour Jean Piaget, le grand psychologue du développement du xx^e siècle, les enfants construisent leur intelligence en agissant sur le monde. L'enfant est un savant en devenir (tour à tour logicien, mathématicien, biologiste et physicien) qui en observant le résultat de ses actions sur le monde appréhende les principes logiques, mathématiques, biologiques et physiques qui gouvernent son environnement. Pour Piaget, le développement cognitif est linéaire, synchrone et cumulatif. Il considère notamment que les structures logiques de l'enfant (son intelligence) se complexifient en se coordonnant entre elles à travers quatre stades de développement : le stade sensori-moteur (de 0 à 2 ans) où la perception et la motricité prévalent, le stade préopératoire (de 2 à 7 ans) où les enfants sont essentiellement illogiques, le stade des opérations concrètes (de 7 à 12 ans) où l'enfant raisonne de manière logique sur les objets physiques, et le stade des opérations formelles où l'adolescent

raisonne sur la base de propositions logiques abstraites⁴⁹.

L'idée que le développement cognitif repose sur un mécanisme de coordination des structures logiques élémentaires construites à un stade donné pour produire une structure logique plus complexe au stade suivant constitue, encore à l'heure actuelle, l'un des postulats principaux de la très grande majorité des modèles du développement cognitif⁵⁰. Pour ces modèles théoriques, l'émergence de comportements complexes au cours du développement dépend de la capacité à coordonner un nombre croissant de processus mentaux élémentaires, et donc du développement de la mémoire de travail. La mémoire de travail constitue, pour ces modèles, le mécanisme clef du développement cognitif de l'enfant.

Néanmoins, les travaux menés ces 30 dernières années en psychologie du développement suggèrent que le développement cognitif est moins synchrone et plus dynamique qu'il n'y paraît, ce que les modèles du développement cognitif basés sur la mémoire de travail ont du mal à prendre en compte. Si les bébés possèdent dès la naissance des connaissances conceptuelles sur le nombre, les principes physiques qui régissent les objets et leurs déplacements, les agents et leurs actions, et la géométrie de l'environnement⁵¹, les enfants, les adolescents et les adultes commettent des erreurs systématiques dans des contextes dans lesquels ils doivent mobiliser des connaissances assez semblables à celles observées chez le bébé. Ces erreurs systématiques apparaissent dans certains contextes où les individus, quel que soit leur âge, utilisent une stratégie heuristique (c'est-à-dire une stratégie rapide et peu coûteuse qui marche souvent mais pas toujours) alors qu'il faudrait utiliser un algorithme logique (c'est-à-dire une stratégie lente et coûteuse mais qui marche toujours). La capacité à inhiber une heuristique pour activer un algorithme exact constitue un des mécanismes clefs pour surmonter les erreurs systématiques observées dans différents domaines cognitifs (perception, nombre, catégorisation,

raisonnement, prise de décision) et donc pour le développement cognitif⁵².

Les fonctions exécutives dans l'enfance et la réussite académique et professionnelle future

En 1972, Walter Mischel développe le marshmallow test et démontre pour la première fois que l'enfant n'est pas un être guidé uniquement par ses désirs et son impulsivité et ce même avant 7 ans (l'âge de raison) ! Rappelons que dans ce test, l'expérimentateur place devant l'enfant une friandise (une guimauve ou marshmallow en anglais dans l'expérience originale) et lui propose de manger la friandise qu'il a devant lui tout de suite ou d'attendre pour en obtenir une deuxième. L'expérimentateur sort ensuite de la salle. Le résultat est surprenant : plus de deux tiers des enfants de 4 ans sont capables de résister et attendent avant de manger la friandise même si un tiers seulement résiste jusqu'au retour de l'expérimentateur (15 mn). Autre enseignement de cette étude : la capacité à résister à la récompense immédiate (la guimauve devant l'enfant) pour obtenir une gratification différée plus importante dans le futur (une deuxième guimauve) dans ce test augmente avec l'âge. Il existe sur internet de très nombreuses vidéos de la « *marshmallow experiment* » qui montrent toutes les stratégies mises en place par les enfants pour résister à l'envie de manger la guimauve. Plus de 40 ans après, une équipe de l'université de Cornell a demandé à 26 de ces enfants devenus adultes d'effectuer une tâche de Go/NoGo en utilisant des visages qui exprimaient ou non une émotion⁵³. Les enfants qui étaient les moins enclins à résister à la guimauve étaient, 40 ans après, ceux qui avaient le plus de mal à ne pas appuyer sur un bouton sur lequel ils avaient appuyé à plusieurs reprises mais uniquement quand des visages émotionnels étaient présentés. Cette difficulté à inhiber une réponse motrice dans un contexte chargé émotionnellement est en partie liée à une activation accrue du striatum (structure sous-corticale impliquée dans le réseau de la récompense et du plaisir) et moindre du cortex préfrontal (qui contrôle l'activation du striatum et nos émotions). Il semble donc que la capacité à s'autoréguler pendant l'enfance est

fortement liée à notre capacité à nous contrôler tout au long du développement et de la vie, ce qui explique que les capacités d'autorégulation de l'enfant puissent constituer un facteur prédictif de la réussite académique et professionnelle, de la santé physique et mentale et du bien-être une fois adulte. Une étude longitudinale menée sur plus de 1000 enfants suivis de la naissance à 32 ans au Canada révèle que les différences dans les capacités d'autorégulation mesurées entre 4 et 11 ans prédisent plus fortement les différences de réussites professionnelles, de santé ou de dépendance aux substances psychoactives à l'âge adulte que les différences de niveaux socioéconomiques ou de Quotient Intellectuel (QI)⁵⁴. Une seconde étude longitudinale de ce même groupe de chercheurs sur 500 fratries met en évidence que le frère (ou la sœur) dans la fratrie qui présente les moins bonnes capacités d'autorégulation dans l'enfance aura tendance à moins bien réussir académiquement et professionnellement plus tard à environnement familial identique. Il y a donc un enjeu tant pour l'éducation que la santé publique à promouvoir des interventions qui permettent d'améliorer chez l'enfant ses capacités d'autorégulation.

L'inhibition est également fondamentale pour le développement des capacités socio-émotionnelles et plus spécifiquement des capacités à comprendre les intentions et les états mentaux des personnes avec qui nous interagissons (théorie de l'esprit⁵⁵). La capacité à attribuer des états mentaux à autrui, surtout quand ils sont différents des nôtres, est fortement liée à notre capacité à adopter la perspective de notre interlocuteur. Cette capacité à adopter une perspective hétérocentrée a été étudiée pour la première fois par Piaget dans la tâche dite des trois montagnes⁵⁶ où l'enfant doit déterminer ce qu'il verrait des trois montagnes en relief placées sur un plateau devant lui s'il prenait la perspective d'une poupée placée de l'autre côté de ce plateau. L'enfant a tendance avant 9 ans à adopter sa propre perspective pour répondre (biais égocentré). Mais,

comme dans d'autres domaines, ce biais égocentré est très dépendant du contexte : le bébé est capable d'adopter une perspective hétérocentrée dans certains contextes⁵⁷ alors que l'adulte peut encore être très égocentré dans d'autres situations⁵⁸. Une étude menée dans notre laboratoire révèle que le développement de la capacité à adopter une perspective hétérocentrée (ici, celle d'un avatar qui tient une balle grise dans ses mains présentée soit de face, soit de dos) est, en fait, très dépendante de notre capacité à inhiber notre point de vue égocentré⁵⁹. Pour développer ses compétences sociales (respect d'autrui et tolérance), l'enfant doit donc apprendre à inhiber son point de vue égocentré.

2 Apprentissages scolaires

Les fonctions exécutives jouent également un rôle dans les apprentissages scolaires fondamentaux (lire, écrire, compter, raisonner) en parallèle des processus spécifiques engagés dans chacun de ces apprentissages (comme l'association graphophonologique en lecture ou le dénombrement en mathématiques). Les capacités exécutives (mémoire de travail et contrôle inhibiteur) mesurées chez l'enfant d'âge préscolaire (à 4 ans) constituent, par exemple, un prédicteur des compétences mathématiques et en lecture à 7 ans⁶⁰. Au laboratoire, dans une série d'études menées chez l'enfant, l'adolescent et le jeune adulte, nous avons démontré que certaines difficultés systématiques rencontrées par les enfants (au développement cognitif typique) en mathématiques⁶¹, en lecture⁶² et en grammaire⁶³ peuvent résulter d'une difficulté ponctuelle à résister à des heuristiques scolaires ou à des automatismes.

a. Mathématique et contrôle inhibiteur : les problèmes arithmétiques à contenus verbaux et les nombres rationnels

Le problème arithmétique présenté en introduction de ce chapitre est une situation scolaire dans laquelle les enfants rencontrent typiquement des difficultés au cours de leur scolarité. Quand les enfants de CM1 et de CM2 essaient de résoudre pour la première fois le problème suivant « Mathieu a 30 billes, il en a 10 de moins que Joanne, combien de billes Joanne a-t-elle ? », ils répondent que « Joanne a 20 billes » alors qu'ils devraient répondre qu'elle en a 40. Ce type de problèmes est difficile à résoudre pour l'enfant car il y a piège linguistique : il faut effectuer une addition pour déterminer le nombre de billes de Joanne alors que le terme « moins », associé jusque-là à la soustraction, apparaît dans le problème⁶⁴. Nous avons montré au laboratoire que ces erreurs ne relèvent pas d'un défaut de raisonnement des enfants mais bien d'une difficulté ponctuelle à inhiber l'heuristique « il y a le mot plus j'additionne, il y a le mot moins je soustrais », heuristique qui se renforce sans doute au moment de l'apprentissage des opérations arithmétiques où le cerveau de l'enfant associe le « plus » à l'addition et le « moins » à la soustraction⁶⁵. Plus surprenant encore, cette heuristique perdure chez l'adulte et même chez des experts en mathématiques (étudiants en master de maths⁶⁶).

La comparaison des nombres décimaux peut aussi s'avérer difficile pour les élèves dans certains contextes et notamment quand ils doivent comparer 1,654 à 1,7. Les élèves de CM1 et CM2 répondent que 1,654 est plus grand que 1,7 car 654 est plus grand que 7. Quand cette notion est introduite en primaire, les élèves se basent donc spontanément sur les propriétés des nombres entiers pour comparer les nombres décimaux, ce qui les induit en erreur, notamment dans des contextes dans lesquels les propriétés des nombres entiers interfèrent avec les propriétés des nombres décimaux⁶⁷. Nous avons mis en évidence que la capacité des enfants de 12 ans mais aussi des jeunes adultes à comparer des paires de nombres décimaux du type 1,654 vs. 1,7 était déterminée en grande partie par leur capacité à inhiber leur connaissance des propriétés

des nombres entiers⁶⁸. Cette erreur systématique observée chez les élèves est probablement liée à la séquence pédagogique : c'est bien parce que l'enfant apprend d'abord à raisonner sur des nombres entiers qu'il lui est difficile ensuite de raisonner sur des nombres décimaux dans certains contextes. D'où la nécessité pour son cerveau d'apprendre à inhiber certaines connaissances qu'ils possèdent sur les nombres entiers uniquement dans un contexte où celles-ci interfèrent avec la règle à appliquer.

b. Littératie et contrôle inhibiteur : la discrimination des lettres et les accords sujets-verbes

Quand les enfants commencent à lire et à écrire, ils écrivent certaines lettres à l'envers et ont du mal à distinguer les lettres imprimées à l'endroit et à l'envers⁶⁹. La confusion des lettres dont l'image en miroir constitue une autre lettre (b/d/p/q) est un cas particulier d'erreurs en miroir qui sont les plus fréquentes et les plus difficiles à surmonter pour l'élève⁷⁰. Ces erreurs en miroirs résultent vraisemblablement du fait qu'au cours de l'apprentissage de la lecture, des neurones dans le cortex occipito-temporal ventro-latéral postérieur (sur le côté et à l'arrière du cerveau dans sa partie inférieure) de l'hémisphère gauche se recyclent pour prendre en charge la reconnaissance visuelle des lettres et des mots⁷¹. Avant de se spécialiser dans la reconnaissance des lettres et des mots et de former l'aire de la forme visuelle des mots (AFVM), ces neurones permettent d'identifier des visages ou des animaux et possèdent une propriété très avantageuse pour la reconnaissance de ces stimuli, ils généralisent en miroir (ils répondent de la même manière à la présentation d'un stimulus et de son image en miroir⁷²). Si cette propriété est avantageuse pour la reconnaissance des visages et des animaux, elle est délétère pour la reconnaissance et la discrimination des lettres dont l'image en miroir constitue une autre lettre (b/d/p/q). Dans une série d'expériences, nous avons démontré qu'à

tous les âges, indépendamment de l'expertise en lecture, la capacité à discriminer des lettres dont l'image en miroir constitue une autre lettre, qu'elles soient présentées de manière isolée ou dans un mot, repose sur la capacité à inhiber l'heuristique de généralisation en miroir des neurones de l'AFVM⁵⁴.

Enfin, les enfants ont également certaines difficultés à correctement accorder le sujet et le verbe dans des phrases du type « je les pilote » où ils ont spontanément tendance à écrire « je les pilotes » notamment quand le verbe prend la forme d'un nom⁷³.

« Les données recueillies dans notre laboratoire suggèrent que si certaines erreurs révèlent un manque de connaissances ou de compétences de l'élève, certaines erreurs peuvent aussi être le reflet d'une difficulté ponctuelle et spécifique à résister à (inhiber) une heuristique ou un automatisme. »

L'heuristique « mettre un -s au mot qui suit les » émerge et se renforce sans doute au cours de l'apprentissage de la marque du pluriel des noms, où dans la très grande majorité des cas cette heuristique est pertinente. Nous avons démontré que la capacité de l'enfant, de l'adolescent et de l'adulte à correctement accorder le verbe avec son sujet dans ce contexte nécessite pour le cerveau d'inhiber une heuristique trompeuse (ici l'heuristique « mettre un -s au mot qui suit les ») comme dans toutes les autres situations scolaires présentées précédemment⁷⁴.

L'Attrape-piège pour surmonter les erreurs systématiques en classe

Les données recueillies dans notre laboratoire suggèrent que si certaines erreurs révèlent un manque de connaissances ou de compétences de l'élève, certaines erreurs peuvent aussi être le reflet d'une difficulté ponctuelle et spécifique à résister à (inhiber) une heuristique ou un automatisme. Pour apprendre à l'élève à corriger ce type d'erreurs, il ne suffit pas de lui réexpliquer la règle (ou l'algorithme logique), il faut surtout lui apprendre à inhiber les heuristiques et les automatismes que son cerveau a construits par l'observation de certaines régularités dans son environnement ou au cours d'apprentissages scolaires antérieurs⁷⁵. Nous avons développé au laboratoire un dispositif didactique très simple, l'attrape-piège, pour apprendre aux élèves à inhiber une heuristique dans un contexte où elle les induit en erreur. À l'aide de cet attrape-piège (voir figure 1) composé d'une planche transparente hachurée qui représente l'inhibition de l'heuristique, et d'une partie centrale non- hachurée qui représente l'activation de l'algorithme (la règle à utiliser), nous lui apprenons à identifier son erreur, à en comprendre la cause et à inhiber l'heuristique trompeuse pour ensuite activer la règle à utiliser en manipulant le matériel didactique : il place la réponse erronée produite par l'heuristique sous la planche transparente dans la partie hachurée et la réponse correcte dans la partie non-hachurée. Ce dispositif didactique métacognitif exécutif s'accompagne d'alertes du type « attention il y a un piège » qui permettent au cerveau de l'élève de mieux repérer les problèmes-pièges (ceux où l'heuristique ne fonctionne pas et court-circuite l'activation de l'algorithme exact) après apprentissage. Nous avons montré que cette approche pédagogique est plus efficace qu'un simple rappel de la règle, que ce soit dans la correction des biais de raisonnement⁷⁶ ou dans la correction des erreurs dans le domaine de la comparaison de nombres décimaux (dans des paires du type 1,654 vs. 1,7) ou de fractions (dans des paires du type

1/7 vs. 1/6 où l'élève considère que 1/7 est plus grand que 1/6 car 7 est plus grand que 6).

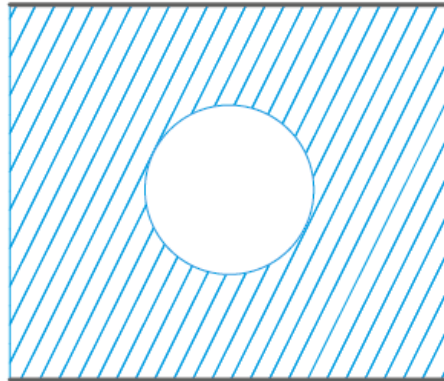


Figure 1. Représentation schématique de l'attrape-piège utilisé pour apprendre aux enfants à inhiber l'heuristique (processus d'inhibition matérialisé par les hachures) et à activer l'algorithme exact (processus d'activation matérialisé par le cercle non-hachuré au centre du dispositif).

III. Les fonctions exécutives : comment les entraîner ?

Les fonctions exécutives étant impliquées dans tous les domaines cognitifs et socioémotionnels à tous les âges de la vie, il y a un enjeu majeur à imaginer des dispositifs qui puissent les renforcer. Il existe deux grands types de dispositifs pour entraîner les fonctions exécutives : des dispositifs qui ciblent une fonction exécutive particulière qui est entraînée intensivement, généralement à l'aide d'un programme informatique ou des dispositifs moins ciblés et plus métacognitifs où l'enjeu est de fournir à l'enfant des connaissances sur la façon dont il peut réguler et contrôler ses comportements. Dans les deux approches, l'effet du dispositif est évalué en comparant les performances au pré-test (avant entraînement) aux

performances au post-test (après entraînement) non seulement sur des tâches qui mesurent spécifiquement les fonctions exécutives entraînées (transfert proche) mais aussi sur des tâches qui évaluent des compétences dans des domaines autres dans lesquels les fonctions exécutives jouent un rôle (transfert lointain). Les transferts proches et lointains sont toujours comparés par rapport à ceux observés dans un groupe contrôle chez qui on entraîne d'autres processus mentaux. Un deuxième critère sur lequel le dispositif est évalué est le maintien dans le temps des effets de transferts observés après arrêt de l'entraînement.

a. Entraînements intensifs aux fonctions exécutives

La plupart des études ont porté sur des entraînements à la mémoire de travail en visant soit à améliorer la capacité (l'empan) de la mémoire de travail⁷⁷ soit la capacité à rafraichir le contenu de la mémoire de travail⁷⁸. Pour augmenter l'empan de la mémoire de travail des enfants, les chercheurs leur proposent de jouer à des jeux-vidéos (CogMed©) dans lesquels ils doivent mémoriser la position des objets présentés les uns après les autres à l'écran et, après un délai de quelques secondes, décider si l'objet présenté est à la même position que celle occupée par un des objets apparus dans la première phase. Pour améliorer les capacités à rafraichir le contenu de la mémoire de travail, les chercheurs proposent aux enfants de jouer à des jeux-vidéos basés sur le principe de la tâche de n-back. La difficulté des jeux-vidéos proposés à l'enfant est adaptée en temps réel à ses performances pour maintenir sa motivation et s'assurer que le jeu-vidéo continue à mobiliser les ressources exécutives de l'enfant pendant toute la durée de l'entraînement. Les enfants s'entraînent classiquement pendant 5 à 8 semaines, 5 jours par semaine à raison de 15 à 20 minutes par jour. Les effets de ce type d'entraînement à la mémoire de travail sont, dans la très grande majorité des études, limités à des effets de transferts proches (à d'autres tâches de mémoire de travail) qui

peuvent se maintenir plusieurs mois après l'arrêt de l'entraînement même si ces effets s'estompent avec le temps⁷⁹. Ces améliorations de la mémoire de travail sont sous-tendues par un renforcement de l'activité des structures cérébrales fronto-pariétales impliquées dans cette fonction exécutive. Entraîner les capacités de rafraîchissement de la mémoire de travail semble produire non seulement des transferts proches mais également des transferts lointains, notamment sur des tests d'intelligence. Néanmoins, ces effets de transferts lointains ne sont pas systématiquement observés. Les méta-analyses sur le sujet suggèrent que les entraînements ciblant spécifiquement la mémoire de travail restent en règle générale inefficaces pour améliorer la réussite académique des enfants sains et, dans les quelques cas où des effets ont pu être observés, ils restent très modestes⁸⁰. Les quelques études qui se sont essayées à des entraînements au contrôle inhibiteur⁸¹ ou à la flexibilité cognitive⁸² aboutissent au même constat : des transferts vers des tâches exécutives (transfert proche) mais pas ou peu de transferts vers des tâches qui évaluent des compétences dans d'autres domaines (transfert lointain).

b. Entraînements métacognitifs aux fonctions exécutives

Dans le cadre de ce type de dispositif, les chercheurs ont, par exemple, étudié l'effet de la méditation dite de pleine conscience sur les capacités exécutives des enfants âgés de 7 à 9 ans⁸³. Pratiquer la méditation de pleine conscience semble produire une amélioration des fonctions exécutives surtout pour les enfants qui présentent les moins bonnes capacités exécutives. Les arts martiaux améliorent également les fonctions exécutives des enfants : les capacités d'inhibition et de régulation émotionnelle et plus généralement le comportement en classe des enfants de 5 à 11 ans pratiquant le taekwondo se sont améliorés plus fortement que ceux d'un groupe d'enfants pratiquant une activité physique régulière plus classique.

« Pratiquer la méditation de pleine conscience semble produire une amélioration des fonctions exécutives surtout pour les enfants qui présentent les moins bonnes capacités exécutives. »

Certains programmes éducatifs permettent d'améliorer les fonctions exécutives des enfants, qu'ils aient été conçus spécifiquement (Tools of the Mind⁸⁴) ou non (méthode Montessori) pour répondre à cet objectif. Les enfants qui sont inscrits dans des écoles qui appliquent la méthode Montessori (par exemple classes multi-âges, matériel pédagogique spécial, absence de notes, travail autodirigé des enfants et collaborations interindividuelles) ont des compétences en lecture, en mathématiques mais également des capacités exécutives plus développées à la fin de la maternelle que des enfants inscrits dans des écoles appliquant une pédagogie plus classique⁸⁵. Dans le cadre du programme « Tools of the Mind », les capacités exécutives et les compétences sociales des enfants de 4 à 5 ans de milieux socioéconomiques défavorisés, mesurées à l'issue de ce programme, sont meilleures que celles des enfants ayant suivi un autre programme éducatif. Plus encourageant encore, le type de programme suivi par l'enfant constituait à l'issue de cette expérimentation un meilleur prédicteur de ses capacités exécutives et de ses compétences sociales que son âge ou son genre. De manière générale, des interventions ciblées visant à améliorer le développement des fonctions exécutives dans le programme scolaire existant permettent d'améliorer le comportement des enfants en classe et de diminuer leur stress⁸⁶.

Une approche écologique pour entraîner les fonctions exécutives en classe

Dans le programme « Tools of the Mind », un ensemble de jeux permettent aux enfants de développer leurs capacités exécutives (et notamment leurs capacités d'inhibition) dans le cadre de situations scolaires classiques. Par exemple, dans une tâche de comptage, les enfants se mettent en binôme, et l'un compte pendant que l'autre vérifie l'exactitude du comptage. Ils échangent ensuite leurs rôles. Cette situation nécessite que chaque enfant respecte bien son rôle et notamment que celui qui vérifie inhibe l'envie de compter à haute voix en même temps que son camarade. De la même manière, un dispositif permet aux enfants de gérer leur temps de parole : l'enfant qui tient un carton avec une oreille doit écouter et n'a pas le droit de parler. Ce dispositif renforce les capacités de contrôle de soi et d'autorégulation des enfants dans la classe et favorise de manière indirecte les apprentissages scolaires. Un dispositif similaire imaginé par Jean Philippe Lachaux est utilisé aujourd'hui dans certaines classes pour réguler l'attention des élèves (cf. Chapitre 6).

Il existe aussi des petits jeux très simples qu'on peut utiliser en classe pour renforcer les capacités d'inhibition des enfants comme « Jacques a dit », « ni oui, ni non », « 1, 2, 3 soleil », « Jour/Nuit » (jeu où on demande à l'enfant de dire jour quand il voit la lune et nuit quand il voit le soleil)... Une étude sur des enfants âgés de 8 à 12 ans a mis en évidence que jouer 7 jours à « Jacques a dit » améliore les capacités d'inhibition chez ces enfants (Zhao et al., 2015). Au laboratoire, en partenariat avec le site Lea.fr (cf. Chapitre 12 page x), nous avons mené la première recherche participative avec les professeurs de plus de 115 classes, dans toute la francophonie, pour évaluer l'effet sur les capacités d'inhibition de participer 15 minutes par jour pendant 6 semaines à ce type de jeux. Les données remontées par les professeurs de l'expérimentation qu'ils ont menée dans leur classe sont très claires : les capacités d'inhibition des

enfants qui ont joué à ces jeux en classe ont plus progressé que celles des enfants ayant joué à d'autres jeux (qui n'entraînent pas l'inhibition) dans la même classe.

« Il existe aussi des petits jeux très simples qu'on peut utiliser en classe pour renforcer les capacités d'inhibition des enfants comme « Jacques a dit », « ni oui, ni non », « 1, 2, 3 soleil », « Jour/Nuit ». »

Conclusion

La mémoire de travail, l'inhibition et la flexibilité cognitive constituent les trois fonctions exécutives qui permettent à notre cerveau de contrôler l'ensemble des processus et des stratégies à mettre en œuvre dans toute résolution de problème dans la vie quotidienne et à l'école. Elles jouent un rôle central non seulement dans le développement cognitif et socioémotionnel de l'enfant et de l'adolescent mais aussi dans leurs apprentissages scolaires fondamentaux. Des jeux en classe ou sur tablette permettent d'améliorer les capacités exécutives des enfants même si les transferts sur l'acquisition des compétences en classe restent limités. L'enjeu est aujourd'hui d'imaginer des activités pédagogiques à même d'aider l'élève à développer ses compétences exécutives dans chaque situation scolaire où l'élève développe ses compétences langagières, de lecture, de calcul, de raisonnement, et de respect d'autrui car les compétences exécutives étayent l'acquisition de toutes ces compétences académiques.

Les Essentiels

- La mémoire de travail, l'inhibition et la flexibilité cognitive constituent les trois fonctions exécutives qui permettent à notre cerveau de contrôler l'ensemble des processus et des stratégies à mettre en œuvre dans toute résolution de problème dans la vie quotidienne et à l'école.
- Les fonctions exécutives sont impliquées dans tous les domaines cognitifs et socioémotionnels de notre existence à tous les âges de la vie : ces capacités exécutives sont essentielles pour la réussite scolaire, pour la santé physique et mentale, pour la qualité de vie, et pour les aptitudes socioémotionnelles.
- Certaines difficultés systématiques rencontrées par les enfants (au développement cognitif typique) en mathématiques, en lecture et en grammaire peuvent résulter d'une difficulté ponctuelle à résister à des heuristiques construites à l'école et en dehors.
- Pour apprendre à l'élève à dépasser ce type de difficultés, il ne suffit pas de lui réexpliquer la règle (ou l'algorithme logique), il faut surtout lui apprendre à inhiber les heuristiques et les automatismes que son cerveau a construits par l'observation de certaines régularités dans son environnement ou au cours d'apprentissages scolaires antérieurs.
- L'Attrape piège, un dispositif didactique très simple, permet aux élèves à apprendre à inhiber une heuristique dans toutes les situations scolaires où elle les induit en erreur.
- Des jeux en classe ou sur tablette permettent d'améliorer les capacités exécutives des enfants même si les transferts sur l'acquisition des savoirs fondamentaux restent limités. Néanmoins, des interventions ciblées visant à améliorer le développement des fonctions exécutives dans le programme scolaire existant permettent d'améliorer le comportement des enfants en classe et de diminuer leur stress.

1. Diamond A. (2013). Executive Functions. *Annual Review of Psychology*, 64, 135–168.
2. Collins A., Koechlin E. (2012). Reasoning, learning, and creativity: frontal lobe function and human decision making. *PLoS Biology*, 10, e1001293.
3. Friedman N. P., Miyake A. (2004). The relations among inhibition and interference control functions: a latent-variable analysis. *Journal of Experimental Psychology. General*, 133, 101–135 ; Harnishfeger K. K. (1995). The development of cognitive inhibition. In Dempster F. N., Brainerd C. J. (Eds.), *Interference and inhibition in cognition*, Academic Press, p. 175–204 ; Nigg J. T. (2000). On inhibition/disinhibition in developmental psychopathology: Views from cognitive and personality psychology and a working inhibition taxonomy. *Psychological Bulletin*, 126, 220–246 pour différentes taxonomies du contrôle inhibiteur.
4. Posner M. I., DiGirolamo G. J. (1998). Executive attention: Conflict, target detection, and cognitive control. In R. Passarum (Ed.), *The attentive brain*, MIT Press.
5. Eriksen B. A., Eriksen C. W. (1974). Effects of noise letters upon identification of a target letter in a non- search task. *Perception and Psychophysics*, 16, 143–149. Voir aussi Rueda M. R. et al. (2005). Training, maturation, and genetic influences on the development of executive attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102, 14931–14936 pour une adaptation chez l'enfant en utilisant des poissons à la place des flèches.
6. Stroop J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643–662.
7. Mischel W., Shoda Y., Rodriguez M. L. (1989). Delay of gratification in children. *Science*, 244, 933–938.
8. Houdé O., Borst G. (2015). Evidence for an inhibitory-control theory of the reasoning brain. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 148.
9. Lubin A., Vidal J., Lanoë C., Houdé O., Borst G. (2013). Inhibitory control is needed for the resolution of arithmetic word problems: A developmental negative priming study. *Journal of Educational Psychology*, 105, 701-708.
10. Laboratoire de Psychologie du Développement et de l'Éducation de l'enfant, LaPsyDÉ (CNRS).
11. Borst G., Moutier S., Houdé O. (2013). Negative priming in logicomathematical reasoning: The cost of blocking your intuition. In De Neys W., Osman M. (Eds.), *New Approaches in Reasoning Research – Current Issues in Thinking & Reasoning*, Psychology Press, p. 34-50.
12. Tipper S. P. (2001). Does negative priming reflect inhibitory mechanisms? A review and integration of conflicting views. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 54A, 321-343.
13. *Ibid.*, Diamond, 2013.
14. Amso D., Johnson S. P. (2005). Selection and inhibition in infancy: evidence from the spatial negative priming paradigm. *Cognition*, 95, 27–36.
15. Fuster J. M., *The prefrontal cortex* (3rd ed.), Raven Press, 1997.
16. Bell M. A., Fox N. A. (1992). The relations between frontal brain electrical activity and cognitive development during infancy. *Child Development*, 63, 1142–1163.
17. Luna B. et al. (2004). Maturation of cognitive processes from late childhood to adulthood. *Child Development*, 75, 1357–1372.
18. Aron A.R., Robbin T. W., Poldrack R. A. (2014). Inhibition and the right inferior frontal cortex: one decade on. *Trends in Cognitive Science*, 18, 177-185.
19. Durston S. et al. (2002). A neural basis for the development of inhibitory control. *Developmental Science*, 5, 9–16.
20. Aïte A., Cassotti M., Linzarini A., Osmont A., Houdé O., Borst G. (2018). Adolescents' inhibitory control: Keep it cool or lose control. *Developmental Science*, 21, e12491.
21. Casey B. J. (2015). Beyond simple models of self-control to circuit-based accounts of adolescent behavior. *Annual Review of Psychology*, 66, 295–319.
22. Steinberg L. (2008). A Social Neuroscience Perspective on Adolescent Risk-Taking. *Developmental Review*, 28(1), 78–106.
23. Booth J. R. et al. (2003). Neural development of selective attention and response inhibition. *NeuroImage*, 20, 737–751.
24. Liston C. et al. (2006). Frontostriatal microstructure modulates efficient recruitment of cognitive control. *Cerebral Cortex*, 16, 553–556.
25. Giedd J. N. et al. (2009). Anatomical brain magnetic resonance imaging of typically developing children and adolescents. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 48, 465–470.
26. Gogtay N. et al. (2004). Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 101, 8174–8179.
27. Klingberg T. et al. (1999). Myelination and organization of the frontal white matter in children: a diffusion tensor MRI study. *Neuroreport*, 10, 2817–2821
28. Diamond A., Ling D. S. (2016). Conclusions about interventions, programs, and approaches for improving executive functions that appear justified and those that, despite much hype, do not. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 18,

34–48.

29. D'Esposito M., Postle B. R. (2015). The cognitive neuroscience of working memory. *Annual Review of Psychology*, 66, 115–142.

30. Miller G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63, 81–97.

31. Kirchner W. K. (1958). Age differences in short-term retention of rapidly changing information. *Journal of Experimental Psychology*, 55, 352–358.

32. Kane M. J., Conway A. R. A., Miura T. K., Colflesh G. J. H (2007). Working memory, attention control, and the N-back task: a question of construct validity. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 33, 615–622.

33. *Ibid.*, Diamond, 2013.

34. Diamond A., Lee K. Interventions Shown to Aid Executive Function Development in Children 4-12 Years Old. *Science*, 333, 959–964.

35. Luna B., Padmanabhan A., O'Hearn, K. (2010). What has fMRI told us about the development of cognitive control through adolescence?. *Brain and Cognition*, 72, 101–113.

36. Casey B., Tottenham N., Liston C., Durston S. (2005). Imaging the developing brain: what have we learned about cognitive development?. *Trends in Cognitive Sciences*, 9, 104–110.

37. Satterthwaite T. D. et al. (2013). Functional maturation of the executive system during adolescence. *Journal of Neuroscience*, 33, 16249–16261.

38. Olesen P. J., Nagy Z., Westerberg H., Klingberg T. (2003). Combined analysis of DTI and fMRI data reveals a joint maturation of white and grey matter in a fronto-parietal network. *Cognitive Brain Research*, 18, 48–57.

39. *Ibid.*, Diamond, 2013.

40. Zelazo P. D., Frye D., Rapus T. (1996). An age-related dissociation between knowing rules and using them. *Cognitive Development*, 11, 37–63.

41. Jastrow J., *Fact and Fable in Psychology*, Houghton, Mifflin and Co, 1900.

42. Davidson M.C., Amso D., Anderson L.C., Diamond A. (2006). Development of cognitive control and executive functions from 4-13 years: Evidence from manipulations of memory, inhibition, and task switching. *Neuropsychologia*, 44, 2037 – 2078.

43. Diamond A., Kirkham N. Z. (2005). Not quite as grown-up as we like to think: parallels between cognition in childhood and adulthood. *Psychological Science*, 16, 291–297.

44. Crone E. A., Bunge S. A., Van Der Molen M. W., Ridderinkhof R. K. (2006). Switching between tasks and responses: A developmental study. *Developmental Science*, 9, 278–287.

45. Casey B. J., Caudle K. (2013). The Teenage Brain: Self Control. *Current Direction in Psychological Science*, 22, 82–87 ; Shulman E. P. et al. (2016). The dual systems model: Review, reappraisal, and reaffirmation. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 17, 103–117.

46. Bull R., Lee K. (2014). Executive functioning and mathematics achievement. *Child Development Perspectives*, 8, 36–41 ; Duncan G. J. et al. (2007). School readiness and later achievement. *Developmental Psychology*, 43, 1428–1446 ; Gathercole S. E. et al. (2004). The Structure of Working Memory From 4 to 15 Years of Age. *Developmental Psychology*, 40, 177–190.

47. Moffitt T. E. et al. (2011). A gradient of childhood self-control predicts health, wealth, and public safety. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108, 2693–2698.

48. Carlson S. M., Moses, L. J. (2013). Individual Differences in Inhibitory Control and Children's Theory of Mind. *Child Development*, 72, 1032–1053 ; Riggs N. R. et al. (2006). Executive function and the promotion of social-emotional competence. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 27, 300–309.

49. Piaget J., Inhelder B., *La psychologie de l'enfant*, PUF, 1966.

50. Case R. (1987). Neo-Piagetian theory: Retrospect and prospect. *International Journal of Psychology*, 22, 773–791.

51. Spelke E. S. (2000). Core knowledge. *American Psychologist*, 55, 1233–1243.

52. Houdé O., Borst G. (2014). Measuring inhibitory control in children and adults: Brain imaging and mental chronometry. *Frontiers in Developmental Psychology*, 5, 616.

53. Casey et al. (2011). Behavioral and neural correlates of delay of gratification 40 years later. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108, 14998–15003.

54. Moffitt T. E. et al. (2011). A gradient of childhood self-control predicts health, wealth, and public safety. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108, 2693–2698.

55. Carpendale J., Lewis C., *How children develop social understanding*, Blackwell Publishing, 2006.

56. Piaget J., Inhelder B., *The child's conception of space* (F. J. Langdon and J. L. Lunzer, trans.), Routledge and Kegan Paul, 1956.

57. Newcombe N. (1989). The development of spatial perspective taking. *Advances in Child Development and Behavior*, 22, 203–247.

58. Dumontheil I., Apperly I. A., Blakemore S.-J. (2010). Online usage of theory of mind continues to develop in late adolescence. *Developmental Science*, 13, 331–338.

59. Aïte A. et al. (2016). Taking a third-person perspective requires inhibitory control: Evidence from a developmental

negative priming study. *Child Development*, 87, 1825-1840.

60. Bull R., Espy K. A., Wiebe S. A. (2008). Short-term memory, working memory, and executive functioning in preschoolers: Longitudinal predictors of mathematical achievement at age 7 years. *Developmental Neuropsychology*, 33, 205-228.

61. Roell M., Viarouge A., Houdé O., Borst G. (2017). Inhibitory control and decimal number comparison in school-aged children. *Plos One* 12(11): e0188276 ; Lubin A., Rossi S., Lanoë C., Vidal J., Houdé O., Borst G. (2016) Expertise, inhibitory control and arithmetic word problems: A negative priming study in mathematics experts. *Learning & Instruction*, 45, 40-48 ; Lubin A., Vidal J., Lanoë C., Houdé O., Borst G. (2013). Inhibitory control is needed for the resolution of arithmetic word problems: A developmental negative priming study. *Journal of Educational Psychology*, 105, 701-708.

62. Ahr E., Houdé O., Borst G. (2016). Inhibition of the mirror-generalization process in reading in school-aged children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 145, 157-165 ; Borst G., Ahr E., Roell M., Houdé O. (2015). The cost of blocking the mirror-generalization process in reading: Evidence for the role of inhibitory control in discriminating letters with lateral mirror-image counterparts. *Psychonomic Bulletin & Review*, 22, 228-234 ; Brault Foisy L.-M., Ahr E., Masson S., Houdé O., Borst G. (2017). Is inhibitory control involved in discriminating pseudowords that contain the reversible letters b and d?. *Journal of Experimental Child Psychology*, 162, 259-267.

63. Lanoë C., Lubin A., Vidal, J., Houdé O., Borst G. (2016). Inhibitory control is needed to overcome written verb inflection errors: Evidence from a developmental negative priming study. *Cognitive Development*, 37, 18-27.

64. Stern E. (1993). What makes certain arithmetic word problems involving the comparison of sets so difficult for children?. *Journal of Educational Psychology*, 85, 7-23.

65. *Ibid.*, Lubin et al. 2013.

66. *Ibid.*, Lubin et al. 2016.

67. Ni Y., Zhou Y. D. (2005). Teaching and learning fraction and rational numbers: The origins and implications of whole number bias. *Educational Psychologist*, 40, 27-52.

68. *Ibid.*, Roell et al., 2017.

69. Cornell J. M. (1985). Spontaneous mirror-writing in children. *Canadian Journal of Psychology/Revue canadienne de psychologie*, 39, 174-179.

70. Davidson H. P. (1935). A study of the confusing letters b, d, p, and q. *Pedagogical Seminary and Journal of Genetic Psychology*, 42, 458-468.

71. Dehaene S., Cohen L. (2011). The unique role of the visual word form area in reading. *Trends in Cognitive Sciences*, 15, 254-262.

72. Dilks D. D., Julian J. B., Kubilius J., Spelke E. S., Kanwisher N. (2011). Mirror-image sensitivity and invariance in object and scene processing pathways. *Journal of Neuroscience*, 31, 11305-11312.

73. Totereau C., Barrouillet P., Fayol M. (1998). Overgeneralizations of number inflections in the learning of written French: the case of nouns and verbs. *British Journal of Developmental Psychology*, 16, 447-464.

74. *Ibid.*, Lanoë et al., 2016.

75. Houdé O., Borst G. (2014). Measuring inhibitory control in children and adults: Brain imaging and mental chronometry. *Frontiers in Developmental Psychology*, 5, 616.

76. Houdé O. et al. (2000). Shifting from the perceptual brain to the logical brain: The neural impact of cognitive inhibition training. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, 721-728.

77. Klingberg T. (2010). Training and plasticity of working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 14, 317-324.

78. Jaeggi S. M., Buschkuhl M., Jonides J., Shah P. (2011). Short- and long-term benefits of cognitive training. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 10081-10086.

79. *Ibid.*, Daimond, Ling, 2016.

80. Sala G., Gobet F. (2017). Working memory training in typically developing children: A meta-analysis of the available evidence. *Developmental Psychology*, 53, 671-685.

81. *Ibid.*, Rueda et al., 2005.

82. Karbach J., Kray J. (2009). How useful is executive control training? Age differences in near and far transfer of task-switching training. *Developmental Science*, 12, 978-990.

83. Flook L. et al. (2010). Effects of mindful awareness practices on executive functions in elementary school children. *Journal of Applied School Psychology*, 26, 70-95 ; voir aussi le focus de Christophe André sur la méditation, dans cet ouvrage.

84. <https://toolsofthemind.org/>

85. Lillard A., Else-Quest N. (2006). The early years. Evaluating Montessori education. *Science*, 313, 1893-1894.

86. *Ibid.*, Diamond, Lee, 2011.

Facteurs socioéconomiques et cerveau

par Teresa Iuculano

Les enquête PISA (*Program for International Student Assessment*) indiquent qu'en France si l'école est efficace pour la majorité de ses élèves, *plus on vient d'un milieu défavorisé, moins on a de chance de réussir* ! Il ne faut donc pas se voiler la face et essayer de comprendre certes sociologiquement, mais aussi neuroscientifiquement ce qui se passe dans le cerveau de ces élèves et pourquoi ?

Plasticité cérébrale et environnement de l'enfant

Quand l'environnement social (famille et école) est riche en stimulations, il favorise la plasticité cérébrale induite par les apprentissages de l'enfant, mais quand cet environnement est plus appauvri en stimulations, il peut avoir des conséquences néfastes pour le développement cognitif et la plasticité cérébrale – donc pour les acquisitions de l'enfant.

Il s'agit d'une réalité qu'on aime pas affronter sociologiquement – quoique Bourdieu l'ait fait ! – ni politiquement (au nom de l'égalitarisme). Mais scientifiquement, il ne faut rien se cacher et trouver les moyens d'agir. Les observations scientifiques réalisées dans des pays en voie de développement indiquent que grandir dans un milieu socioéconomique défavorisé peut hélas avoir des

conséquences négatives sur le développement comportemental, cognitif et cérébral car cela affecte notamment l'accès aux ressources pédagogiques, l'alimentation et/ou la santé¹.

L'impact du milieu sur le cerveau qui apprend

Les enfants de milieu défavorisé grandissent donc dans un environnement qui est non seulement souvent appauvri en stimulations (livres, jeux, activités culturelles, etc.) mais également instable et stressant, ce qui explique la prévalence élevée des troubles émotionnels, du stress, de l'anxiété et des troubles du sommeil dans cette population². Tous ces facteurs propres à ce type d'environnement ont des conséquences non négligeables et qu'on ne peut ignorer sur la maturation et la plasticité cérébrales, en particulier dans les aires des apprentissages cognitifs³ : l'hippocampe pour la mémorisation des connaissances en mémoire à long terme et le lobe frontal pour les fonctions exécutives (mémoire de travail, inhibition et flexibilité cognitive), ainsi que l'apprentissage de règles logiques.

Manque de stimulations et mauvaise alimentation

Les environnements qui permettent une stimulation cognitive de l'enfant régulière et intensive sont propices à la réussite scolaire. Une étude menée sur plus de 600 enfants révèle que des activités ludiques centrées sur les maths, initiées par les parents, peuvent avoir des effets bénéfiques sur le développement des compétences mathématiques de leurs enfants⁴. La moindre richesse cognitive de l'environnement familial pour les enfants de milieu socioéconomique défavorisé s'accompagne parfois d'une moindre richesse de l'environnement scolaire (classes surchargées et interactions individuelles avec le professeur moins fréquentes) qui affecte également le développement cérébral et les apprentissages. Si la richesse cognitive de l'environnement dans lequel grandit

l'enfant est critique pour son développement et ses apprentissages, la richesse émotionnelle est également un facteur très important. Les carences affectives, auxquelles peuvent être soumis les enfants issus de milieux défavorisés, peuvent entraîner des troubles du fonctionnement socioémotionnel de l'enfant par leur effet sur la maturation d'une structure sous-corticale du cerveau : l'amygdale⁵. L'amygdale est impliquée dans les apprentissages et plus particulièrement dans le maintien de la motivation et le plaisir d'apprendre. Ce sentiment de plaisir intellectuel semble être critique pour soutenir la motivation à s'engager dans une activité scolaire, particulièrement chez les enfants issus de milieux défavorisés.

Enfin, une mauvaise alimentation, voire la malnutrition, a également un effet négatif sur le développement et la plasticité cérébrales en privant le cerveau de nutriments importants pour la maturation des régions hippocampiques (mémoire), frontales (fonctions exécutives, raisonnement) et de l'amygdale (émotion), régions critiques pour les apprentissages de l'enfant. Par exemple, un déficit en fer, l'un des déficits en nutriments le plus fréquent, entraîne un déficit dans des activités qui sollicitent le cortex frontal et l'hippocampe⁶ en affectant notamment la prolifération cellulaire et la concentration de neurotransmetteurs dans ces régions. Enfin, un déficit en fer provoque une modification du taux de dopamine dans le circuit de la récompense et notamment au niveau de l'amygdale⁷. Les aptitudes cognitives de l'enfant sont également fortement dépendantes de carences potentielles en vitamines B6/B12 et en fibres.

Ainsi, un environnement appauvri cognitivement, émotionnellement et alimentaires peut avoir des effets importants, voire graves, pour le cerveau de l'enfant en développement. Néanmoins, des études de neurosciences chez l'animal sont prometteuses : l'enrichissement *a posteriori* de l'environnement dans lequel grandit l'animal permet de contrecarrer les effets néfastes de l'environnement initial. Bref, on peut toujours, potentiellement, corriger les choses par un aménagement pédagogique et éducatif.

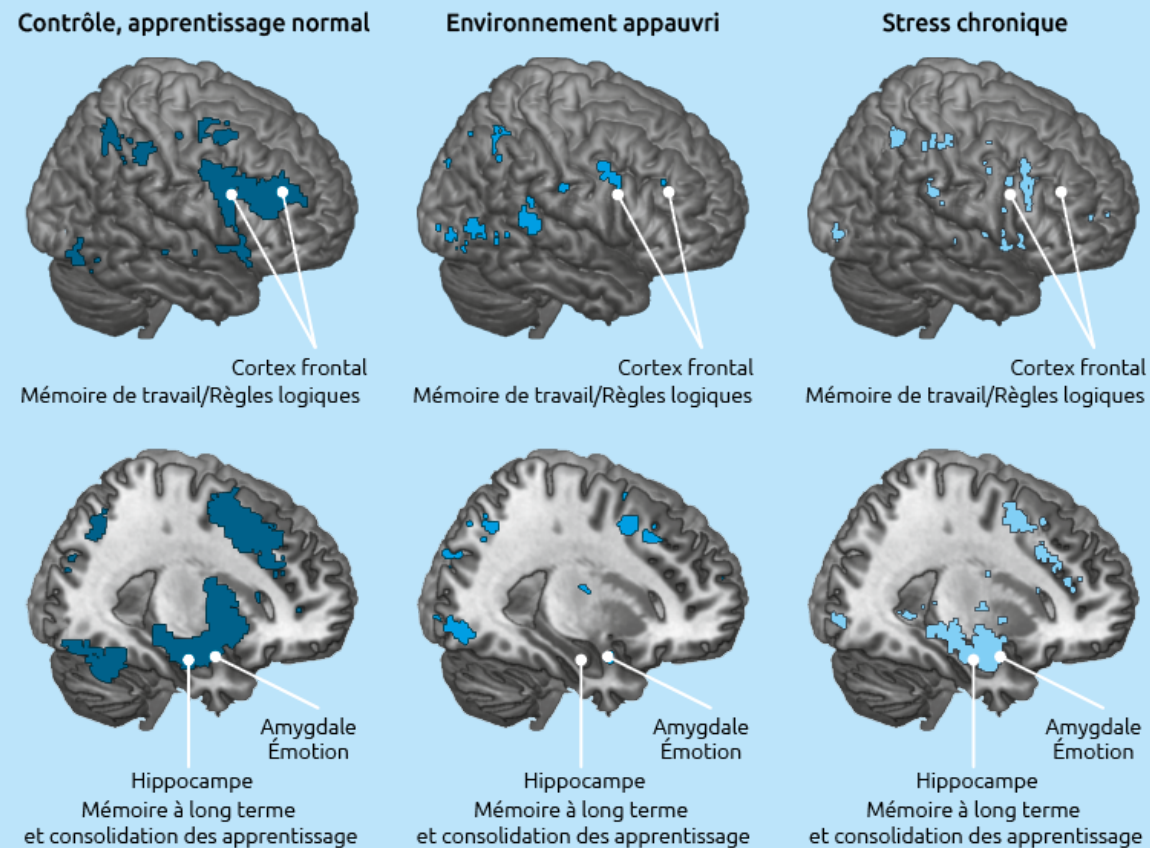
Stress et sommeil

Dans certains milieux défavorisés, les enfants sont statistiquement plus exposés à un stress chronique⁸. Une exposition à un stress environnemental pendant l'enfance altère le fonctionnement et la structure de l'hippocampe et des lobes frontaux⁹. Ces régions sont les plus impactées par le stress car elles possèdent avec l'amygdale de nombreux récepteurs au cortisol, l'hormone du stress, dont la concentration augmente alors dans l'organisme¹⁰. L'amygdale est engagée dans les apprentissages associatifs qui impliquent des émotions positives mais aussi négatives (peur/menace). Du fait de leur environnement stressant, les enfants de certains milieux défavorisés peuvent développer une sensibilité excessive pour certaines menaces sociales, ce qui peut entraîner un déficit de leur capacité à réguler leurs émotions, capacité importante dans tous les apprentissages, notamment à l'école. La réponse de l'amygdale est exacerbée suite à la présentation d'un visage menaçant chez ces enfants¹¹. Une hyper-activation de cette région est également observée – par transfert – chez des enfants particulièrement anxieux suite à la présentation d'un problème de mathématiques qui explique en partie leur difficulté à résoudre ce type de problèmes¹². Le sommeil affecte lui aussi le développement des régions du cerveau (hippocampe et lobes frontaux) impliquées dans les apprentissages scolaires. Le sommeil et notamment l'intégrité des cycles du sommeil sont un facteur critique de l'apprentissage car ils permettent la consolidation des connaissances en mémoire¹³. Le sommeil à ondes lentes est particulièrement important dans ce processus de consolidation, en particulier pendant l'enfance. Le sommeil des enfants grandissant dans des milieux défavorisés peut parfois être plus fragmenté du fait de l'environnement familial (travail de nuit, surpopulation dans le foyer, stress chronique)¹⁴. Ces enfants sont alors plus à risques d'avoir des difficultés d'apprentissage.

Des pistes de réflexion, d'intervention et de remédiation

Promouvoir des environnements familiaux et scolaires enrichis cognitivement, émotionnellement et nutritionnellement est un enjeu d'éducation publique pour combattre l'effet de la pauvreté sur le cerveau et ce avant même la naissance de l'enfant. Certaines études suggèrent que l'exposition chronique au stress au cours de la grossesse (cela peut aussi évidemment arriver dans un milieu dit « favorisé ») a un effet sur l'expression de certains gènes impliqués dans les propriétés des cellules nerveuses¹⁵. Bien que la pauvreté puisse avoir un effet sur le développement cérébral in utero, le cerveau est organe fantastiquement plastique et reconfigurable. Des interventions ciblées dans ces populations à risque dans la petite enfance peuvent efficacement compenser les effets délétères de l'environnement in-utero et ex-utero. C'est tout l'enjeu des recherches que nous menons au laboratoire dans lesquelles nous évaluons finement l'effet d'interventions en classe sur le cerveau (en IRM) et sur les comportements scolaires (suivi des progrès en classe) d'enfants issus de milieux défavorisés¹⁶. ●

Figure 1. Modifications des activations cérébrales au cours des apprentissages dans un groupe d'enfants tout venant (groupe contrôle), un groupe d'enfants grandissant dans un environnement appauvri, et un groupe d'enfants soumis à un stress chronique.



1. Walker S. P. et al. (2007). Child development: Risk factors for adverse outcomes in developing countries. *Lancet*, 369(9556), 145-157.
2. Matthews K. A., Gallo L. C. (2011). Psychological perspectives on pathways linking socioeconomic status and physical health. *Annual Review of Psychology*, 62, 502-530 ; Buckhalt J. A., El-Sheikh M., Keller P. (2007). Children's sleep and cognitive functioning: Race and socioeconomic status as moderators of effects. *Child Development Perspectives*, 78(1), 213-231.
3. Blair C., Raver C. C. (2016). Poverty, stress, and brain development: New directions for prevention and intervention. *Academic Pediatrics*, 16(3), 30-36.
4. Berkowitz T., Schaeffer M., Maloney E. (2015). Math at home adds up to achievement in school. *Science*, 350(6257), 196-198.
5. Merz E. C., Tottenham N., Noble K. G. (2017). Socioeconomic status, amygdala volume, and internalizing symptoms in children and adolescents. *Journal of Clinical Child & Adolescent Psychology*, 47(2), 312-323.
6. Lukowski A. F. et al. (2010). Iron deficiency in infancy and neurocognitive functioning at 19 years: evidence of long-term deficits in executive function and recognition memory. *Nutritional Neuroscience*, 13(2), 54-70.
7. Gianaros P. J. et al. (2008). Potential neural embedding of parental social standing. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 3(2), 91-96.
8. *Ibid.*, Matthews et al., 2011 ; Buckhalt et al., 2007.
9. *Ibid.*, Blair et al., 2016.

10. *Ibid.*, Blair et al., 2016.
11. *Ibid.*, Gianaros et al., 2008.
12. *Ibid.*, Berkowitz et al., 2015.
13. Diekelmann S., Born J. (2010). The memory function of sleep. *Nature Reviews Neuroscience*, 11, 114-126.
14. *Ibid.*, Buckhalt et al., 2007.
15. Hunter R. G. (2012). Epigenetic effects of stress and corticosteroids in the brain. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, 6(18).
16. Luculano T. et al. (2015). Cognitive tutoring induces widespread neuroplasticity and remediates brain function in children with mathematical learning disabilities. *Nature Communication*, 6, (8453).

La métacognition et l'auto-évaluation

Par Joëlle Proust

Apprendre à apprendre, tout le monde en convient, n'est pas seulement affaire de didactique disciplinaire. Il ne suffit pas d'être un bon mathématicien pour être un bon professeur. Transmettre un savoir suppose de *savoir comment communiquer* avec des élèves de manière *instructive et motivante*. L'apprentissage des mathématiques, ou de toute autre matière, suppose que l'élève s'engage dans des actions cognitives efficaces. Il ne suffit pas qu'un sujet au programme soit enseigné, pour que les actions cognitives nécessaires à l'apprentissage soient correctement sélectionnées et effectuées. De même que l'enseignant choisit ses gestes d'apprentissage, l'élève choisit (ou refuse) d'agir cognitivement, de répondre aux sollicitations d'attention et d'effort de la manière requise pour accomplir la tâche proposée. Il est essentiel pour l'enseignant comme pour l'élève de s'approprier de manière pratique et concrète sa part de l'activité cognitive partagée, et de comprendre ce qui en conditionne le succès. Calculer, résoudre un problème, retrouver un nom, les circonstances d'un événement, raisonner sur un texte, sont des exemples d'actions cognitives courantes. Elles mettent en jeu la métacognition, c'est-à-dire l'évaluation de la faisabilité, puis du succès de l'action. L'élève ne se lance pas dans un apprentissage sans se demander s'il vaut la peine de le faire. Son cerveau prépare la réponse : il prédit automatiquement l'effort requis, l'intérêt de l'activité, l'importance qu'elle a, et la possibilité d'y réussir. Ai-je envie de faire ce travail ? Est-ce que j'en suis capable ? Est-ce que ce type d'exercice

est « pour moi » ? La réponse à ces questions préalables est donnée par la perception de la tâche (par exemple par le sentiment de familiarité avec la tâche, ou le sentiment de pouvoir l'accomplir), mais aussi par l'idée que l'on a de soi – de sa personne et de son intelligence. D'autres sentiments sont ressentis au cours de l'action (comme le sentiment « de ne pas pouvoir y arriver ») ou quand l'action débouche sur un résultat (comme le sentiment d'avoir « trouvé la bonne réponse »). Ce que l'élève sait ou croit implicitement de la tâche, de l'école, etc. joue également un rôle dans la décision d'apprentissage. Ce chapitre vise à faire la part des sentiments et des connaissances dans la prédiction et l'évaluation des activités d'apprentissage, et à indiquer les pistes pédagogiques les plus efficaces pour motiver les élèves à apprendre.

I. Qu'est-ce que la métacognition ?

La métacognition est l'ensemble des processus, des pratiques et des connaissances permettant à chaque individu de contrôler et d'évaluer ses propres activités cognitives, c'est-à-dire de les réguler. L'activité cognitive, c'est simplement *tout ce que l'on fait* lorsque l'on pense. Activité cognitive, contrôle, évaluation, trois termes clés qui demandent des explications.

1 L'activité cognitive : automatique ou contrôlée

On peut trouver surprenant d'utiliser le terme de « faire » pour caractériser la pensée. On tend à associer le faire à une activité physique, au recours à des outils pour produire ou transformer des objets. Mais à y regarder de plus près, la vie mentale est un ensemble d'activités cognitives. Le désir de savoir ou de comprendre conduit à acquérir de l'information et à la manipuler. Cela ne veut pas dire que tout ce qui « nous passe par la tête » soit contrôlé et conservé en mémoire. La perception, la mémoire, le raisonnement,

ont une dimension *réceptive*. On peut percevoir sans avoir de but précis, apprendre « implicitement » – sans l’avoir tenté –, avoir des flashes mémoriels involontaires. Mais la perception, la mémoire et le raisonnement sont *contrôlés* par un but de connaissance : retrouver des faits, des noms, des recettes. L’essentiel de la vie mentale consiste à s’efforcer d’identifier, de reconnaître, d’apprendre, de résoudre des problèmes ou de rappeler des connaissances. La *métacognition* module ces efforts. Ce but vaut-il la peine d’être poursuivi ? La réponse que j’ai donnée est-elle la bonne ? En résumé, dépenser des ressources cognitives suppose qu’existe une motivation – atteindre un objectif représenté comme désirable, ou éviter une situation embarrassante ou une perte coûteuse.

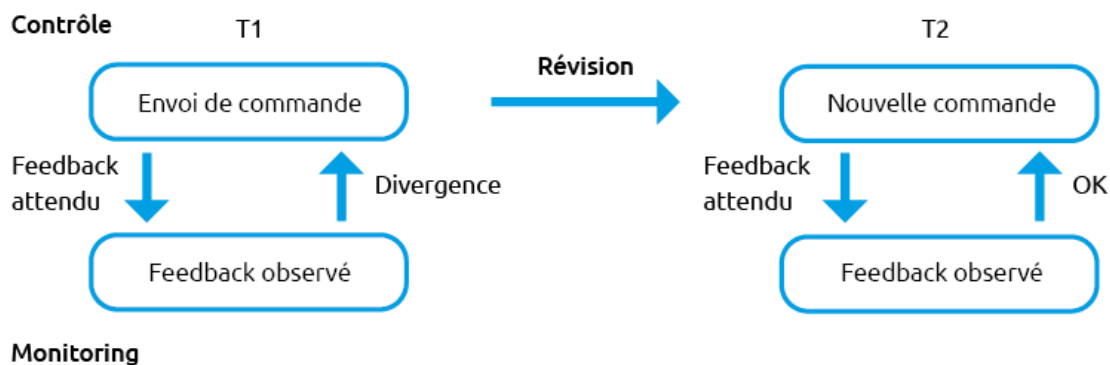
« Retenons cette polarité entre la motivation positive qui cherche à réaliser un but souhaité (pro-active), et la motivation négative qui cherche à éviter une pénalité (la motivation réactive). Ce contraste a des répercussions assez profondes dans le cas de l’effort d’apprendre. »

La métacognition intervient non seulement à titre préalable pour déterminer s’il faut ou non agir ; elle intervient aussi de manière rétrospective, pour renseigner le système sur la réalisation correcte de l’action. Dans les deux cas, prédiction ou évaluation, ce qui est estimé est la divergence entre le « feedback attendu » – ce que l’on s’attend à pouvoir faire (ou avoir réussi à faire) – et le « feedback observé ». Quand elle se produit, cette divergence donne lieu à un signal d’erreur suivi soit par l’abandon soit par la révision de l’action. S’il n’y a pas de divergence, l’agent effectue son action, ou en accepte le résultat.

Les cycles successifs de contrôle-monitoring-contrôle sont donc la base de toute l’activité cognitive. La succession au fil du temps

d'échanges d'information entre ordres donnés (commandes) et observations de progrès (feedback) est souvent schématiquement représentée par un fléchage entre deux niveaux, avec un niveau actif donneur d'ordre et un niveau subordonné pourvoyeur de rapports d'activité.

Figure 1. Les cycles contrôle-monitoring de la métacognition au fil du temps.



2 L'évaluation prédictive, première étape du contrôle

Intéressons-nous d'abord au feedback qui doit être utilisé pour estimer la faisabilité d'une action donnée¹. Avant de s'engager dans une action, c'est-à-dire de la sélectionner, l'esprit-cerveau estime l'effort à consentir pour la tâche envisagée, et évalue si un tel effort en vaut la peine. Cette évaluation porte donc sur quatre dimensions : 1. l'importance du but, 2. l'intérêt intrinsèque de l'activité, 3. l'effort probablement demandé par son accomplissement, 4. la probabilité de l'atteindre, étant donné les circonstances présentes.

Par « importance du but », il faut entendre le type de bénéfice qu'on attend de la tâche bien conduite. Il peut être moins important, par exemple, de se rappeler exactement la liste des courses à faire s'il s'agit de préparer son repas quotidien que s'il s'agit de préparer un repas de fête.

« Avant de s'engager dans une action, c'est-à-dire de la

sélectionner, l'esprit-cerveau estime l'effort à consentir pour la tâche envisagée, et évalue si un tel effort en vaut la peine. »

La sensibilité à l'intérêt intrinsèque de l'activité renvoie à la représentation qu'a l'agent, ici l'enfant, de l'attractivité de la tâche cognitive, qui, selon la tâche envisagée, varie de la curiosité et de l'envie de savoir à l'ennui et au refus d'apprendre². Les uns se passionnent pour la résolution de problèmes, les autres la fuient.

L'effort renvoie à l'ensemble de ressources cognitives qui seront engagées, par exemple en termes de temps d'exécution et de focalisation de l'attention. L'effort estimé donne lieu à un sentiment caractéristique.

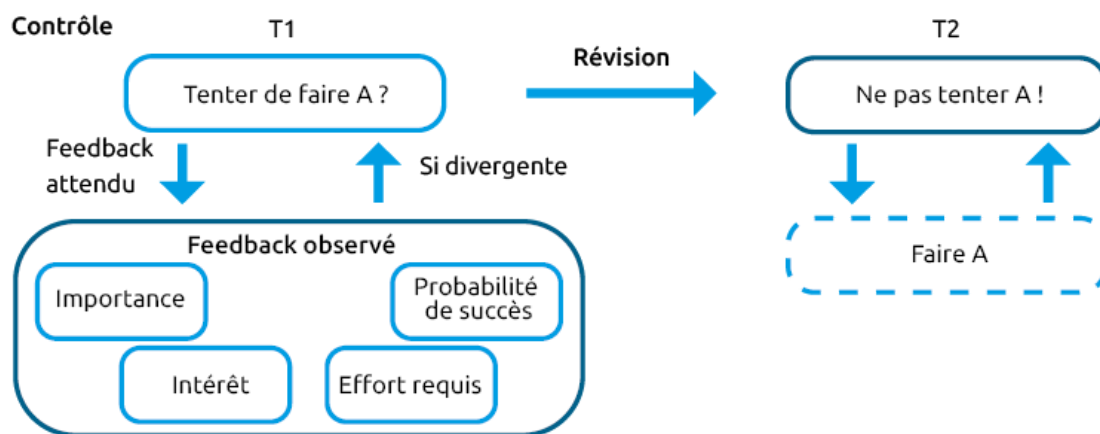
La prédiction de la probabilité de réussite se fonde sur l'expérience acquise dans l'activité. En l'absence d'expérience acquise, comme c'est le cas des jeunes enfants, les agents cognitifs sont typiquement sur-confiants, c'est-à-dire qu'ils ont peu ou pas de doutes sur le fait qu'ils vont réussir leur action³. Il est possible que la sur-confiance systématique des grands débutants ait une fonction adaptative, leur permettant de s'engager plus volontiers dans des tâches cognitives nouvelles⁴.

« Il peut valoir la peine de faire un gros effort si l'on s'estime être probablement en mesure d'atteindre son but. Sinon, il vaut mieux changer de but, c'est-à-dire remplacer la tâche difficile par une autre où l'on ne court pas le risque de l'échec. »

Cette évaluation IIES (Importance/Intérêt/Effort/Succès attendu) est *préliminaire* à toute action, qu'elle soit ou non cognitive ; son objectif est de former une estimation prédictive de *compromis*. Il peut valoir la peine de faire un gros effort si l'on s'estime être probablement en

mesure d'atteindre son but. Sinon, il vaut mieux changer de but, c'est-à-dire remplacer la tâche difficile par une autre où l'on ne court pas le risque de l'échec. Comment sait-on si le but envisagé peut ou non être atteint, dans la situation présente ? Cette prédiction, comme celle qui porte sur l'effort à fournir, dépend d'associations nommées « heuristiques », en l'occurrence inconsciemment formées, qui s'expriment par un sentiment métacognitif (cf. section III.2). Notons pour le moment que ces associations, et de manière générale, les sentiments métacognitifs qui sous-tendent l'évaluation, sont formés sur la base de l'expérience antérieure que le sujet a eue de la tâche considérée (ou de tâches similaires). Cette évaluation prédictive, rapidement opérée par le cerveau – en quelques secondes ou millisecondes selon l'urgence du but – induit l'envie d'agir, ou l'envie de changer de tâche⁵.

Figure 2. Préparation prédictive du contrôle : Importance/Intérêt/Effort/Succès Attendu.

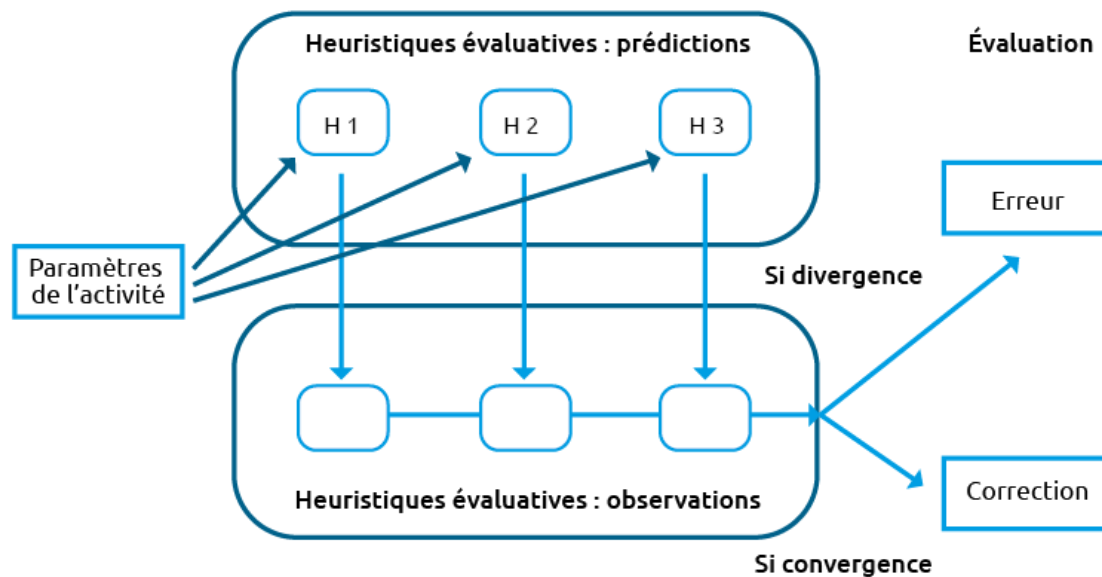


3 L'évaluation rétrospective de la réponse : le suivi (monitoring) de l'activité

Supposons que, sur la base de son évaluation prédictive, l'agent ait estimé que la tâche en valait la peine, et s'y soit engagé. Quelle que soit la tâche en question, l'agent doit savoir si son objectif a été finalement atteint. Une évaluation rétrospective, intervenant à la fin

de l'action (ou à la fin de chaque sous-étape), le renseigne sur ce point⁶. L'information qui sous-tend l'évaluation rétrospective ressemble à celle qui est utilisée pour décider d'agir cognitivement. Des prédictions inconscientes (nommées « heuristiques ») comparent la divergence éventuelle entre les caractéristiques du résultat obtenu avec les caractéristiques attendues. L'absence de divergence donne un sentiment d'action cognitive correctement accomplie, tandis que la détection d'une divergence produit un signal d'erreur.

Figure 3. L'évaluation rétrospective.



Si la réponse obtenue lui semble incorrecte, l'agent peut soit tenter de recommencer la tâche, en essayant de nouvelles stratégies, soit abandonner son but initial si ses évaluations prédictives IIES ne l'incitent pas à persévérer.

Pour essayer de nouvelles stratégies, il faut évidemment savoir qu'elles existent ou peuvent être acquises. L'acquisition d'un répertoire de stratégies transforme le sens même de l'erreur. De signal d'échec, l'erreur devient moment stratégique intégré à l'activité cognitive⁷.

4 Effets de l'évaluation rétrospective sur les futures évaluations prédictives

L'évaluation rétrospective conduit l'agent à former trois nouvelles anticipations qui moduleront à leur tour la confiance future de l'agent dans sa capacité de réussir les tâches du même genre (d'autres facteurs seront impliqués dans le cas des apprentissages spécifiquement scolaires, cf. sections III et IV) :

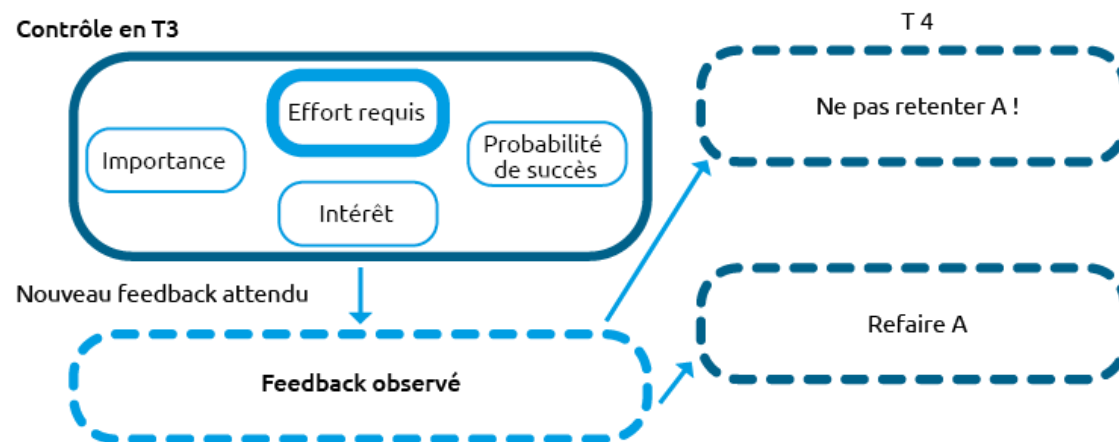
- **le sentiment de l'effort** que la tâche paraît maintenant exiger (par exemple, l'agent pense à une stratégie alternative, facile à mettre en œuvre, à laquelle il n'avait pas tout d'abord pensé).

- **la perception de la probabilité de réussite ultérieure** dans cette tâche (et d'autres du même genre). Si l'agent n'a pas de stratégie disponible, son estimation subjective de la probabilité de réussite tend à fléchir.

- **le sentiment d'efficacité personnelle** de l'agent, c'est-à-dire sa confiance dans sa propre capacité, en tant que personne donnée, à atteindre ses buts, dans le domaine considéré⁸. Le sentiment d'efficacité résulte de l'attribution de l'échec ou de la réussite dans l'action entreprise à sa propre incompétence ou compétence. Chaque nouveau succès dans un domaine tend à accroître le sentiment d'efficacité personnelle de l'agent dans ce domaine. De même, chaque erreur tend à le faire décroître. Comme nous le verrons dans la section III, le sentiment d'efficacité personnelle peut résister à l'échec si l'agent est préparé à l'interpréter comme une étape importante qu'il convient de bien gérer pour progresser vers son but.

Sur ces trois dimensions de l'influence de l'évaluation rétrospective, les stratégies alternatives interviennent à titre de modulateurs. Nous verrons qu'elles permettent, selon leur origine et leur fonction comportementale, soit d'accroître, soit d'anéantir la motivation d'apprendre.

Figure 4. Exemple d'influence de l'évaluation rétrospective négative sur les évaluations prédictives ultérieures : sentiment d'effort à la hausse, confiance dans la réussite à la baisse ; toutes choses égales par ailleurs, la motivation de refaire la tâche tend dans ce cas à baisser. Le feedback observé (par exemple l'apport de stratégies) peut toutefois apporter des raisons de refaire la tâche.



II. La métacognition à l'école : les controverses

La description de l'évolution du cycle « contrôle-suivi » de l'action cognitive s'applique à toutes les formes de la pensée contrôlée. La question qui se pose est de savoir si cette structure métacognitive de l'agir cognitif est pertinente pour l'école. Les chercheurs en sciences de l'éducation s'accordent aujourd'hui pour le penser. Ils diffèrent, cependant, dans leurs justifications et dans les recommandations pédagogiques qui en dérivent. Parmi les nombreuses propositions, trois types de réponses à la question méritent d'être examinées.

1 La métacognition est l'affaire de l'enseignant

La première réponse consiste à dire que la métacognition de l'élève n'est pas pertinente ; seule compte celle du professeur, qui assure le contrôle et le suivi de l'apprentissage de l'élève. Les professeurs, connaissant leur sujet, sont seuls capables de connaître les buts d'apprentissage. Les élèves doivent avoir confiance dans la sélection par le professeur de leurs buts d'apprentissage et s'y soumettre, en recueillant attentivement les contenus.

Ce qui rend cette proposition discutable est que la théorie selon laquelle « enseigner, c'est transférer ses connaissances » jouit d'une évidence trompeuse : elle repose sur une conception irrecevable de la mémoire. Qu'il s'agisse de faits historiques, de théorèmes mathématiques, ou de compréhension du langage, l'esprit apprenant ne « stocke » pas des connaissances, mais les encode, les construit, les révisé et les reconstruit en permanence. Plus techniquement, on dira qu'il forme des concepts, c'est-à-dire des ensembles sémantiques structurés, sur la base de symboles langagiers et d'images⁹. Dès la naissance, des associations implicites sont construites et généralisées, qui déterminent l'attention et l'action du bébé, et lui permettent de catégoriser les objets selon leur aspect et leur utilité respective. D'abord sensorimotrices, ces premières catégories sont la cible des apprentissages langagiers. L'école étend le champ d'application des concepts au-delà des routines quotidiennes. L'apprentissage conceptuel, couteux en ressources attentionnelles, requiert de la part de l'élève un engagement actif : non l'acceptation passive de la tâche en cours, mais la compréhension de ses enjeux d'apprentissage. La métaphore du transfert méconnaît cette condition essentielle de réussite de l'action pédagogique.

En outre, cette proposition méconnaît que les élèves ont leurs propres attentes sur la nature de l'apprendre et sur les objectifs à atteindre dans les tâches proposées. La métaphore du transfert des connaissances ignore les malentendus sur ce qu'il s'agit de faire en classe, et les sentiments d'infériorité ou d'incompétence qui font

obstacle aux acquisitions. Ces sentiments peuvent conduire nombre d'élèves à penser que l'effort cognitif demandé « n'est pas pour eux », et parfois à rejeter à la fois l'enseignement et la discipline scolaire.

2 La métacognition comme ensemble de connaissances sur la cognition

La deuxième réponse est venue des théoriciens de la métacognition de la première heure¹⁰. Ils ont cru qu'on pouvait enseigner la métacognition aux élèves comme on leur enseigne les autres contenus d'apprentissage. Ils ont proposé de leur expliquer comment fonctionne leur esprit, pour qu'ils puissent utiliser cette méta-connaissance pour réguler leur cognition. Ils ont tenté de catégoriser tous les types de connaissance qui pouvaient permettre aux élèves de mieux répartir leur effort et d'utiliser les stratégies de raisonnement adaptées à chaque cas¹¹.

« La pédagogie « métacognitivement informée » privilégie aujourd'hui l'expérience de l'apprenant en tant qu'agent de son apprentissage, en réservant l'exposé des stratégies métacognitives à des cas exceptionnels. »

Cette réponse s'est heurtée à plusieurs objections. Lors même que c'est entre 3 et 4 ans que l'activité cognitive se structure durablement, les connaissances concernées ne peuvent être enseignées aux jeunes enfants. Bien plus, John Flavell – l'un des pionniers de la recherche métacognitive – n'a pas réussi à démontrer que les capacités mémorielles de l'enfant seraient améliorées s'ils devenaient conscients des règles qui gouvernent la mémoire et la cognition. Les travaux ultérieurs inspirés par Flavell se sont centrés sur l'exploration des connaissances déclaratives des enfants portant

sur leur esprit. Ils ont bien montré que les jeunes enfants ne font guère la différence entre savoir et deviner, et sont persuadés d'avoir toujours su ce qu'ils viennent seulement d'apprendre¹². Ce n'est qu'au moment où ils deviennent capables d'attribuer à autrui des croyances fausses, soit vers cinq ans, que les enfants commencent à appliquer le mot de connaissance à bon escient¹³. Beaucoup de chercheurs en ont conclu que la métacognition dépendait de ce qu'on appelle la « théorie de l'esprit », c'est-à-dire de la capacité de prédire et d'expliquer les comportements d'autrui et les siens propres par un ensemble de désirs et de représentations (vraies ou fausses) de la situation considérée¹⁴. Or cette hypothèse a été réfutée par des arguments empiriques issus de diverses disciplines :

- Des travaux de primatologie ont montré que des *singes rhésus* (ainsi que d'autres espèces animales) sont capables de contrôler leur perception et leur mémoire. Ils peuvent par exemple tenter de se rappeler ce qu'ils ont vu, ou discriminer des nuages de points plus ou moins denses, et préférer s'abstenir quand ils sont dans la zone d'incertitude¹⁵. Comme ces animaux ne forment pas de théorie de l'esprit, (par exemple, ne peuvent pas interpréter les comportements en termes de représentations éventuellement fausses), il faut en conclure que la métacognition ne consiste pas seulement en connaissances portant sur l'esprit, mais dépend de prédictions formées inconsciemment¹⁶.

- Les tests non-verbaux utilisés en primatologie ont été utilisés pour étudier les mêmes capacités chez *des enfants de trois ans*, et démontré que, même si les enfants ne savent pas rapporter ce qu'ils savent ou ne savent pas, ils manifestent néanmoins leur sensibilité métacognitive dans leur décision d'agir cognitivement¹⁷. En d'autres termes, les jeunes enfants sont limités dans l'expression verbale de leur métacognition, mais non dans leur métacognition procédurale, c'est-à-dire dans le contrôle et le suivi de leurs actions cognitives.

- D'autres études développementales ont porté sur les enfants préverbaux de 12 à 18 mois. Les tout-petits s'avèrent ne demander

de l'aide par des gestes à leur entourage que lorsqu'ils ne disposent pas de l'information concernée¹⁸. Ils sont également capables d'évaluer rétrospectivement la correction de leurs jugements concernant l'emplacement d'un objet. L'exploration neuronale montre que le mécanisme de détection de l'erreur (ERN négative) est le même chez eux que chez l'adulte¹⁹.

Ces diverses recherches montrent que chez l'enfant humain, l'expérience métacognitive précède et rend possible l'attribution verbale de connaissances à soi-même et à autrui.

Sans avoir été eux-mêmes impliqués dans les travaux rappelés ci-dessus, beaucoup de chercheurs en sciences de l'éducation sont parvenus à des conclusions semblables²⁰. Ils ont observé que l'enseignement verbal de stratégies métacognitives entraine en compétition avec l'apprentissage cognitif. Au lieu de favoriser l'apprentissage, le rappel verbal de règles à suivre rend plus difficile la concentration sur la tâche de premier ordre²¹. L'appel à l'introspection, c'est-à-dire à l'observation de son esprit par l'apprenant, s'est avéré constituer une surcharge cognitive – voire un « cauchemar introspectif » pour l'élève²². La pédagogie « métacognitivement informée » privilégie aujourd'hui l'expérience de l'apprenant en tant qu'agent de son apprentissage, en réservant l'exposé des stratégies métacognitives à des cas exceptionnels. Nous examinerons dans le chapitre III.3 l'équilibre à trouver entre l'apprentissage explicite de stratégies cognitives et métacognitives, d'une part, et la régulation implicite liée à l'effectuation de la tâche, d'autre part.

3 La métacognition se forge dans des expériences affectives

La troisième réponse à la question de la pertinence de la métacognition pour l'école est que l'apprentissage scolaire ne peut être pleinement efficace que s'il s'appuie sur les expériences métacognitives des élèves, c'est-à-dire s'il les recrute et les

développe par des tâches appropriées. À la différence de la réponse précédente, l'activation de ces processus est affaire d'organisation d'activités motivantes et d'étayage approprié du processus d'apprentissage plutôt que d'enseignement théorique centré sur l'analyse de concepts (de connaissance, incertitude, vérité, etc.)²³. Une fois les expériences acquises, toutefois, la conceptualisation de l'expérience par des concepts s'insère naturellement dans la communication entre l'enseignant et l'élève. L'élève est alors en position de comprendre l'intérêt des stratégies cognitives qui lui sont proposées pour résoudre les difficultés rencontrées.

Cette réponse à la question du rôle de la métacognition dans l'apprentissage suppose une conception très différente des gestes pédagogiques qui s'offrent à l'enseignant en tant que médiateur de l'activité cognitive des élèves. Cette révision touche le rôle respectif des sentiments et affects, d'un côté, et des connaissances sur l'esprit ou sur les tâches à effectuer, de l'autre.

III. Métacognition procédurale et pédagogie

I L'apprentissage et ses affects

Les travaux d'Asher Koriath et son équipe ont révélé l'importance des sentiments engendrés par une activité cognitive (par exemple un problème de mathématiques). C'est un sentiment de difficulté qui motive la décision de traiter ou non le problème et module l'effort requis. C'est le sentiment de progresser qui pousse à persévérer. C'est le sentiment d'avoir obtenu un résultat correct qui conduit à arrêter l'effort²⁴. À ces sentiments « noétiques », (c'est-à-dire liés à l'acquisition de connaissance) centrés sur la tâche, viennent s'ajouter des sentiments d'efficacité personnelle centrés sur la personne de

l'agent dont nous reparlerons plus bas (III.4).

« C'est un sentiment de difficulté qui motive la décision de traiter ou non le problème et module l'effort requis. C'est le sentiment de progresser qui pousse à persévérer. »

Les sentiments noétiques sont produits par un calcul cérébral inconscient, qui s'effectue automatiquement pour évaluer les opportunités d'agir cognitivement et pour adapter la cognition individuelle aux difficultés rencontrées. Un tel calcul n'est possible que parce que des associations, appelées « heuristiques », ont été implicitement formées entre des paramètres de l'activité et le résultat obtenu. Les heuristiques permettent d'utiliser des indices pour prévoir ou pour évaluer le succès de la tâche en cours. C'est l'ampleur de la divergence entre indices attendus et observés qui donne lieu à des sentiments noétiques comme le sentiment de savoir ou le sentiment d'ignorer.

2 Heuristiques et sentiments métacognitifs

Les heuristiques qui président aux sentiments métacognitifs sont construites et mises en œuvre à l'insu de l'agent. Selon la métaphore aujourd'hui célèbre de la double-face proposée par Asher Koriat, les heuristiques sont « la face inconsciente » des sentiments métacognitifs conscients.

« Bien que les sentiments métacognitifs semblent faire partie intégrante de la métacognition consciente et explicite, ils sont en fait à double face : ils servent d'interface entre les processus automatiques implicites-inconscients d'une part, et les processus explicites-conscients-contrôlés d'autre part²⁵. »

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, les heuristiques qui forment l'envers inconscient des sentiments cognitifs tirent leurs indices non pas du contenu d'apprentissage, mais de son « véhicule », c'est-à-dire de la réalisation matérielle des opérations considérées, comme la rapidité avec laquelle elles sont traitées, ou l'ampleur de la réponse neuronale à une question donnée. Les sentiments auxquels elles donnent lieu ont un ressenti affectif, c'est-à-dire une valence de plaisir (comme le sentiment d'être dans le vrai) ou de déplaisir (comme le sentiment d'incertitude ou d'erreur). Parmi les heuristiques qui déterminent le sentiment de savoir, on peut citer l'heuristique de *fluence* – la rapidité d'une réponse prédit la correction²⁶ et la *cohérence* entre les représentations évoquées par une question²⁷. Plusieurs heuristiques peuvent se combiner, et donner lieu à un sentiment noétique unique qui intègre toutes les informations prédictives²⁸.

À l'heure où l'on découvre la capacité du cerveau statisticien à prédire tout ce qui peut l'être – ce qu'on appelle « le codage prédictif » -, la multiplicité des heuristiques prédictives qui gèrent le contrôle et le suivi de l'agir cognitif n'étonne plus aujourd'hui²⁹. Les sentiments noétiques forment, selon l'expression souvent employée dans la littérature, une « tribu » bigarrée³⁰. Dans une tâche de lecture, on distinguera le sentiment de fluence phonologique du sentiment de fluence conceptuelle ; le premier est lié à la facilité d'apparier un mot écrit à sa prononciation orale ; le second est le sentiment de comprendre l'enchaînement des significations d'un mot à l'autre. Dans un exercice de rappel mémoriel, on distinguera le sentiment prédictif de savoir ou de ne pas savoir comment répondre à une question, du sentiment rétrospectif d'avoir ou non retrouvé le « bon » terme, celui que l'on cherchait. Le sentiment de familiarité ou d'étrangeté, le sentiment de facilité, le sentiment de comprendre, la confiance dans sa perception, dans sa résolution de problème, la sensibilité à la beauté d'un poème ou d'un tableau, le sentiment de confusion, l'impression d'avoir un mot au bout de la langue,

complètent le tableau des heuristiques prédictives et de leur ressenti.

Zoom sur...

Exemple de métacognition procédurale prédictive

Illustrons l'expérience métacognitive prédictive par un apprentissage en cours de mathématiques de 4^e. Le professeur propose à la classe d'apprendre à former l'inverse d'un nombre (deux nombres sont inverses l'un de l'autre lorsque leur produit est égal à 1, par ex. $5 \rightarrow 1/5$). L'expérience noétique prédictive combine les évaluations IIES (cf. section I.2). L'élève ressent de façon plus ou moins vive l'*importance* qu'a pour lui cet apprentissage (lui servir à résoudre nombre de problèmes mathématiques), son *intérêt* (apprendre à multiplier les fractions). Ces ressentis, sources de plaisir, tendent à favoriser l'attention active et la disponibilité pour l'effort proposé. Mais ils ne sont pas suffisants. Même si l'élève trouve l'apprentissage potentiellement important et intéressant, l'implication dans l'apprentissage ne se produit que si l'élève sent qu'il peut « y arriver », c'est-à-dire a confiance de pouvoir effectuer la tâche. La facilité de traitement de l'apprentissage proposé joue un rôle dans la confiance de l'élève, mais aussi ses expériences antérieures, telles que le souvenir d'avoir « séché au tableau », avoir eu de mauvaises notes, ou simplement avoir entendu dire que « les filles sont nulles en maths ». Rassurer les élèves sur leurs propres aptitudes fait partie intégrante de l'enseignement.

« Adapter la difficulté de l'exercice à ce que l'apprenant sait déjà faire, trouver le bon compromis entre l'ennui de l'extrême fluence et l'incompréhension de la dysfluence, sont des objectifs fondamentaux du pédagogue. »

Les sentiments métacognitifs ont un rôle stratégique dans tout apprentissage : ils déterminent le niveau d'effort que l'élève va accepter de consacrer à la tâche, la maîtrise de son progrès dans la tâche, l'évaluation rétrospective de son succès, et la motivation finale pour prendre des décisions nouvelles : si le résultat est jugé satisfaisant, le mémoriser pour de nouveaux usages ; sinon, (si les circonstances sont propices) trouver une autre stratégie pour réussir la tâche. Que les circonstances soient propices, que les sentiments métacognitifs soient favorables à l'effort et à la persistance, dépendent en grande partie d'une planification adaptée des activités par le maître.

Adapter la difficulté de l'exercice à ce que l'apprenant sait déjà faire, trouver le bon compromis entre l'ennui de l'extrême fluence et l'incompréhension de la dysfluence, sont des objectifs fondamentaux du pédagogue. Les buts d'apprentissage évoluent au fil du temps en fonction de la « zone proximale de développement » des élèves, c'est-à-dire des nouveaux buts qu'ils peuvent atteindre, à l'aide du maître ou d'un autre élève plus avancé, étant donné les compétences qu'ils ont déjà acquises³¹.

Les buts de l'élève, on le sait, ne coïncident pas toujours avec les objectifs de l'enseignant. Le suivi par l'élève d'une action cognitive particulière dépend à son tour de ses propres objectifs – lesquels ne sont pas toujours explicites. L'enseignant a tout avantage à anticiper ces divergences possibles, afin de les identifier dès que possible. Le malentendu sur les objectifs risque de s'approfondir au fil du temps, et de créer des blocages parfois insurmontables.

3 Différentes formes d'attention

L'opacité des buts de l'apprenant est entretenue par le fait que la posture des élèves n'exprime pas la profondeur de leur engagement dans la tâche. Chi et Wylie ont étudié la relation entre différents types d'attention et performance ultérieure. Ils ont distingué quatre

types de buts attentionnels³². Quand l'attention est :

- passive, l'élève se borne à suivre ce qui est dit, ou du moins ce qu'il en comprend. Les connaissances restent atomiques et non intégrées ;
- active, l'élève manipule les contenus, prend des notes, relit ;
- constructive, l'élève reformule le contenu dans ses propres termes, établit des liens entre plusieurs concepts, etc. ;
- interactive, l'élève discute du matériel avec un pair, débat avec lui sur la valeur des arguments, etc.

Les auteurs montrent que la performance (l'acquisition de connaissances mesurée par un test) s'accroît très sensiblement de l'attention passive à l'attention interactive. Il existe une autre raison de privilégier les deux dernières formes d'attention : elles seules permettent à l'élève de transférer l'acquis à de nouveaux contextes, c'est-à-dire de généraliser son application, ce qui est évidemment capital.

Chaque niveau d'attention implique des formes différentes de contrôle et de suivi de l'activité cognitive. L'attention passive tend à donner lieu à des sentiments de facilité de traitement liés à la maîtrise d'un lexique. L'attention active prépare le passage de la fluence lexicale à la fluence conceptuelle : les sentiments de compréhension et de plaisir de découverte sont d'autant plus intenses que l'attention s'émancipe davantage du lexique proposé et devient constructive. Enfin, l'attention interactive, étant centrée sur la communication, met en jeu des évaluations métacognitives implicites de plausibilité, de cohérence, de pertinence et de justification rationnelle de ce qui est proposé par le partenaire, comme toutes les formes de communication structurée par un enjeu de connaissance.

En vertu même de leur définition, ces quatre formes d'attention sont mobilisées pour répondre à des objectifs d'acquisition et de consolidation des connaissances. Or ces buts, nommés « épistémiques », ne sont pas les seuls que les élèves (ou leurs

professeurs) peuvent former (ou encourager) dans le cadre de l'activité scolaire. Les élèves peuvent aussi chercher à être premiers de la classe, à minimiser les interactions avec les autres, à former des alliances ou à manifester leur indépendance. Certains de ces buts sont compatibles avec l'apprentissage et même susceptibles de lui fournir des motivations nouvelles. D'autres, en revanche, peuvent entraver, voire bloquer les apprentissages. Le champ de recherche appelé « métacognition située », ou « théorie sociocognitive de l'apprentissage », ouvert voici cinquante ans par Albert Bandura³³, s'intéresse à l'intrication entre les buts d'apprentissages avec d'autres buts, des croyances et des motivations relevant des contextes dans lesquels évoluent les élèves en classe et hors de l'école (cf. encadré sur la théorie sociocognitive de l'apprentissage).

La théorie sociocognitive de l'apprentissage

Selon Albert Bandura, tout apprentissage s'appuie sur l'influence *réciroque* de trois types de facteurs : *personnels* (comme la perception par l'apprenant de ses propres aptitudes et de leur nature), *environnementaux* (comme la qualité de l'enseignement, les relations entre la famille et l'école) et *comportementaux* (les apprentissages précédents, incluant la pratique d'activités périscolaires et la lecture). Comme ces trois types de facteurs s'influencent réciproquement, on peut s'attendre à ce que deux élèves de capacité cognitive équivalente apprennent plus ou moins bien en fonction (par exemple) de la qualité de l'enseignement, de la perception de leurs propres aptitudes, ou de leurs activités hors de l'école. Réciproquement, les apprentissages peuvent modifier la perception de soi ou de ses propres pratiques périscolaires, voire aussi les relations avec la famille et la motivation d'étudier. Cette théorie permet de mieux comprendre comment les buts épistémiques se ramifient et fusionnent avec d'autres buts (avec leur cortège d'expériences et d'anticipations) qui, quoiqu'ils ne visent pas directement l'apprentissage, sont pourtant très saillants dans les contextes sociaux qu'offre l'école. Cette théorie montre en outre, de manière très concrète, comment les croyances et les théories implicites de l'élève (sur la tâche et sur leur identité en tant que personne) interagissent avec les sentiments noétiques (d'effort, d'incertitude, etc., cf. section III.2) dans l'envie d'apprendre.

Exemple de métacognition procédurale rétrospective

Comment savoir si l'élève a bien compris un texte après l'avoir lu, qu'il s'agisse d'un article de journal (ou de l'énoncé d'un exercice mathématique) ? L'élève peut avoir un sentiment de compréhension illusoire s'il éprouve un sentiment de facilité lié à la lecture superficielle : retrouver dans le texte des mots familiers, (ou des symboles déjà utilisés) élève la confiance d'avoir compris ce qu'il y a à comprendre, lors même que la structure du texte, la hiérarchie des raisons (ou des opérations symboliques) n'ont en fait pas été repérées. Le niveau de compréhension adapté dépend de l'engagement dans l'activité de construction du sens. Comment aider l'élève à s'y engager, et à évaluer de manière autonome sa compréhension d'un texte ou d'une tâche ? Enseigner explicitement les « bonnes stratégies » divise l'attention de l'élève et ne favorise donc pas la compréhension. Il est souvent jugé préférable de construire l'attention sémantique par de bons gestes pédagogiques, en demandant à l'élève d'élaborer dans ses propres termes ce que veut dire au juste l'auteur (ou ce que requiert au juste l'exercice). Ce questionnement a pour effet d'étayer efficacement le développement de l'expérience de compréhension désirable³⁴.

4 Les buts d'apprentissage : maîtrise, performance, recherche du succès, évitement de l'échec

L'apprentissage scolaire est structuré par deux types de buts. Il peut être perçu soit comme la maîtrise progressive de connaissances (« but de maîtrise »), soit comme le moyen d'obtenir de bonnes performances relativement à celles des autres élèves (« but de performance »)³⁵. Les buts de maîtrise stimulent l'attention constructive, l'interprétation du feedback d'erreur comme un moyen de parfaire la compétence, et la disposition à coopérer avec d'autres élèves. Les objectifs de performance axent l'attention de l'élève sur

la reconnaissance sociale de ses propres capacités, sur la comparaison avec les autres et la compétition.

Chaque type de but est à son tour modulé par deux façons de positionner la motivation d'apprendre. Certains élèves recherchent le succès (*but de promotion*), d'autres cherchent à éviter l'échec (*but d'évitement*)³⁶. La section IV.1 exposera comment différentes théories de l'intelligence motivent différents types de buts. Le tableau ci-dessous montre les effets sur l'apprentissage du croisement d'un type de but (maîtrise ou performance) avec un type de motivation (promotion ou évitement). Les effets métacognitifs les plus positifs en terme de perception de l'intérêt de la tâche et d'engagement, d'attention constructive au feedback, de coopération, d'absence de stigmatisation et d'apprentissage réussi sont ceux des buts de maîtrise, en particulier en association avec la motivation de promotion³⁷.

Les buts d'apprentissage		
Type d'orientation ↗ Type de but ↘	Succès	Évitement de l'échec
Maitrise	Intérêt intrinsèque +++ Attention constructive +++ Feedback d'erreur recherché + et utilisé ++ Disposition à coopérer +++	Intérêt intrinsèque + Attention constructive + Feedback d'erreur recherché +++ et utilisé ++ Disposition à coopérer +
Performance	Intérêt extrinsèque + Disposition à exploiter autrui Disposition à tricher Compétition et rivalité	Faible motivation Procrastination Désorganisation Feedback non recherché Émotions négatives Autrui perçu comme une menace

Ce tableau présente les effets du choix stratégique par l'enseignant d'une motivation d'apprentissage positive (« promotion de but », centrée sur l'acquisition) ou négative (centrée sur l'évitement d'un échec, mauvaise note, etc.) sur le but poursuivi (acquisition des connaissances ou performance). + = faible effet ; ++ = effet moyen ; +++ = effet élevé. Les

effets non annotés d'un + sont des effets observés mais non mesurés dans leur amplitude respective.

Le but choisi par les élèves dépend en partie de la manière dont l'enseignant lui-même présente l'objectif des tâches proposées (obtenir une compétence ou réussir à un examen). Il dépend aussi du type d'évaluation qui est pratiqué. *L'évaluation formative* est faite pour servir les buts de maîtrise, parce qu'elle donne un feedback sur les objectifs d'apprentissage. Elle consiste à faire remarquer à l'élève sa progression vers le but et les obstacles rencontrés, et à lui proposer des stratégies pour les surmonter. L'évaluation formative stimule l'autorégulation autonome de l'élève. Il est généralement admis que, loin de s'exclure, l'évaluation sommative et l'évaluation formative apportent un éclairage complémentaire sur les progrès d'apprentissage de l'élève.

L'évaluation sommative va de pair avec les buts de performance. Elle consiste à noter le produit accompli par l'élève dans un test oral ou écrit en retirant des points en fonction du nombre et de la nature des erreurs commises, modulés par d'autres facteurs tels que l'application présumée de l'élève et l'investissement dans l'apprentissage. Elle a l'avantage de donner à l'élève et à ses parents un repère fortement attendu sur le niveau d'apprentissage atteint. Mais comme le montrent de nombreux travaux, ce repère n'est pas aussi objectif qu'il n'y paraît : la notation est influencée par divers stéréotypes sociaux ou génériques, indépendants de la réussite objective de l'élève³⁸. De plus, la calibration de l'évaluation sommative est notoirement peu fiable. Les notes données se distribuent autour du niveau moyen de la classe (c'est « l'effet-classe »)³⁹.

Du point de vue métacognitif, l'évaluation sommative détourne souvent l'attention des corrections proposées au profit de la signification sociale de la note. Noter les élèves et les hiérarchiser sur leurs résultats favorisent la compétition entre les élèves au détriment de leur solidarité et de leur coopération. En outre, la

mauvaise note répétée menace le sentiment d'efficacité personnelle et l'identité « de bon apprenant » au bénéfice d'identités sociales défavorables à l'apprentissage. Elle encourage la mise en place de stratégies d'évitement de l'échec comme l'auto-handicap (consacrer si peu d'attention aux tâches que les échecs ne puissent plus être attribués à un défaut d'intelligence), le décrochage, et la stigmatisation des bons élèves.

La variété des buts d'apprentissage est en liaison étroite avec les théories naïves des élèves portant sur l'identité personnelle et sur la nature de l'intelligence, c'est-à-dire sur les aspects conceptuels de la métacognition, dont traite la section sur la métacognition conceptuelle.

IV. Métacognition conceptuelle et pédagogie

La métacognition conceptuelle fait référence au rôle que jouent, dans le contrôle et le suivi de l'action cognitive, les connaissances et les croyances de l'agent cognitif concernant la tâche, sa propre compétence, ou les stratégies potentiellement applicables pour l'effectuer. On va voir que la métacognition conceptuelle peut, selon les cas, favoriser les apprentissages, ou leur faire obstacle.

I Représentation de la tâche, sentiment d'efficacité et théorie naïve de soi

Le niveau d'attention et d'effort consenti par les élèves pour une tâche donnée dépend d'un ensemble d'inférences qu'ils tirent de leur expérience scolaire, familiale, de leur appartenance sociale ou de leur genre. On se souvient que le sentiment d'efficacité personnelle (SEP) désigne non seulement la confiance de l'agent

dans sa propre capacité à atteindre son but, mais la valeur qu'il s'attribue en tant que personne, en tant que porteur de cette capacité (cf. section 1.4). Or la recherche montre que la représentation de soi-même qui est le support de l'attribution de valeur varie d'un contexte d'activité à l'autre⁴⁰. Selon la théorie identitaire de la motivation, l'identité saillante pour un contexte (scolaire, familial, amical, etc.) est celle qui favorise le sens le plus élevé de l'efficacité personnelle pour ce contexte. Il est ainsi possible de naviguer d'une identité à l'autre, ce dont tout un chacun fait d'ailleurs en permanence l'expérience : comme l'adulte, l'enfant apprend, dans chaque contexte, à se situer socialement par rapport à un groupe de référence, et d'en adopter le style, les valeurs, et les comportements dans ce contexte.

« Le niveau d'attention et d'effort consenti par les élèves pour une tâche donnée dépend d'un ensemble d'inférences qu'ils tirent de leur expérience scolaire, familiale, de leur appartenance sociale ou de leur genre. »

Voyons comment cela se traduit dans le contexte d'apprentissage. Pour tout élève, le cycle récurrent qui conduit d'une mauvaise (ou bonne) note à une baisse (ou hausse) de motivation à faire la tâche (cf. figures 1 et 3) impacte directement le sentiment de soi. Le SEP vient en outre amplifier l'effet démotivant (ou motivant) de l'évaluation.

Supposons qu'un élève soit confronté à un feedback négatif persistant, voire à des expériences humiliantes : échouer « au tableau », faire l'objet de moqueries de ses pairs, voire de l'ironie du professeur. La théorie identitaire de la motivation prédit alors qu'il serait incohérent pour l'apprenant de faire porter son effort sur une cible qu'il ne peut pas espérer atteindre. L'élève tend alors à rejeter

l'exercice ou la matière comme « *n'étant pas pour lui* », et reporter son effort sur d'autres identités où son sentiment d'efficacité personnelle pourra mieux s'épanouir : non plus celle de l'excellence scolaire, mais par exemple la popularité dans la classe ou sur Facebook, la compétence sportive ou artistique, ou la posture rebelle. La perception qu'ont ses parents de l'école fait partie des éléments pris en compte par l'élève qui décide de ce qui est « pour lui »⁴¹.

En résumé : selon la théorie de la motivation identitaire, ce n'est pas seulement la difficulté d'un exercice qui décide l'élève à l'accepter ou à le rejeter. Cette décision dépend de ce que le sentiment de difficulté signifie pour l'élève – et donc de sa représentation identitaire contextuellement dominante. Pour les uns, la difficulté signifie que la tâche est impossible, et n'est pas pour eux. Pour les autres, la tâche difficile est une tâche importante, un défi stimulant à relever⁴².

On sait par ailleurs, grâce à Pascal Huguet, que la menace stéréotypique attachée à une tâche modifie non seulement le sentiment de pouvoir l'effectuer, mais aussi les ressources cognitives disponibles pour la réussir. La présentation d'une tâche comme un exercice de géométrie abaisse le niveau de succès des filles, sensibles au stéréotype « les filles sont nulles en géométrie », mais non sa présentation comme un exercice de dessin. L'effet du stéréotype « les garçons sont mauvais en lecture » influence les garçons de la même manière, quand la tâche est présentée comme un exercice de lecture, plutôt que comme un jeu.

L'une des variables sous-jacentes au choix d'un but de promotion ou d'évitement et à la menace stéréotypique si durement ressentie a fait l'objet d'une attention particulière. C'est *la théorie implicite de l'intelligence personnelle* – c'est-à-dire l'ensemble de connaissances, croyances et prédictions tacites sur son propre intellect qui conduit l'élève à accepter ou rejeter un apprentissage. On doit à Carol Dweck la prise en compte de cette variable essentielle de l'engagement

scolaire.

2 Les théories implicites de l'intelligence : le mindset (l'état d'esprit préalable)

L'idée centrale de Carol Dweck⁴³ est que la signification que prend pour chaque élève la difficulté perçue de chaque activité est liée à sa théorie implicite de l'intelligence. Cette théorie est implicite parce que, comme toutes les théories naïves, elle n'est formée ni délibérément ni même consciemment. La théorie implicite de l'intelligence a deux formes. L'une considère les compétences intellectuelles ou disciplinaires comme des propriétés fixes et innées de la personne, l'autre comme le résultat flexible d'apprentissages antérieurs. Dans le premier cas, souvent sous l'influence des stéréotypes sociaux, l'élève s'attribue un niveau définitif et irrémédiable de compétence (comme : « *Je suis moyennement intelligent* », ou « *Je suis bonne en français mais nulle en maths* »). Dans ce cas, l'élève fait moins d'effort pour travailler s'il a de « mauvais » résultats dans une matière donnée. Il tend à restaurer l'estime de soi par comparaison avec d'autres élèves « moins bons » que lui. Même les meilleurs élèves, s'ils ont cette théorie de l'intelligence, préfèrent éviter les apprentissages difficiles pour ne pas risquer d'avoir à réviser à la baisse leur auto-attribution d'intelligence.

« En résumé, la théorie sociocognitive de l'apprentissage recommande une pédagogie bienveillante, favorisant l'expression du sentiment d'efficacité personnelle en rapport avec la tâche. »

Plutôt que de s'attaquer au fixisme, Carol Dweck propose de renforcer la conception incrémentale en centrant l'attention de l'élève sur l'expérience du progrès réalisé dans ses acquisitions. Avec l'appui de l'enseignant, l'élève devient attentif aux résultats de ses

efforts, voit l'erreur comme une condition de l'apprentissage, a des stratégies alternatives en cas d'échec, reçoit des encouragements quand il essaie de surmonter ses difficultés et de l'empathie pour chaque difficulté vaincue. Le commentaire de l'enseignant oral (ou écrit dans le carnet de notes) souligne les progrès de l'élève dans la période donnée, sans faire référence à des dons ni le comparer aux autres élèves. Cet ensemble de mesures mine de l'intérieur la théorie fixiste de l'intelligence (une croyance métacognitive) en l'exposant à des ressentis de l'élève qui en montrent l'inanité. L'expérience métacognitive de l'élève le conduit naturellement à former une théorie de l'intelligence plus appropriée à la flexibilité réelle de ses capacités.

En résumé, la théorie sociocognitive de l'apprentissage recommande une pédagogie bienveillante, favorisant l'expression du sentiment d'efficacité personnelle en rapport avec la tâche. Cette pédagogie vise à permettre à l'élève de juger que les tâches sont à sa portée, réalisables, et cohérentes avec son sentiment d'efficacité. Relèvent de cette pédagogie la mise en place des situations d'attention interactive – le travail en petits groupes de deux ou trois élèves –, l'ambiance scolaire coopérative et solidaire plutôt que compétitive et individualiste, l'évaluation « formative » plutôt que « sommative » et l'individualisation des objectifs d'apprentissage.

3 La place des stratégies dans la métacognition

Les stratégies cognitives sont des techniques de mémorisation, ou de résolution de problème qui font partie de l'enseignement d'une matière. *Les stratégies métacognitives* sont des techniques d'auto-régulation pour planifier l'apprentissage et surmonter les difficultés rencontrées. Ce sont des outils de révision des buts (ou des sous-buts) en présence d'une difficulté inattendue ou d'un feedback d'erreur : elles suggèrent comment choisir la meilleure stratégie cognitive dans une situation donnée (cf. chapitre d'Olivier Houdé

pour des exemples en mathématiques et en logique). Elles peuvent être soit acquises implicitement, par tâtonnements successifs, soit être explicitement enseignées⁴⁴.

Il existe trois types de stratégies métacognitives. *Les stratégies directives* visent à optimiser l'atteinte d'un but cognitif : on apprend plus en se testant soi-même, par exemple, qu'en relisant le matériel à mémoriser. *Les stratégies préventives* visent à se prémunir contre les illusions et les biais de raisonnement. Par exemple, le jugement sur ce que l'on sait est faussé s'il n'est pas formé dans un délai d'au moins 15 mn après l'apprentissage. *Les stratégies motivationnelles* visent à élever la conscience de l'importance d'un apprentissage, à voir l'erreur de manière constructive, entretenir une représentation flexible de sa propre intelligence etc.

Enseigner une stratégie a l'objectif de permettre à terme à l'élève de devenir autonome dans le choix des solutions possibles. Cet enseignement suppose que 1) l'apprenant se soit implicitement fixé un but de connaissance relatif à l'activité considérée⁴⁵, 2) il ou elle ait procédé à une évaluation rétrospective et 3) se soit senti en difficulté. Si ces trois conditions ne sont pas simultanément remplies, comme cela arrive pour des élèves très jeunes ou débutants, il est prématuré d'enseigner des stratégies ; il est plus judicieux de ne pas diviser l'attention de l'élève, en lui permettant de comprendre la nature de la tâche proposée et s'y engager activement. En outre, un contexte d'expérience de difficulté rend le besoin de stratégie plus sensible à l'élève.

Les théoriciens sont divisés, on l'a vu, sur le meilleur moyen de transmettre aux élèves les stratégies métacognitives⁴⁶. La tendance dominante consiste à insérer l'enseignement des stratégies, chaque fois que c'est possible, dans la présentation des exercices⁴⁷. Par exemple, l'enseignant modélise (en « pensant à voix haute ») les étapes de la réflexion qui permettent de résoudre un problème et les obstacles qu'elle doit écarter pour y parvenir.

Exemples de stratégies directives

Pour évaluer sa compréhension d'un texte/d'un matériel

- Résumer ce qu'on a lu ou appris après un délai permet de déterminer si l'on a compris le matériel d'apprentissage, à condition de procéder à ce résumé après un délai (pour court-circuiter le secours éventuel de la mémoire à court terme)⁴⁸.
- Générer des mots-clés après un délai reflétant les points importants d'un texte permet de mieux évaluer sa propre compréhension du matériel⁴⁹.
- En cas de difficulté de compréhension, demander de l'aide à l'enseignant ou à un pair.

Pour aider l'apprentissage

- Résumer le contenu en utilisant d'autres mots,
- Construire des schémas visuels des concepts,
- Prendre un point de vue critique sur l'origine de l'information,
- Analyser les conséquences de l'information⁵⁰.

Exemples de stratégies préventives

Un enseignement explicite est nécessaire pour que les élèves comprennent la généralité d'une illusion métacognitive donnée, et s'en prémunissent sur l'ensemble des activités cognitives concernées⁵¹.

- Distinguer la familiarité avec les mots d'un texte de la compréhension de ce texte⁵².
- Se demander non pas si l'on se souviendra du contenu à mémoriser mais si on l'oubliera, en se posant la question pour des intervalles temporels différents (à un jour, une semaine, un mois)⁵³.
- Repérer et prévenir les biais de confirmation qui conduisent à donner plus de poids aux informations cohérentes avec ses propres convictions (sans tenir compte de leur véracité) qu'aux autres⁵⁴.

– Le biais rétrospectif « Je l’ai toujours su » : Une fois une information obtenue, par exemple sur les conséquences d’un événement historique, les apprenants sous-estiment le caractère surprenant de l’information et tendent à juger qu’ils auraient pu la prédire. Ce biais diminue l’importance perçue de l’apprentissage⁵⁵.

Conclusion

Depuis un demi-siècle, les travaux sur la métacognition scolaire ont complexifié le schéma cybernétique de l’auto-régulation. En simplifiant beaucoup, on peut dire que l’auto-régulation scolaire consiste en boucles de boucles de boucles récursives (ou « ré-entrantes »). La première boucle est celle du contrôle et du monitoring de l’agir cognitif proprement dit : ce que l’on sait ou ne sait pas, ce que l’on comprend ou ne comprend pas, ce qui est intéressant ou non etc. La deuxième boucle évalue en permanence la confiance que l’on a dans sa réussite *en tant qu’agent*. La troisième choisit la personne apprenante que l’on choisit d’être, s’efforce de lui ressembler, détecte ses succès et ses échecs, et éventuellement change ses valeurs identitaires. La tâche ratée influe sur la confiance en soi, laquelle influe sur l’image de soi. Les représentations sociales, les stéréotypes, les certitudes ou incertitudes transmises sur sa propre place à l’école, la théorie de l’intelligence que l’on aura adoptée vont amplifier ou réduire, selon les cas, l’impact du succès ou de l’erreur à chaque niveau. Face à cette complexité, l’enseignant dispose maintenant d’outils d’intervention, qui sont centrés sur des apprenants actifs, ouverts aux savoirs et coopératifs.

Les Essentiels

- La métacognition est impliquée dans la décision de l'élève de s'engager dans une tâche et dans l'expérience de suivi de l'activité.
- L'effort que l'élève décide de consacrer à une tâche dépend d'une évaluation sur quatre dimensions :
 - L'importance perçue de l'apprentissage
 - L'intérêt intrinsèque de l'apprentissage
 - L'anticipation de l'effort requis
 - La probabilité de succès
- Le suivi de l'activité cognitive s'appuie sur des heuristiques inconscientes qui donnent lieu à des sentiments métacognitifs positifs ou négatifs.
- Les sentiments métacognitifs éprouvés pendant l'action élèvent (ou diminuent) la motivation ultérieure à apprendre et le sentiment d'efficacité personnelle.
- La conception implicite de l'intelligence malléable et le sentiment d'efficacité personnelle étant des conditions indispensables de la motivation d'apprendre, l'enseignant doit veiller à les étayer par des gestes pédagogiques appropriés, en particulier en soulignant l'apport essentiel de l'erreur comme étape de l'apprentissage.
- Il est parfois utile de fournir aux élèves des stratégies métacognitives, mais avec à propos et discernement. Il est par exemple souhaitable d'introduire une stratégie en réponse à une difficulté précise rencontrée par les élèves. Une bonne manière de l'introduire est de modéliser (en « pensant à voix haute ») l'usage de la stratégie en lien avec le problème rencontré.

1. Ce suivi du contrôle se distingue du suivi de l'activité. Voir Koriat A., Ma'ayan H., Nussinson R. (2006). The intricate relationships between monitoring and control in metacognition: Lessons for the cause-and-effect relation between subjective experience and behavior. *Journal of Experimental Psychology: General*, 135(1), 36-69.

2. Sur le rôle de l'intérêt dans la régulation de l'action cognitive, voir Atkinson R. C. (1972). Ingredients for a theory of instruction. *American Psychologist*, 27(10), 921-931.
3. Pour une revue de la littérature sur la sur-confiance chez l'enfant, voir Lockl K., Schneider W. (2007). Knowledge about the mind: Links between theory of mind and later metamemory. *Child Development*, 78(1), 148-167. Il est possible que la sur-confiance ait une fonction adaptative, permettant à l'enfant de s'engager plus volontiers dans des tâches cognitives nouvelles.
4. Dunlosky J., Metcalfe J., *Metacognition*, Sage publications, 2009, p. 248-249.
5. Sur les corrélats cérébraux de la métacognition : Fleming S. M., Dolan R.J., Frith C.D. (2012). Metacognition: computation, biology and function. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 367(1594), 1280-1286.
6. Une autre forme d'évaluation permet de déterminer, en cours de tâche, s'il vaut ou non la peine de la poursuivre. À quel moment, par exemple, doit-on cesser de chercher à résoudre un problème ? Nous n'aborderons pas ici, faute d'espace, les heuristiques inconscientes qui déterminent la motivation à poursuivre ou interrompre la tâche.
7. Sur les stratégies, voir section IV.
8. Bandura A., *Auto-efficacité. Le sentiment d'identité personnelle*, De Boeck supérieur, 2007.
9. Barsalou L. W., Simmons W. K., Barbey A. K., Wilson C. D. (2003). Grounding conceptual knowledge in modality-specific systems. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(2), 84-91.
10. Cross D. R., Paris S. G. (1988). Developmental and instructional analyses of children's metacognition and reading comprehension. *Journal of Educational Psychology*, 80(2), 131-142 ; Flavell J. H. (1979). Metacognition and cognitive monitoring: A new area of cognitive-developmental inquiry. *American Psychologist*, 34(10), 906-911 ; Paris S. G., Winograd P. (1990). How metacognition can promote academic learning and instruction. In Jones F., Idol L. (Eds.), *Dimensions of thinking and cognitive instruction*, Routledge, 1, p. 15-51 ; Schraw G., Crippen K. J., Hartley K. (2006). Promoting self-regulation in science education: Metacognition as part of a broader perspective on learning. *Research in Science Education*, 36(1-2), 111-139 ; Schraw G., Moshman D. (1995). Metacognitive theories. *Educational Psychology Review*, 7(4), 351-371.
11. Voir par exemple : White B. Y., Frederiksen J. R. (1998). Inquiry, modeling, and metacognition: Making science accessible to all students. *Cognition and Instruction*, 16(1), 3-118.
12. Gopnik A., Astington J.W. (1988). Children's understanding of representational change and its relation to the understanding of false belief and the appearance-reality distinction. *Child Development*, 59(1), 26-37.
13. Lockl K., Schneider W. (2007). Knowledge about the mind: Links between theory of mind and later metamemory. *Child Development*, 78(1), 148-167.
14. « La théorie de l'esprit » ou « *mindreading* » désigne la capacité d'interpréter les actions d'autrui et les siennes propres en termes d'états mentaux tels que croyances et désirs. Cette capacité apparaît, selon les régions du monde, entre quatre ans et demie et six ans. Kim S., Paulus M., Sodian B., Proust J. (2016). Young children's sensitivity to their own ignorance in informing others. *PLoS ONE*, 11(3), e0152595.
15. Pour une revue de la littérature : Proust J., *The philosophy of metacognition. Mental agency and self-awareness*, Oxford University Press, 2013, chap. 5.
16. L'analyse neuronale de l'activité des singes et des rongeurs révèle l'existence de profils d'activation caractéristiques prédisant le résultat de la tâche en cours, générateurs de sentiments d'incertitude. Kepecs A., Mainen Z. F. (2012). A computational framework for the study of confidence in humans and animals. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 367(1594), 1322-1337.
17. Balcomb F. K., Gerken L. (2008). Three-year-old children can access their own memory to guide responses on a visual matching task. *Developmental science*, 11(5), 750-760 ; Paulus M., Proust J., Sodian B. (2013). Examining implicit metacognition in 3.5-year-old children: an eye-tracking and pupillometric study. *Frontiers in Psychology*, 4(145) ; Bernard S., Proust J., Clément F. (2015). Procedural metacognition and false belief understanding in 3-to 5-year-old children. *PLoS ONE*, 10(10), e0141321 ; *Ibid.*, Kim et al., 2016.
18. Goupil L., Romand-Monnier M., Kouider S. (2016). Infants ask for help when they know they don't know. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(13), 3492-3496.
19. Goupil L., Kouider S. (2016). Behavioral and neural indices of metacognitive sensitivity in preverbal infants. *Current Biology* 26(22), 3038-3045.
20. Efklides A. (2006). Metacognition and affect: What can metacognitive experiences tell us about the learning process?. *Educational Research Review*, 1(1), 3-14.
21. Gavelek J. R., Raphael T. E. (1985). Metacognition, instruction, and the role of questioning activities. In Forrest-Pressley D. L., MacKinnon G. E., Gary Waller T. (Eds.), *Metacognition, Cognition, and Human Performance*, Academic Press, p. 129 ; Sinatra G. M., Brown K. J., Reynolds R. (2002). Implications of cognitive resource allocation for comprehension strategies instruction. In Block C. C., Pressley M. (Eds.), *Comprehension instruction: Research-based best practices*, Guilford ; Tobias S., Everson H.T. (2009). The importance of knowing what you know: A knowledge monitoring framework for studying metacognition in education. In Hacker D. J., Dunlosky J., Graesser A.C. (Eds.), *Handbook of metacognition in education*, Routledge, p. 107-127.
22. Pearson P. D., Dole J. A. (1987). Explicit comprehension instruction: A review of research and a new conceptualization of instruction. *The Elementary School Journal*, 88(2), 162.
23. Maki R. H., McGuire M. J. (2002). Metacognition for text: Findings and implications for education. In Perfect T.J., Schwartz B. (Eds.), *Applied metacognition*, Cambridge University Press, p. 15-38 ; Son L. K., Schwartz B. L. (2002). The

relation between metacognitive monitoring and control. In Perfect T.J., Schwartz B. (Eds.), *Applied metacognition*, Cambridge University Press, p. 15-38.

24. Sans parler des cas où l'on suspend son effort faute d'avoir le sentiment de progresser vers le but. Comme le montrent Koriat, Ma'ayan, Nussinson (*Ibid.*, 2006), les anticipations et les rétroactions se combinent pour moduler les jugements d'apprentissage, par exemple le sentiment de « savoir sa leçon ».

25. Koriat, A. (2000). The feeling of knowing: Some metatheoretical implications for consciousness and control. *Consciousness and Cognition*, 9(2), 149-171.

26. Kelley C. M., Lindsay D. S. (1993). Remembering mistaken for knowing: Ease of retrieval as a basis for confidence in answers to general knowledge questions. *Journal of Memory and Language*, 32(1), 1-24.

27. Koriat A. (2012). The self-consistency model of subjective confidence. *Psychological Review*, 119(1), 80.

28. D'autres heuristiques donnant lieu à des sentiments métacognitifs consistent dans la familiarité « indicielle » suscitée par le termes employés dans une question, l'accessibilité globale des informations pertinentes concernant la cible (Koriat A. (1993). How do we know that we know? The accessibility model of the feeling of knowing. *Psychological Review*, 100(4), 609-639), la dynamique neuronale de la présente tâche, comparée aux valeurs seuils précédemment observées (*Ibid.*, Kepecs, Mainen, 2012), les signaux interceptifs prédictifs des systèmes respiratoire, circulatoire, digestif et endocrinien (Barrett L. F., Simmons W. K. (2015). Interoceptive predictions in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 16(7), 419-429 ; Park H. D., Tallon-Baudry C. (2014). The neural subjective frame: from bodily signals to perceptual consciousness. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 369(1641), 20130208 ; Seth A. K. (2013). Interoceptive inference, emotion, and the embodied self. *Trends in Cognitive Sciences*, 17(11), 565-573) et l'heuristique posturale ou faciale (Stepper S., Strack F. (1993). Proprioceptive determinants of emotional and nonemotional feelings. *Journal of Personality and Social Psychology*, 64(2), 211-220 ; Eskenazi T., Montalan B., Jacquot A., Proust J., Grèzes J., Conty L. (2016). Social influence on metacognitive evaluations: The power of nonverbal cues. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 69(11), 2233-2247).

29. Voir le cours de Dehaene S. (2012), *Le cerveau statisticien : la révolution Bayésienne en sciences cognitives*, Collège de France.

30. Alter A. L., Oppenheimer D. M. (2009). Uniting the tribes of fluency to form a metacognitive. *Personality and Social Psychology Review*, 13(3), 219-235.

31. Selon le terme de Lev Vygotski, *Pensée et Langage*, Messidor, 1985, p. 270.

32. Chi M. T., Wylie R. (2014). The ICAP framework: Linking cognitive engagement to active learning outcomes. *Educational Psychologist*, 49(4), 219-243.

33. *Ibid.*, Bandura, 2007.

34. McKeown M.G., Beck I.L. (2009). The role of metacognition in understanding and supporting reading comprehension, In Hacker D.J., Dunlosky J., Graesser A.C. (Eds.), *Handbook of metacognition in education*, Routledge, p. 7-25.

35. Dweck C. S., Leggett E. L. (1988). A social-cognitive approach to motivation and personality. *Psychological Review*, 95(2), 256-273 ; Pintrich P. R. (2000). Multiple goals, multiple pathways: The role of goal orientation in learning and achievement. *Journal of Educational Psychology*, 92(3), 544-555.

36. Elliot A.J., Harackiewicz J.M. (1996). Approach and avoidance achievement goals and intrinsic motivation: A mediational analysis. *Journal of Personality and Social Psychology*, 70(3), 461-475.

37. Darnon C., Dompnier B., Delmas F., Pulfrey C., Butera F. (2009). Achievement goal promotion at university: Social desirability and social utility of mastery and performance goals. *Journal of Personality and Social Psychology*, 96(1), 119-134.

38. Kurtz-Costes B., Rowley S. J., Harris-Britt A., Woods T. A. (2008). Gender stereotypes about mathematics and science and self-perceptions of ability in late childhood and early adolescence. *Merrill-Palmer Quarterly*, 54(3), 386-409.

39. Bressoux P., Pansu P. (2001). Effet de contexte, valeur d'internalité et jugement scolaire. *L'Orientation scolaire et professionnelle*, 30(3).

40. Yan V. X., Oyserman D. (2018). The world as we see it. In Proust J., Fortier M. (Eds.), *Metacognitive diversity: An interdisciplinary approach*, Oxford University Press, p. 225-244.

41. Oyserman D., Brickman D., Rhodes M. (2007). School success, possible selves, and parent school involvement. *Family Relations*, 56(5), 479-489.

42. Huguet P., Regner I. (2007). Stereotype threat among schoolgirls in quasi-ordinary classroom circumstances. *Journal of Educational Psychology*, 99(3), 545-560.

43. Dweck C. S., *Changer d'état d'esprit. Une nouvelle psychologie de la réussite*, Mardaga, 2010.

44. Shrager J., Siegler R.S. (1998). SCADS: A model of children's strategy choices and strategy discoveries. *Psychological Science*, 9(5), 405-410.

45. Comme on l'a vu plus haut, les élèves peuvent se représenter la tâche de manière non épistémique (cf. section III.3). Par exemple, un jeune élève peut penser que son travail en mathématiques consiste à obtenir le résultat que le professeur attend, ou que son travail en géographie est de colorier les pays comme le demande le maître, sans comprendre que la couleur réfère, par exemple, à la démographie.

46. Winne P. H., Hadwin, A. F. (1998). Studying as self-regulated learning. In Hacker D. J., Dunlosky J., Graesser A. C. (Eds.), *Metacognition in educational theory and practice*, Lawrence Erlbaum Associates Publishers, p. 279-306.

47. Serra M. J., Metcalfe J. (2009). 15 Effective implementation of metacognition. In Hacker D. J., Dunlosky J., Graesser

A. C. (Eds.), *Handbook of metacognition in education*, 278-298.

48. Thiede K. W., Anderson M. C. (2003). Summarizing can improve metacomprehension accuracy. *Contemporary Educational Psychology*, 28(2), 129-160.

49. Thiede K. W., Dunlosky J., Griffin T. D., Wiley J. (2005). Understanding the delayed-keyword effect on metacomprehension accuracy. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 31(6), 1267-1280.

50. Jonassen D. H. (2000). Toward a design theory of problem solving. *Educational Technology Research and Development*, 48(4), 63-85.

51. Finn B. (2008). Framing effects on metacognitive monitoring and control. *Memory & Cognition*, 36(4), 813-821.

52. Glenberg A. M., Sanocki T., Epstein W., Morris C. (1987). Enhancing calibration of comprehension. *Journal of Experimental Psychology: General*, 116(2), 119-136.

53. Koriat A., Bjork R.A., Sheffer L., Bar S. K. (2004). Predicting one's own forgetting: the role of experience-based and theory-based processes. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133(4), 643-656.

54. Kahneman D., *Les deux vitesses de la pensée*, Flammarion, 2012.

55. Fischhoff B. (1977). Perceived informativeness of facts. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 3(2), 349-358.

focus

Les émotions, les sentiments et l'éducation

par Antonio Damasio et Hanna Damasio

Pourquoi est-il important pour les professeurs des écoles et les éducateurs en général de comprendre le monde affectif et ses acteurs-clés – les motivations, les émotions et les sentiments – ainsi que la biologie qui les sous-tend ?

Le soutien et l'arbitrage de l'affect dans le cerveau

Premièrement, parce que la difficile et noble tâche de l'éducation consiste à guider le développement de l'esprit humain de telle sorte qu'il puisse s'adapter à la réalité sociale et physique qui l'entoure, ainsi que préserver la dignité individuelle, parvenir au bien-être et à la créativité, tout en s'abstenant d'empiéter sur la dignité, le bien-être et le potentiel créatif des autres. Il n'est pas possible d'atteindre ces objectifs sans le soutien et l'arbitrage de l'affect. Deuxièmement, parce que le guidage – *via* des zones paralimbiques du cerveau comme le cortex préfrontal ventromédian (CPVM) – et l'ajustement des esprits en développement requièrent une négociation constante entre (a) les processus habituellement décrits comme « intellectuels » ou « cognitifs » – tels que la perception, l'apprentissage, le raisonnement, le calcul, la traduction de faits et d'idées en mots et phrases (le langage) et (b) les processus de

l'affect qui impulsent les esprits, inconsciemment ou non, à agir de certaines façons.

Les processus de l'affect ne sont pas du tout moins importants que ceux de l'intellect et de la cognition dans le cerveau¹ ! Ils sont simplement très différents du point de vue de leur origine biologique et de ce qu'ils accomplissent. Pour l'essentiel, les processus affectifs classifient toutes les actions et les pensées en termes de récompenses (*rewards* en anglais) ou de punitions (*punishments*) pour le cerveau, c'est-à-dire de plaisir ou de désagrément. Il existe ainsi un circuit cérébral chimique dit « de la récompense » (ou de la motivation), situé au centre du cerveau et dont le principal neurotransmetteur est la dopamine.

Les actions spontanées des enfants sont d'abord stimulées par l'affect, sous forme de motivations, d'envies et de réactions émotionnelles de base (joie, surprise, peur, colère ou tristesse). C'est le subtil et délicat travail de l'enseignant, en classe, que de modifier les réactions, attitudes et réponses humaines de telle manière à ce qu'elles puissent être adaptées à l'environnement scolaire et s'accommoder à ses exigences, tout en satisfaisant simultanément, dans une certaine mesure, le *besoin* exprimé par l'affect spontané de l'élève.

Vous noterez l'accent mis ici sur le mot de besoin. C'est le concept-clé à aborder à ce stade. Il s'avère que les motivations et les émotions – les « réponses émotionnelles » pour faire court – sont les dispositifs critiques, vitaux, par lesquels la biologie des organismes complexes *prend connaissance de* et intègre l'homéostasie (le terme technique pour la régulation de la vie) et ses missions indispensables, qui sont, pour un individu, de se maintenir en vie le plus longtemps possible et de se projeter dans le futur. L'émotion est nécessaire à la survie car, en son absence, les organismes cesseraient de se procurer l'énergie utile à leur métabolisme, ne se défendraient pas correctement, et par conséquent, périraient.

Le besoin de l'enfant est aussi en arrière-plan de la partie de l'affect

humain qui lui permet d'expérimenter mentalement, subjectivement, dans son cerveau l'état de son propre organisme (le corps) lorsque celui-ci s'engage dans une émotion donnée. C'est l'univers tout aussi important des *sentiments* (*feelings* en anglais) ou représentations, cartographies, des émotions corporelles dans le cerveau². Notez que tout le corps est représenté dans le cerveau par des images ou cartes précises au niveau du cortex somatosensoriel, à la jonction du lobe pariétal et du lobe frontal, qui informent les sentiments. Les émotions corporelles sont aussi transmises *via* le tronc cérébral et le lobe limbique ; le lobe de l'insula rend en particulier conscient du corps lorsqu'on a mal.

Ne pas confondre émotion et sentiment

L'affect ne s'arrête pas à l'émotivité automatique. Il continue comme un sentiment éprouvé – depuis la douleur et la souffrance jusqu'au bien-être et au plaisir – dans le cerveau de l'enfant. L'homéostasie et la notion de besoin nous aident à comprendre le statut particulier des sentiments. Leur univers est clairement distinct de celui des émotions car les sentiments sont des événements mentaux privés, tandis que les émotions sont des collections d'actions physiques, exécutées par un organisme vivant (*via* les viscères, le cœur et le cerveau) en différentes situations. Beaucoup d'émotions ne sont pas privées. Elles sont publiques, actées par la musculature du visage et des membres du corps, et exprimées irrésistiblement dans les mimiques, la voix et la posture.

En vertu de leur statut intrinsèquement conscient, les sentiments (ou représentations des émotions) informent l'esprit, en termes non équivoques, des besoins critiques de l'organisme et de ce que la régulation automatique de l'organisme est en train de faire pour ces besoins. Les sentiments sont la perception consciente de notre « musique intérieure », le portrait de ce qui se passe dans le corps. Mais il y a plus à signaler ici. Les sentiments ouvrent également la

possibilité de répondre à ces besoins en connaissance de cause et intentionnellement. Ils permettent de décider, grâce au cortex préfrontal à l'avant du cerveau, ce qu'il faut faire ensuite et comment le faire. Il faut donc apprendre aux enfants à bien éprouver et formuler leurs sentiments, pour mieux se connaître eux-mêmes et utiliser ces derniers, accessibles à leur conscience, dans une démarche auto-réflexive, de « métacognition affective » à l'école. En pédagogie, les sentiments les plus fréquents sont la peur de se tromper, le doute (très lié au cortex cingulaire antérieur, CCA), la curiosité, l'envie et le plaisir d'apprendre (ou l'inverse), etc.

Il est important de noter ici que les avantages ultimes du sentiment découlent d'une collaboration avec l'intellect, c'est-à-dire d'un partenariat avec la connaissance et la raison. Les sentiments nous renseignent sur nos besoins, mais l'intellect (la cognition) nous permet de choisir ou d'inventer (*via* le cortex préfrontal) la façon la plus intelligente de satisfaire ces besoins. L'édifice des systèmes moraux a été construit, par et pour la société, sur la base de ce partenariat entre sentiments et intellect. L'enseignement moral et civique à l'école mobilise les deux dans le cerveau, au-delà des émotions automatiques et inconscientes.

La distinction entre l'émotivité et la capacité à ressentir un sentiment, qui est si marquée quand on considère la nature des deux processus, est tout aussi marquée quand on découvre que les deux ensembles de phénomènes (les émotions et les sentiments), dépendent de régions très différentes du système nerveux, central et périphérique³. L'émotion et le sentiment sont traités par des régions du cerveau largement séparées (très limbiques pour l'émotion et plus paralimbiques et frontales pour le sentiment), mais connectées et en étroite coopération avec le reste de l'organisme.

L'éducation est, à son niveau le plus essentiel, l'apprentissage des pratiques et stratégies qui permettent aux enfants, puis aux adultes, de répondre aux besoins de la vie, biologique et culturelle – cela de la façon la plus efficiente et la plus compatible socialement, *via* un

noyau de règles et de droits fondamentaux partagés par tous les cerveaux du monde. C'est l'homéostasie, individuelle et collective, qui, finalement, domine toujours le monde des êtres vivants, *via* les besoins, les émotions (issues du corps), les sentiments et leur recours à l'intellect – dont l'apprentissage cognitif – dans le cerveau.



1. Damasio A., *L'erreur de Descartes. La raison des émotions*, Odile Jacob, 1995 ; *L'ordre étrange des choses. La vie, les sentiments et la fabrique de la culture*, Odile Jacob, 2017.
2. Damasio A., *Le sentiment même de soi. Corps, émotion, conscience*, Odile Jacob, 1999 ; *L'Autre moi-même. Les nouvelles cartes du cerveau, de la conscience et des émotions*, Odile Jacob, 2010.
3. Damasio A., Carvalho G. (2013). The nature of feelings: Evolutionary and neurobiological origins. *Nature Reviews Neuroscience*, 14, 143-152.

Les cogni'classes

par Jean-Luc Berthier

Créé par l'organisation « Apprendre et former avec les sciences cognitives » (site sciences-cognitives.fr) le concept de *cogni'classe* se définit comme un groupe d'enseignants qui, autour d'une classe, expérimente des modalités pédagogiques inspirées par les sciences cognitives et du cerveau.

L'organisation invite simplement toute nouvelle *cogni'classe* qui nous rejoint librement à se déclarer en présentant un projet. Ce qui nous permet d'en suivre l'évolution. À la parution de cet ouvrage, nous comptons environ 300 *cogni'classes*, sur plus de 150 sites scolaires, conduites par un millier d'enseignants, en France et au-delà.

Une *cogni'classe* n'est pas une révolution pédagogique, c'est la mise en œuvre de pratiques dont plusieurs étaient déjà explorées par des enseignants, mais remises à l'épreuve, revisitées, rendues plus efficaces, et partagées pour « ébranler les routines » à la lumière des sciences cognitives. D'autres pratiques en revanche apportent une réelle innovation, en épousant les savoirs apportés par la science, soit parce qu'elles étaient jusqu'à ce jour ignorées dans la classe, soit parce que des découvertes viennent bouleverser le regard sur la pédagogie. Les enseignants impliqués dans cette dynamique nous disent que leur métier a changé, qu'ils sont portés par un esprit d'expérimentation, que des progrès sont constatés chez les élèves, et qu'ils ne reviendront pas en arrière.

Dans une première partie, nous exposerons le contexte d'émergence des *cogni'classes* : au carrefour de défaillances du système scolaire français qui

sait former de brillantes élites mais laisse sur le bord du chemin de trop nombreux jeunes, d'un socle de savoirs sur la cognition de l'apprenant sur lequel on peut désormais s'appuyer avec fiabilité, d'une quête grandissante, comme on l'a rarement rencontrée chez les enseignants, de la façon renouvelée de pratiquer leur métier, enfin sur la vague déferlante du numérique dont il convient de s'interroger sur la pertinence de sa contribution.

Nous expliciterons le projet *cogni'classe*, l'esprit et l'éthique dans lesquels il se construit, les conditions favorisantes de sa réussite, les objectifs attendus, les axes majeurs de ses applications pédagogiques concrètes et à la portée de tout enseignant. En insistant sur le fait qu'il ne s'agit pas d'un modèle mais d'une démarche collective d'innovation et d'expérimentation.

Dans une deuxième partie, nous développerons les quatre axes sur lesquels sont bâties les dizaines de pistes pédagogiques que les enseignants peuvent mettre en œuvre. La mémorisation surtout, dont l'importance est immense non seulement pour acquérir le stock de savoirs et de références essentielles pour devenir un citoyen éclairé et autonome, mais aussi pour comprendre et traiter les tâches complexes qui l'attendent. La compréhension qui lui est associée. L'attention, premier critère de réussite scolaire et dans la vie.

L'implication active enfin, clé d'un apprentissage impliquant et efficace.

La réussite d'un projet *cogni'classe* repose sur la mise en œuvre conjointe de plusieurs paramètres : la formation tant des adultes que des élèves, dont les modalités doivent changer pour être au plus près du concept

d'établissement-apprenant, au sein même de celui-ci par stages collectifs et inter-formation entre collègues ; l'accompagnement des projets ; le management de l'établissement et le rôle stratégique des personnels de direction qui ouvrent au thème, accompagnent, favorisent et régulent, et d'inspection qui se muent progressivement en ingénieurs visionnaires de la pédagogie. C'est ce que nous présentons dans la troisième partie.

Puis sont détaillées dans la quatrième partie de nombreuses, mais non exhaustives pistes pédagogiques. Les *cogni'classes*, c'est le terrain de la classe visité par les sciences cognitives, le pas franchi entre le savoir théorique et la pratique pédagogique, le fameux gap entre « le labo et la classe ». Autour des axes précédemment cités il est présenté plus de trente

pistes qui respectent et concrétisent les apports théoriques dans la pédagogie. Ces pistes ne sont pas toutes révolutionnaires évidemment, mais leur familiarité demande à être interrogée pour atteindre un plus haut niveau d'efficacité. Elles sont toutes mises en œuvre dans nos *cogni'classes*. Leur liste ne cesse de s'allonger.

I. Les grands principes des *cogni'classes*

1 Le contexte d'émergence des *cogni'classes*

En 2013, notre équipe « Apprendre et former avec les sciences cognitives », constituée d'enseignants, de formateurs académiques, de jeunes chercheurs en sciences cognitives et de personnels d'encadrement, décidait de s'appuyer sur quatre axes majeurs de l'activité cognitive du cerveau en milieu scolaire qui font consensus chez les experts, et d'en tester l'application dans la pratique, assimilée à une sorte d'expérimentation. Ce sont les *cogni'classes*, environ 300 à ce jour. Ces axes sont la mémorisation, la compréhension, l'attention et l'implication active de l'élève. Avec en filigrane les questions autour de l'évaluation et la place des outils numériques.

« L'esprit des *cogni'classes*, c'est un mélange d'audace professionnelle, beaucoup de curiosité, l'envie de faire bouger le système, avec un sens très fort de la collaboration avec les collègues et la conviction que les compétences se cisèlent lentement mais continument et avec détermination. »

Cette aventure professionnelle a un prix. Celui d'entrer dans le

monde de la connaissance des mécanismes cérébraux de l'apprentissage. Avec curiosité, souvent exaltation intellectuelle, et rigueur en choisissant avec exigence les références de lecture. Celui de devenir des artisans de la mise à l'épreuve de techniques nouvelles, avec l'humilité d'accepter de se tromper, de quitter la sécurité des habitudes que l'on croyait les meilleures. D'oser la différence avec l'avant, avec les collègues, avec les représentations que parents ou responsables de l'éducation peuvent porter sur la façon d'enseigner. Parfois d'affronter des regards d'élèves peu habitués à apprendre autrement.

L'esprit des *cogni'classes*, c'est un mélange d'audace professionnelle, beaucoup de curiosité, l'envie de faire bouger le système, avec un sens très fort de la collaboration avec les collègues et la conviction que les compétences se cisèlent lentement mais continuent et avec détermination. Le savoir sur la cognition, incarné dans la classe, c'est le début d'une très longue, irréversible et passionnante aventure. L'évolution du monde et de la connaissance s'accélère. Chaque enseignant, responsable du système scolaire, élève et parent sont convoqués, chacun à sa mesure pour contribuer à cette évolution. Pour optimiser la réussite, gommer l'insupportable fracture scolaire, adapter la pédagogie en tenant compte des spécificités des élèves, développer le bien-être des élèves à l'école.

La réalité est sévère. L'expérience montre que ce sont les élèves les plus adaptés au système scolaire qui bénéficient aux mieux des pratiques préconisées. Serait-ce à dire que l'écart se creuse encore ? Pas sûr ! Dans les valeurs fondamentales et humanistes qui portent le projet des *cogni'classes*, il y a cet ardent espoir que l'élève faible ou en difficulté puisse franchir des étapes de l'apprentissage qu'il n'aurait pas franchies auparavant, qu'il acquière cette conviction de posséder un capital neuronal lui permettant de monter des marches de la progression scolaire, de satisfaire aux exigences de l'école. Loin de nous l'idée naïve de penser que la plasticité cérébrale est un concept magique autorisant la réussite absolue pour tous. Mais en

creux, le but est de limiter les échecs, bannir un monde qui ne serait pas fait pour certains, les acculant au mur du rejet scolaire.

À ce jour, des centaines voire des milliers d'enseignants s'engagent dans la démarche de centaines de *cogni'classes*, certains modestement et d'autres plus amplement. Rarement seuls, plutôt en équipes autour de classes. Sur la base d'un projet, avec un souci de régulation, d'observations extrêmement utiles. Car nous avons besoin de collectes massives de résultats pour tirer des conclusions significatives.

Mais qui sont les acteurs des *cogni'classes* ? Vers quelles pistes s'engagent-ils concrètement ? Comment s'optimisent les changements de leurs pratiques ? Les effets constatés sont-ils au rendez-vous des espoirs ? Quelles conditions de mises en œuvre sont favorisantes ? C'est à ces questions que l'exposé qui suit va tenter de répondre.

Les motivations des enseignants de *cogni'classes*

L'intérêt porté par les centaines – presque milliers – d'enseignants qui se sont portés volontaires, et dont le nombre ne cesse de croître, s'explique en partie par les raisons suivantes :

- La préoccupation de ne pas parvenir aussi bien qu'il serait souhaitable à l'acquisition d'un socle solide de connaissances et de compétences par chaque élève, lui permettant de franchir au mieux les échelons de la scolarité, du premier degré au diplôme du plus haut niveau possible ;
- Le sentiment, corrélé par les résultats d'enquêtes internationales, et partagé par de nombreux élèves, d'une école où l'ennui et le malaise ont trop souvent leur place ;
- Le constat d'une difficulté scolaire récurrente à l'origine de la fracture insupportable entraînant le décrochage d'un nombre trop important d'élèves ;
- L'insuffisante préparation des élèves aux compétences psycho-sociales si précieuses pour vivre et travailler ensemble, permettant de s'adapter aux attentes du monde de demain ;
- Le désarroi quant à la place des applications numériques dans et hors de la classe, et dont la foison déroute.

2 Pratiques basées sur les preuves scientifiques, ou preuves constatées par la pratique ?

Rien ne serait plus risqué que d'engager les enseignants sur des pistes fondées sur des arguments hypothétiques, des intuitions mal adaptées, et des routines non réfléchies. Nombre d'enseignants enseignent comme ils ont été enseignés. Est-ce pour autant le gage d'une efficacité garantie ? Pas si sûr. Ne s'est-on pas doucement écarté de ce que propose, dans un consensus croissant, la communauté des chercheurs sur la cognition ? Si on ne peut nier

l'incontestable apport positif de décennies de pratiques et d'intelligence professionnelle qui ont fait leur preuve, il n'est plus raisonnable ni même acceptable d'ignorer les idées-clés sur les mécanismes cognitifs et cérébraux de l'apprentissage, celles qui font consensus à ce jour. L'esprit dans lequel fonctionnent les *cogni'classes* respecte avec une haute exigence, pour ne pas dire une éthique, le périmètre de ce que l'on peut s'autoriser à mettre en œuvre. Il est en revanche des domaines dans lesquels nous ne nous hasardons pas, comme les dys, les précoces et les troubles de l'attention et de l'apprentissage.

L'apport des connaissances invite, soit à améliorer des pratiques qui ont fait leurs preuves, telles que les pédagogies actives avec toute la réserve et la pertinence qui s'imposent, soit à initier des pistes jusqu'à présent peu usitées comme le développement des capacités de l'attention, soit enfin à repenser des manières habituelles de faire qui étaient à contre-courant de ce que nous dit la science, par exemple autour de la mémorisation.

« L'enseignant n'est pas un chercheur fondamental, il n'en a ni le temps, ni l'expertise, ni les moyens. En revanche, il peut devenir un observateur aiguisé de ses pratiques aux confins de la recherche expérimentale. »

Le passage de la théorie à la classe reste très problématique. Combien d'études validées par les chercheurs ne conduisent pas aux résultats espérés ! Cet espace-temps de la réalité complexe conjugue un nombre tel de paramètres que la science ne peut les prendre en compte simultanément dans les études en laboratoire. D'où l'écart parfois considérable entre les résultats scientifiques et les effets observés. Dans un esprit raisonnable et pragmatique, aussi respectueux que possible de celui de la science, notre démarche empirique est de proposer aux enseignants un tronc commun de pistes s'appuyant sur des connaissances fiables, et de les décliner

dans des contextes aussi divers que les niveaux scolaires, les personnalités et compétences des enseignants, les filières d'enseignement, les paramètres socioculturels et les formes de gouvernance des établissements. Puis d'en collecter les observations tant sur les élèves que dans la façon de les mettre en œuvre.

L'enseignant n'est pas un chercheur fondamental, il n'en a ni le temps, ni l'expertise, ni les moyens. En revanche, il peut devenir un observateur aiguisé de ses pratiques aux confins de la recherche expérimentale. C'est ce à quoi nous l'invitons, dans un but d'amélioration constante, en écartant la tentation d'abandonner trop tôt une pratique insuffisamment testée ou maîtrisée.

En conclusion, pas d'engagement sur des pistes dont le fondement théorique ne serait pas scientifiquement validé, se placer en praticien expérimentateur et observateur, sans prise de risque vis-à-vis des élèves qui ne sont pas des cobayes, et contribuer à une vaste collecte de données obtenues dans des contextes variés.

Les principaux objectifs des *cogni'classes*

L'irruption récente des sciences cognitives dans la façon de penser le métier d'enseignant produit un choc certain, porteur d'ouverture et d'espoir. Nous avons lancé les *cogni'classes* avec plusieurs objectifs :

- Sensibiliser les enseignants aux apports théoriques des sciences cognitives, et leur faire s'approprier des modalités pédagogiques innovantes, parfois déjà connues de certains, mais revisitées et cohérentes avec les résultats de la science.
- Modifier la représentation qu'ils ont de leur métier en les rendant acteurs-expérimentateurs de ces modalités, afin de nourrir les observations sur le difficile passage de la théorie à la classe, et dans toute la diversité des situations ;
- Leur proposer de mettre en route plusieurs pistes pédagogiques, cohérentes entre elles, le plus souvent dans le prolongement de leurs compétences, mais sans idée d'un modèle identique d'une classe à l'autre ;
- Induire une autre forme de gouvernance pour l'établissement, laissant une plus large place à la collaboration et à la formation et revisitant l'implication pédagogique des personnels d'encadrement ;
- L'ensemble ayant pour but de pratiquer une pédagogie aussi proche que possible de ce que l'on sait du fonctionnement du cerveau apprenant, au service de la performance d'apprentissage pour tous les élèves, du bien-vivre en classe et de la préparation au monde de demain.

3 Pratiques professionnelles bousculées des enseignants

Tous les enseignants impliqués dans des *cogni'classes* en témoignent. L'introduction de pratiques nouvelles inspirées par les sciences cognitives bouscule la représentation qu'ils ont du métier. De transmetteurs en face-à-face ils se repositionnent davantage en

côte-à-côte parmi leurs élèves, de praticiens mus par des routines professionnelles éprouvées, ils introduisent du doute dans leur efficacité et se hasardent à l'expérimentation, de maîtres détenteurs absolus d'un savoir, ils associent les élèves comme complices d'innovations pédagogiques et s'autorisent au droit à l'erreur.

Rien n'est moins simple pour un adulte exposé aux contraintes du système, au regard sans complaisance de ses élèves, et parfois davantage de ses collègues, de changer ses pratiques, de sortir du rang des schémas traditionnels, d'oser engager d'autres enseignants dans des aventures innovantes. Et si l'innovation allait à l'encontre des connaissances théoriques, et si elle était risquée d'erreur, et si elle n'était pas aussi efficace qu'on est en mesure de l'espérer, et si elle engageait un coût excessif de mise en œuvre ? Soyons honnêtes, nos collègues expérimentateurs des *cogni'classes* prennent des risques et la tâche se révèle parfois ardue. Mais avouons-le aussi, le jeu en vaut l'audace, très peu abandonnent, la plupart « mordent » aux sciences cognitives, happés par un vent enthousiaste de curiosité et d'ardeur à ébranler le système au plus grand bénéfice des élèves et d'eux-mêmes. Ils veulent en savoir plus, explorer, tester.

4 Un projet d'équipe

Faire équipe autour d'un projet aussi collectif que possible est l'une des conditions de la réussite d'une *cogni'classe*. Les pistes proposées, dont la liste que nous proposons ci-après, sont loin d'être exhaustives et ont comme point commun d'être multidisciplinaires. C'est le même cerveau apprenant qui s'active dans les différentes disciplines, le même qui mémorise et qui oublie, qui tente de comprendre, qui organise ses pensées et gère sa réflexion, qui construit son attention et régule ses mauvais réflexes. En cela une *cogni'classe* diffère des projets classiques thématiques. Elle engage les enseignants dans une révision de leurs représentations du métier, dans d'autres manières de le pratiquer.

Si de nombreuses pratiques appartiennent déjà au fond de l'histoire de la pédagogie et sont usuelles, en revanche, elles demandent à être réinterrogées. Il ne s'agit pas répétons-le, d'une révolution mais d'une évolution. D'autres en revanche sont nouvelles – voire contre-intuitives – et brisent les routines professionnelles. En cela le projet collectif est une condition indispensable de leur diffusion.

Tout d'abord vis-à-vis des élèves. Comment les convaincre de changer leur façon d'apprendre bien ancrée depuis plusieurs années, tant en classe qu'en dehors, sinon en leur expliquant les raisons profondes qui les sous-tendent, et surtout en les mettant en œuvre au nom d'une équipe. Il en va de la crédibilité de la démarche : convaincre à plusieurs, autour d'une dynamique cohérente est beaucoup plus efficace qu'isolément.

Vis-à-vis de la direction et des collègues. Présenter un projet collectif, soigneusement construit, lui confère une meilleure réception, un poids certain, qui va naturellement rayonner dans l'établissement. En aucun cas, il ne s'agit de faire des émules, laissant à chacun le soin d'avancer comme il le souhaite. Mais d'avancer ensemble autour d'arguments cohérents et convergents, d'induire le changement par la preuve.

Vis-à-vis de partenaires et d'instances extérieures dont le rôle peut se révéler stratégique pour l'évolution du système : corps d'inspection, cellules académiques d'innovation, CARDIE, autres établissements du bassin d'éducation, médias.

Enfin vis-à-vis des parents soucieux que leurs enfants ne soient en aucun cas confondus avec des cobayes. Expliquer et rassurer est tellement plus facile à plusieurs.

Il serait maladroit, contre-productif, voire erroné, d'enfermer un projet de *cogni'classe* dans un modèle à suivre, un format unique à respecter. Son socle repose toutefois sur un ensemble d'axes pédagogiques tous liés aux apports des sciences cognitives et retenus par notre équipe dans le périmètre : mémorisation, compréhension, attention, implication, avec une marge de

déclinaisons relatives aux compétences possédées par les enseignants. Ils vont les prolonger, les affiner, les partager. Rappelons qu'il s'agit davantage d'expérimenter, que d'appliquer mécaniquement des modalités et recettes.

« Aucune des *cogni'classes* que nous suivons n'est restée campée sur son projet initial, car la réalité rencontrée n'est jamais celle prévue. Des résultats, des déceptions, mais aussi des surprises, des voies inattendues. »

À travers un projet pensé, écrit et négocié par les enseignants : quelles pistes, quelles mises en œuvre, quelle coordination d'ensemble, quel calendrier tenir au cours des semaines et des mois, quels modes de concertation et de régulation. Un projet précis, levant les malentendus, présentable à la direction, éventuellement à d'autres interlocuteurs.

Un projet évolutif. Aucune des *cogni'classes* que nous suivons n'est restée campée sur son projet initial, car la réalité rencontrée n'est jamais celle prévue. Des résultats, des déceptions, mais aussi des surprises, des voies inattendues. D'où le principe de la régulation, outil de fonctionnement indispensable.

La dynamique en croissance exponentielle des *cogni'classes*

Depuis plusieurs années d'existence de notre équipe « Apprendre et former avec les sciences cognitives », des enseignants seuls et le plus souvent réunis autour de classes ont souhaité concrétiser leur désir de mettre en œuvre des pratiques pédagogiques adaptées. Ainsi est né le concept de *cogni'classe*, ni modèle fermé, ni format strict, mais ouvert sur la libre contribution de chacun dans le respect et l'éthique des apports de la science.

Leur développement a connu une explosion à la suite du Mooc « Apprendre et enseigner avec les sciences cognitives », suivi par 27000 mooqueurs dans 120 pays en 2017-2018. Elles sont à ce jour environ 300, et en nombre croissant.

Autour de l'auteur de cet article s'est agrégée une solide équipe d'une quarantaine d'acteurs aux compétences complémentaires en formation, conseils scientifiques, analyse de données, qui nous permettent à la fois de suivre les projets mais aussi de faire émerger des conclusions utiles tant à nos responsables du ministère, qu'aux chercheurs.

Nous contactons les équipes des *cogni'classes* deux ou trois fois par an afin de collecter des observations sur la mise en œuvre et les effets sur les élèves et les équipes pédagogiques, et restons ouverts à leurs demandes.

Ces classes sont connues et observées avec intérêt par de nombreux responsables du système scolaire : recteurs, DASEN, corps d'inspection, CARDIE, Dafpen.

II. Les axes de l'apprentissage sur lesquels s'engagent les

cogni'classes

1 La mémoire

L'humain est un être de mémoire : reconnaissance et repères, construction d'une culture, compréhension des situations, exécution des tâches, identité personnelle, communication, recours aux automatismes, élaboration de projets, réflexion, création. Rien de la vie qui ne repose sur un capital de notions acquises et de procédures automatisées. Les expressions de la mémoire sont multiples, explicites ou inconscientes, liées aux multiples formes sensorielles. L'élaboration de la mémoire est l'œuvre d'une vie, en évolution à chaque instant de celle-ci, dans laquelle l'école joue un rôle primordial et déterminant pour toute la suite. Elle est dans ce cas volontaire et répond à des fonctionnements que les enseignants doivent maîtriser et traduire en actions pédagogiques. C'est ce que nous tentons de mettre en place dans les *cogni'classes* :

- lutter contre l'oubli par un renforcement des acquis, des stratégies de reprises (*cf.* le Zoom sur la consolidation en mémoire) ;
- aménager des temps de mémorisation en classe, comme une gymnastique obligatoire, pour développer et entretenir les savoirs indispensables, que l'enseignant aura sélectionnés comme étant essentiels, et sur lesquels aucune impasse n'est permise ;
- pratiquer la mémorisation active, en se posant des questions en lieu et place de la lecture simple qui est une modalité facile mais illusoire car peu performante. L'enseignant fait élaborer des fiches de mémorisation juxtaposant la question et la réponse (occultée avant de la dévoiler), il pratique des tests devenus aisés à conduire avec les outils numériques ;
- rectifier les erreurs et estomper les imprécisions par le feedback proche qui consiste à exposer la réponse correcte dès après avoir posé la question, et avant que l'erreur ne s'incrute ;
- mettre les connaissances en acte, en parole, en communication.

Dans les *cogni'classes*, les enseignants revisitent leurs pratiques, prenant conscience que les différentes formes de mémoires exigent des modalités différentes d'entraînement. Ce ne sont pas tout à fait les mêmes mémoires (*cf.* Chapitre 6 sur la mémoire) qui sont mobilisées lorsqu'on lit et comprend un texte en anglais et lorsqu'on s'exprime dans cette langue, lorsqu'on déroule un raisonnement et qu'on manipule des opérations mathématiques, lorsqu'on acquiert des références en histoire et qu'on développe une problématique. Les mémoires ont des temporalités différentes selon qu'il s'agit d'acquérir des savoirs (définitions de termes ou de concepts, termes du langage, propriétés, références), ou des automatismes pour parler, compter, lire et écrire par exemple. À chaque type d'acquisition en mémoire correspondent des rythmes de reprises, judicieusement espacées, en nombres suffisants. Pour ce faire, des stratégies de mémorisation sont à penser, intégrant la création de supports de mémorisation, la planification des reprises au cours des jours, des semaines et des mois afin de lutter contre l'oubli. Mais aussi des temps accordés à la réactivation des notions durant le temps scolaire, des activités dédiées à la consolidation en mémoire. Faute de quoi, les élèves se retrouvent vite en difficulté, incapables de mobiliser des savoirs étudiés antérieurement pour en construire de nouveaux, pour comprendre et traiter des situations de plus en plus complexes. Très vite leur énergie investie est consommée pour reconnaître, boucher des trous (... de mémoire), au détriment de ce qu'attend l'enseignant : réfléchir, relier, appliquer et transférer.

La consolidation en mémoire, chaînon trop absent dans l'organisation de l'apprentissage

L'oubli, naturel et incessant, cadeau inestimable de la nature pour la préservation de l'équilibre humain, reste la bête noire des apprenants et éducateurs dont l'objectif est de fixer au mieux en mémoire le maximum de savoirs et méthodes. Mais comment combattre l'estompage quasi-systématique des notions acquises et quelles réponses pratiques apporter aux enseignants pour leurs élèves ?

La consolidation en mémoire relève de stratégies planifiées de reprises. Apprendre, c'est d'abord oublier très vite. Mais il ne sert à rien de répéter plusieurs fois la même chose de façon rapprochée pour la retenir à terme. Les reprises doivent être espacées, de plus en plus espacées, par exemple après 2 semaines, puis 4 semaines, puis 8 semaines, etc. Étalement compatible avec la durée d'une année scolaire. Il n'existe hélas pas de loi arithmétique probante et précise qui serait valable pour tous les apprenants. Tout dépend de chacun, de sa culture, des conditions dans lesquelles il apprend, de l'horizon temporel qu'il se donne pour remobiliser son savoir. Pour autant et statistiquement pour une classe entière, la méthode fonctionne.

L'enseignant organise pour cela la réactivation, un rafraichissement de notions qu'il considère comme essentielles pour la suite. Ce défaut de consolidation mémorielle est un chaînon manquant fortement préjudiciable pour comprendre des notions qui s'appuient toujours sur d'autres plus anciennes.

Des logiciels, dits de « mémorisation à parcours individualisés » permettent avec des résultats étonnamment positifs, de pourvoir à cette consolidation (ANKI, SUPERMEMO).

Par ailleurs – et la raison en reste à ce jour mystérieuse – la mémorisation qui est l'un des actes fondateurs d'un apprentissage réussi, est systématiquement reléguée à la maison. À l'école l'enseignant expose,

ouvre à la compréhension, fait appliquer et transférer les notions sur des situations voisines, mais la mémorisation, surtout au collège et au lycée, est renvoyée hors de la classe. Tout en étant conscients qu'un nombre considérable d'élèves ne pratiquent pas – et ne savent pas pratiquer – la mémorisation chez eux. Comment s'étonner du décrochage constaté dès le cycle collégien ? Pourquoi ne pas introduire à l'école des activités pertinentes de mémorisation ?

2 La compréhension

La compréhension est le deuxième axe-clé de l'amélioration des pratiques dans les *cogni'classes*. Développer la compréhension de situations et problématiques est l'un des objectifs premiers de l'école : comprendre les phénomènes du monde qui nous entoure, comprendre soi et les autres. Les théoriciens montrent qu'il n'est pas de compréhension sans acquis en mémoire, sans identification des liens entre les éléments qui constituent tout système à comprendre, qu'il s'agisse d'un texte, d'un processus, d'une problématique, d'une situation. La mémoire est mobilisée par toute compréhension, elle en est le passage obligé, les étapes de la construction du sens. D'où l'importance d'avoir correctement mémorisé.

« Développer la compréhension de situations et problématiques est l'un des objectifs premiers de l'école : comprendre les phénomènes du monde qui nous entoure, comprendre soi et les autres. »

Aider les élèves à comprendre, c'est d'abord les doter d'un capital de savoirs, de liens entre ces savoirs, d'aptitudes à leur mobilisation. C'est exiger des contours précis de sens, les entraîner à relier, prioriser, organiser les informations. À cette fin, les *cogni'classes* encouragent la construction de cartes d'organisation de la pensée

(cartes mentales, diagrammes, cartes conceptuelles) et l'exigence d'une connaissance précise du vocabulaire utilisé. Aider un élève à comprendre, c'est le remettre en selle dans l'activité de la classe, lui redonner confiance, le convaincre que comprendre est un processus continu qui alimente le goût du savoir et la curiosité.

Mémorisation et compréhension sont deux processus distincts qui se nourrissent mutuellement : on ne peut comprendre sans savoir, on peut difficilement mémoriser sans avoir compris.

3 L'attention

L'attention, parent pauvre de la formation scolaire, est l'un des premiers critères de réussite... dans la vie. Meilleure progression scolaire, gain de temps, accélération de la mémorisation, qualité de réalisation des actes, contrôle de la pensée, erreurs minimisées, équilibre personnel accru. Tout humain est biologiquement équipé dès sa naissance pour développer son attention (*cf.* Chapitre 5 L'attention). Mais le fait-il autant que nécessaire, et l'aide-t-on à le faire ? Le développement de l'attention relève le plus souvent d'injonctions, de respect de consignes pour gérer la discipline et maintenir les élèves au travail. Ce qui certes est légitime mais insuffisant. Le meilleur développement ne se réalise-t-il pas lorsque l'élève devient « pilote du développement de son attention » ? À travers des exercices qui ne seraient pas exclusivement réservés aux apprentis musiciens et aux sportifs accompagnés... On peut développer l'attention en EPS (Éducation physique et sportive) par des activités ciblées qui mobilisent tout à la fois le corps et l'esprit (*cf.* les Pistes de pratiques sur l'EPS). On peut s'exercer à mieux observer, écouter, capter les consignes, en invitant à « faire attention à son attention », et ce dans toutes les disciplines.

Soulignons l'importance, dès les premières années de l'école, de développer les capacités d'inhibition, permettant de rectifier les mauvais réflexes de pensée et d'action, de gérer l'équilibre entre les

automatismes précieux certes mais pas toujours pertinents, et le mode rationnel conscient, plus sûr mais plus lent (*cf.* Chapitres 4 Compter et penser-raisonner, et 7 Les fonctions exécutives). Cette aptitude garantira une meilleure qualité de l'exécution de toute activité. On peut la développer dans maints exercices scolaires, elle est l'une des capacités-clés de la vie, répétons-le.

Les moments de mise au calme des esprits, couramment pratiqués dans nos classes, en sont un bel exemple, non seulement appréciés mais attendus des élèves, souvent les plus agités. L'école est si peu préparée à développer l'attention que les exemples nous font encore défaut (*cf.* le Focus sur la méditation).

4 L'implication active

Quand diminuera-t-on la place encore trop prépondérante du mode transmissif vertical, pour davantage de pédagogies actives, déjà fréquemment pratiquées en premier degré surtout pour les plus jeunes ? Or que constate-t-on encore en parcourant les couloirs de nombre d'écoles et collèges (a fortiori lycées) ? Des professeurs en face à face, des élèves alignés, dont l'expression orale ne dépasse pas en moyenne une minute par cours. Que dire de la prise en compte de la spécificité de chacun, de la différenciation pédagogique, du développement des compétences psycho-sociales dont notre pays porte la lanterne rouge dans les enquêtes de comparaisons internationales, des qualités liées au travail collaboratif. Si les études n'en démontrent pas le bénéfice garanti dans toutes les circonstances, en revanche nos collègues sont unanimes pour apprécier un surcroît de motivation et d'implication, à la condition d'avoir construit un solide scénario et mis en place une charte des conditions de déroulement. La mise en route d'un travail en îlots – groupes d'apprentissage – ne relève pas d'une simple répartition des élèves en groupes, il exige pour l'enseignant une grande technicité : composition des groupes, régulation sonore,

attribution des rôles, objectifs précis de développement des compétences psycho-sociales, feuilles de route, équilibre entre les temps personnels et les temps collectifs, système adapté d'évaluation. Une fois les rituels intégrés, les élèves sont demandeurs, généralement sereins et en ressortent grandis. Leur attention qui déclinait – c'est un phénomène naturel en mode récepteur – se maintient à haut niveau en mode producteur. Ce qui n'exclut nullement des périodes d'enseignement en mode traditionnel. La réponse est claire, et nous le démontrons, le travail en ilots est possible. Et fertile. Bien construit, il ne prend pas plus de temps qu'un cours traditionnel. Il bouscule grandement la posture de l'enseignant, le déplaçant de son rôle de transmetteur et de sachant sans faille, à celui d'accompagnant cognitif en côte-à-côte. Cela rejoint les pratiques Montessori et Freinet¹.

« Bien construit, le travail en ilots ne prend pas plus de temps qu'un cours traditionnel. Il bouscule grandement la posture de l'enseignant, le déplaçant de son rôle de transmetteur et de sachant sans faille, à celui d'accompagnant cognitif en côte-à-côte. »

Les ilots ne sont pas la seule modalité d'implication active que nous préconisons. La classe renversée ne nécessite aucune préparation en amont. Grâce à des ressources qu'on met à leur disposition (tablettes, espace de documentation), les élèves construisent des éléments du cours et l'expliquent au professeur, en renversant les rôles. Citons également le tutorat élève-élève, les murs de production de savoirs, etc.

Le développement de l'attention en EPS chez les élèves du premier degré

Exemple 1 : La transmission des consignes

Moment systématique et rituel.

1. Les élèves sont en position de réception des consignes : assis, jambes croisées, dos droit, à 50 cm environ les uns des autres. En silence, ils regardent le professeur.
2. Mise au calme : une trentaine de secondes de silence et de centration.
3. Vérification : 2 élèves sont désignés pour vérifier l'exactitude du rappel des consignes qui vont être transmises.
4. Transmission : l'enseignant ne dépasse pas 5 consignes (limite de l'empan mnésique chez les jeunes élèves), phrases courtes.
5. Double vérification : un élève rappelle les consignes. Les vérificateurs confirment et rectifient si besoin.
6. L'activité peut commencer.

Exemple 2 : Dédier des activités physiques et sportives au développement de l'attention

Le développement de l'attention peut être un but en soi, à travers des activités sportives support. Celles-ci mêlent à la fois le contrôle du corps et de la pensée. Ce sont des activités d'adresse, de précision des gestes, des jeux de tirs de balles, des mouvements du corps exigeant un bon contrôle (gymnastique, judo, jeux collectifs, danse, jonglage, activités de cirque, etc.). Il est essentiel d'annoncer aux élèves que l'objectif est de développer aussi et surtout les capacités attentionnelles. C'est sur l'attention qu'ils devront cibler leurs efforts, en faisant « attention à leur attention ».

Exemple 3 : le jonglage

Activité exceptionnelle pour le développement de l'attention. Les élèves

jonglent seuls ou à deux, avec une ou plusieurs balles. Les exercices se compliquent avec l'âge. Les élèves effectuent le même enchaînement plusieurs fois de suite (développement de l'attention soutenue).

Exemple 4 : le miroir

En binôme, un élève « pilote » déplace lentement ses deux bras, mains ouvertes et doigts écartés, dans un plan vertical. Le « suiveur » suit le mouvement du pilote avec ses propres mains, placées à quelques centimètres de celles du pilote. Après quelques minutes, les rôles sont inversés. Les élèves sont ensuite interrogés sur leur capacité à faire attention à leur attention. Cet exercice est classique dans la préparation aux arts martiaux.

Exemple 5 : mentaliser un geste avant de l'effectuer

C'est le cas du lancer de ballon, des exercices d'adresse, de maîtrise des gestes. Tout comme un champion de golf, de basket au moment du tir, les élèves prennent un temps pour faire le calme dans leur corps en respirant, éliminent de l'esprit ce qui peut les distraire, regardent la cible et miment précisément le geste dans leur tête avant de le réaliser.

Exemple 6 : le programme ATOLE

Le lecteur se reportera avec profit aux suggestions de Jean-Philippe Lachaux dans cet ouvrage et son programme ATOLE. Par exemple :

- La marche en équilibre. Les élèves avancent lentement sur des bandes scotchées au sol, un peu comme s'ils marchaient sur une poutre. Ils développent leur vigilance en guettant tout signe, toute source de distraction qui pourrait les faire dévier.
- Le bâton en équilibre. Cette activité connue se pratique avec un bâton d'environ 1 m de long. Il s'agit de le maintenir sur la paume de la main, en équilibre à la verticale le plus longtemps possible. Ce peut être un jeu-concours entre plusieurs élèves. Lorsqu'ils sont entraînés, ils peuvent conjuguer l'exercice avec le précédent, en maintenant le bâton en équilibre, tout en marchant sur la bande de scotch.

– L’attention sonore. En fonction de l’âge, l’exercice peut prendre des formes plus ou moins complexes. Les élèves ferment les yeux et se concentrent sur les chocs sonores émis par l’enseignant (petit tambour par exemple). Les élèves reproduisent les sons en tapant dans leurs mains. Ce peut être une série de plusieurs chocs identiques, plusieurs séries alternant chocs et silences, consigne de taper dans les mains une fois de plus que le nombre de chocs, ou deux fois de plus ou une fois de moins, etc.

III. Les conditions de mise en œuvre des *cogni’classes*

1 La formation

La formation la plus efficace que nous ayons observée pour la mise en place des *cogni’classes*, s’appuie sur des étapes-clés.

La première est celle de la sensibilisation aux apports des sciences cognitives dans la pédagogie :

- l’exigence de connaissances précises et rigoureuses sur le fonctionnement du cerveau, la chasse aux neuromythes (fausses croyances à propos du fonctionnement du cerveau), la conscience de la limite des attendus (pas de recettes magiques), mais des espoirs possibles (s’appuyant sur des connaissances validées par la communauté scientifique, ou des observations largement convergentes collectées sur le terrain) ;
- la chasse aux écueils faciles : « il suffit de... pour atteindre tel résultat » : le cerveau, organe d’une immense complexité est le siège d’un nombre considérable de paramètres, tous en jeu dans l’espace-temps éducatif. Il faut garder raison ;
- dimension systémique du fonctionnement du cerveau : il n’est pas

concevable de séparer les différentes fonctions cérébrales liées à l'apprentissage : les mémoires, la compréhension, les émotions et la motivation, l'attention et l'implication.

La deuxième étape concerne la construction du projet : bâti sur la base de pistes pédagogiques précisant les enjeux et les modalités. D'où la nécessité d'une bonne connaissance des mécanismes de l'apprentissage.

« L'enseignant devient un apprenant permanent, curieux de l'apport incessant de la science dans le métier, naturellement à l'affut d'idées nouvelles. Il devient un chercheur sur lui-même. »

La troisième étape concerne la maîtrise des outils et méthodes : par exemple pour la construction des supports de mémorisation, la technique des ilots, la manipulation des outils numériques, et toute modalité qui pourrait être nouvelle ou peu familière.

L'heure n'est plus à la seule formation sur site externalisé, peu efficace. Elle prend désormais des formes variées et complémentaires :

- stage établissement réunissant l'ensemble de l'équipe à l'initiative du projet ;
- inter-formation entre les enseignants, dont certains possèdent plus que d'autres des compétences à partager. L'heure est à la formation par co-pilotage, à la visite chez les collègues, à la co-construction des compétences, au tâtonnement par essais-erreurs, à l'amélioration par régulation, à l'esprit de l'établissement-apprenant ;
- formations individuelles sur Internet, formations hybrides, prises d'informations s'appuyant sur des réseaux, participation à des événements ou colloques. Et ce que propose notre site sciences-cognitives.fr

L'enseignant devient un apprenant permanent, curieux de l'apport

incessant de la science dans le métier, naturellement à l'affut d'idées nouvelles. Il devient un chercheur sur lui-même, éloigné de la posture d'antan qui réduisait l'enseignant à enseigner comme il fut enseigné. Le rythme d'évolution des connaissances sur le cerveau s'accélère.

La formation des élèves, enfin, est prioritaire. Bousculer les pratiques, exiger des élèves qu'ils modifient leur façon d'apprendre, les rendre complices et partenaires des enseignants, les plonger dans une organisation nouvelle du temps et de l'espace, c'est d'abord les initier aux petits secrets du fonctionnement de leur cerveau d'apprenant. Il est conseillé de distiller cette formation au fil de l'année, en s'appuyant sur d'excellents outils visuels désormais disponibles en ligne (site sciences-cognitives.fr menu Outils, CogniJunior, Moocs des Savanturiers). La formation des élèves à leur cognition est un accélérateur de la réussite des *cogni'classes*.

18 classes de CE2 de la région d'Aix-Marseille (et bientôt le double)

Près de 400 élèves répartis dans 18 *cogni'classes* expérimentent sur 3 ans plusieurs modalités pédagogiques inspirées par les sciences cognitives, dans l'objectif de pratiquer une pédagogie proche de ce que l'on sait actuellement du cerveau, de diminuer la difficulté scolaire, et de mieux savoir apprendre pour tous les élèves.

Mise en œuvre

- Les axes communs ont été choisis en concertation par l'ensemble des enseignants.
- Les écoles et les professeurs sont volontaires.
- Les publics d'élèves sont suffisamment variés pour espérer tirer des conclusions significatives.
- Une formation de deux jours a permis aux conseillers pédagogiques de s'emparer du projet afin d'amorcer la formation des enseignants.
- Le projet est précis avec un calendrier de mise en œuvre au cours des mois.
- L'initiative bénéficie du soutien d'un chercheur en neurosciences cognitives.
- Un suivi est assuré au long de l'année.
- Des ressources sont fournies en appui (d'explication et de formation) et partagées sur un espace M@gistère.
- Les professeurs sont sensibilisés à l'évaluation qualitative et quantitative des effets produits sur les élèves.

Pistes pédagogiques sélectionnées

- Formation des élèves à leur cognition.
- Sélection des savoirs essentiels à acquérir (par exemple élaboration d'un corpus de termes associés aux disciplines).
- Temps de mémorisation en classe, avec modalité active.

- Exercices de développement de l'attention, en particulier en EPS.
- Utilisation d'un logiciel de mémorisation à parcours individualisé sur tablettes.
- Séquences de mise au calme des esprits.
- Pratique des cartes mentales pour améliorer la compréhension.
- Tests de compréhension par la méthode de sondage PLICKERS.
- Développement de la mémoire de travail par les activités de calcul mental MATHADOR.
- Travail en ilots en année $n + 1$.
- Activité systématique de lecture orale pour améliorer les automatismes grapho-phonémiques.

Premières observations

- Les enseignants souhaitent tous poursuivre l'expérimentation et réfléchissent déjà à l'organisation de leur progression en tenant compte de l'expérience acquise au cours de la première année.
- L'expérimentation génère un réel travail d'équipe.
- Il est difficile de mettre en place toutes les pistes en même temps.
- Les résultats obtenus au cours des mois attestent d'un réel progrès chez tous les élèves.
- Unanimement, cette expérimentation lève chez tous les acteurs de l'enthousiasme, de l'implication et le désir d'aller toujours plus avant.
- Le nombre des *cogni'classe* de ce dispositif s'apprête à doubler à la rentrée 2018.

2 Le management d'établissement

Le projet *cogni'classe* est à double visée, qui ne peut se dissocier : améliorer l'apprentissage et modifier les pratiques professionnelles des enseignants. Nous voulons insister ici sur l'indispensable

dynamique qui repose en partie sur la compétence du management de proximité de l'équipe de direction. Qu'il s'agisse d'un projet pour le premier ou le second degré, et compte tenu de la nature même des changements de pratiques envisagés, la réussite d'un tel projet ne peut se réaliser dans le temps sans une implication de la direction. Pourquoi ?

Une thématique large, ambitieuse et transdisciplinaire, telle que les sciences cognitives de l'apprentissage, pénètre dans l'établissement soit par la voie individuelle d'un enseignant convaincu et enthousiaste, soit par celle de la direction qui « ouvre » les portes à l'information et déclenche la sensibilisation des équipes par une conférence ou la proposition d'une formation d'établissement. Le directeur (ou la directrice) est l'ouvreur, le déclencheur. Pour cela il doit être informé et sensible aux enjeux et possibles des apports des sciences cognitives.

Pour crédibiliser de nouvelles pratiques, aux yeux des parents, des autres enseignants de l'établissement, des conseillers pédagogiques et corps d'inspection, il revient aux membres de la direction d'en connaître et en avoir compris les enjeux et les possibles espérés.

Ils adopteront vis-à-vis des enseignants impliqués une attitude d'ouverture, d'écoute du projet, de bienveillance en cas d'avancées difficiles, de valorisation dans le cas contraire, et à coup sûr d'intérêt pour le développement et les effets observés. Ils sauront se faire l'écho de l'intérêt de la démarche, en diffusant la pratique, la faisant rayonner. Deux ou trois bilans d'étape en cours d'année, possibilité d'expression des expérimentateurs, voire des élèves eux-mêmes, auprès de la communauté pédagogique en fin d'année par exemple. Les membres de la direction sont des acteurs attentifs de l'évolution de la pédagogie dans leur établissement, de l'instauration d'un climat professionnel de partage, d'essais et erreurs pour s'améliorer. Ils représentent souvent la caution de la réussite. À l'inverse nous avons souvent remarqué qu'un désintérêt de leur part, l'insuffisant management de proximité engendrent une baisse de la dynamique

de changement, voire le déclin du projet. Leur implication est plus stratégique qu'il n'y paraît.

Prenons l'exemple d'une *cogni'classe* qui fonctionne positivement, rituels pédagogiques appréciés, élèves mieux impliqués. Que devient la classe au terme de l'année scolaire ? Comment s'articule le passage de relais avec les enseignants de l'année suivante ? L'expérience montre clairement que les élèves souhaitent poursuivre les modalités qui fonctionnent. Il revient à la direction de gérer et d'anticiper longtemps à l'avance le relais, faute de quoi les améliorations seront étouffées par la rigidité du système. Les élèves et les parents ne comprendront pas.

Le changement, toujours plus lent que souhaité dans les postures professionnelles, s'effectue souvent par diffusion de la preuve. Nombre d'enseignants a priori sceptiques ne demandent qu'à se laisser convaincre par les résultats et les témoignages. L'information doit circuler par des canaux de communication qui sont la prérogative des équipes qui pilotent les établissements scolaires.

La place des outils numériques

Centrons-nous ici sur les outils et applications numériques les plus en proximité des points évoqués ci-dessus. Notre position à ce jour est la suivante :

- Être vigilant quant aux mythes possibles attribués au numérique : il amoindrirait l'effort de l'élève qui apprend, il développerait l'autonomie, son pouvoir attractif accroîtrait la motivation, les élèves auraient un large pas d'avance sur les adultes dans l'expertise à les manipuler... Ces affirmations demandent à être vérifiées.
- S'intéresser et si possible maîtriser des outils numériques qui permettent de réaliser des actions pédagogiques que l'enseignement seul n'est pas en mesure d'accomplir : corriger un test en quelques instants (logiciels de tests), particulariser les parcours de mémorisation (Anki), suivre individuellement et échanger avec tous les élèves ou groupes au travail (UNIO), réaliser une production avec documents partagés (MindMup), créer des scénarii au service de la pédagogie inversée, etc.

Les outils numériques se développent à une vitesse fulgurante et font l'objet d'un intérêt croissant pour l'éducation. Ils sont encore balbutiants pour ce qui concerne la mémorisation, la compréhension, le développement de l'attention. Mais les progrès sont impressionnants et l'offre tend à se rapprocher rapidement de la demande. La pire attitude serait d'en rester indifférent. À vos tablettes mais avec raison !

IV. Les pistes pédagogiques

La liste suivante rassemble les pistes le plus souvent sélectionnées par les enseignants de nos *cogni'classes*. Elle n'est pas exhaustive. Chaque équipe en compose une sélection pouvant varier de

quelques unités à une dizaine au maximum avec deux précautions que nous suggérons :

- En étaler la mise en œuvre au cours des semaines, un temps d'appropriation individuelle ou collective étant recommandé.
- Informer les élèves des fondements théoriques qui justifient la pratique, pour en améliorer l'efficacité de la mise en œuvre.
- Ne pas stigmatiser les élèves choisis par le projet.

Ces pistes s'offrent à des élèves de tous niveaux, de l'école primaire au terme du lycée, à décliner en fonction de chaque contexte.

1 Mémorisation

Contenus à mémoriser

→ Sélectionner des essentiels qui vont donner lieu à une stratégie d'acquisition durable

Adapter la quantité d'informations à mémoriser aux capacités des élèves, surtout dans le cadre d'une stratégie de reprises. La raison « moins mais mieux » se révélant unanimement bénéfique. Les programmes français sont pléthoriques, injouables pour être assimilés correctement à l'échelle de temps d'une année scolaire. Nous observons que cette trahison des consignes nationales va dans le sens d'une meilleure formation. Toutefois l'exigence de rétention peut différer entre les élèves, en fonction de leurs capacités.

→ Pointage-mémorisation de points essentiels au cœur du cours

Les élèves sont souvent déroutés face à l'importante quantité d'informations qu'ils ont brassées lors d'un cours. Ils ont besoin de prioriser ce qu'ils devront connaître. Pour cela l'enseignant met en évidence ces points, soit dans le cours, soit sur la fiche de mémorisation.

Mémorisation en classe

→ Fin de cours, acte 1 de la mémorisation

Avant que les élèves ne quittent la salle à la fin du cours, l'enseignant prend quelques minutes pour procéder à un exercice de mémorisation initiale portant sur les quelques points jugés les plus importants qui viennent d'être étudiés. Les élèves prennent conscience de l'importance de ces points. L'enseignant anime

l'activité à sa guise de façon la plus efficace qui soit, et réalise la première étape de la mémorisation.

→ **Organiser des séquences d'interrogation par binômes**

Basées sur le principe de la mémorisation active et du *feedback* proche, structurées par les fiches de mémorisation et partant du constat que beaucoup d'élèves ne mémorisent pas chez eux, ou très mal, ces séquences sont construites selon des modalités prévues par chaque enseignant.

→ **Le cahier de réactivation**

À chaque cours, chaque enseignant inscrit sur le cahier unique appartenant à la classe deux ou trois questions étudiées portant sur des essentiels à acquérir, ainsi que les réponses, en indiquant la date du jour et celles auxquelles les rappels sont conseillés. À chaque cours également, chaque enseignant pose des questions correspondant aux dates de rappel. La réactivation n'est pas aléatoire, mais reste partielle. À l'efficacité du rappel est associée une dimension ludique appréciée chez les jeunes élèves.

→ **Programmer des séquences de mémorisation en classe**

La classe est un lieu de transmission des connaissances, d'explication, d'application, parfois de production. Mais rarement de mémorisation pourtant essentielle. D'où le handicap pour tous les élèves qui ne mémorisent pas à la maison, et ne savent pas le faire correctement. Cette piste préconise d'inclure dans l'horaire en présentiel des activités diverses de mémorisation (tests, binôme d'interrogation, etc.).

Mémoire et évaluation

→ **Sélectionner des modalités de tests : multitesting, flashes, intégration dans les contrôles**

Choisir une ou plusieurs modalités de réactivation permettant de

réinterroger les élèves sur des acquis antérieurs, en respectant un calendrier d'écarts expansés, et dans l'esprit de la mémorisation active (questions, puis réponses proches). Le test est une modalité efficace d'apprentissage, dépassant le simple objectif de contrôle.

→ **Techniques d'évaluation : mixer les modes de rappel**

L'objectif d'un contrôle est généralement destiné à recueillir une photographie aussi fidèle que possible de l'acquis chez les élèves. Or la mobilisation des connaissances repose sur trois principaux modes :

- libre : une question nue de tout indice, qui appelle un développement plus ou moins long. L'élève doit rechercher tous les éléments de la réponse dans sa mémoire. C'est la modalité la plus difficile et la plus ingrate, car l'élève peut disposer des éléments sans pour autant réussir à les rappeler ;
- indicé : une petite indication peut favoriser le rappel, sans pour autant constituer en soi une partie de la réponse. C'est sans doute le mode le plus efficace et représentatif des informations possédées ;
- et par reconnaissance : type QCM ou quiz, qui invite à reconnaître la réponse correcte parmi plusieurs propositions ; c'est un mode d'apprentissage peu efficace, mais un bon moyen de contrôle.

Un contrôle pourra combiner les différents modes.

Outils

→ **Outil numérique de tests Socrative**

Les tests sont une activité de mémorisation tout autant que de contrôle. Ils respectent les principes de la mémorisation active et du feedback proche. Socrative est un logiciel fonctionnant en ligne, très aisé à utiliser et efficace. Il peut s'utiliser pour vérifier le travail sur les prérequis, réactiver des connaissances ou vérifier

des compréhensions.

→ **Fiches de mémorisation**

Cette technique, reconnue comme particulièrement efficace et facile à mettre en œuvre, juxtapose sur la même feuille relative à un cours, les notions les plus essentielles présentées sous forme de questions et de réponses. Cet outil possède la vertu de mettre en évidence les points les plus importants que l'élève aura à retenir, mais aussi de servir à mémoriser efficacement selon la technique de la mémorisation active : il cache la réponse, tente de répondre à la question en se concentrant avec effort et dévoile la réponse. En fin d'année, l'élève dispose de l'ensemble des notions les plus importantes du cours. Il peut également et aisément réapprendre les notions dès que demandé par l'enseignant en accord avec le calendrier des reprises.

→ **Logiciel ANKI de mémorisation à parcours individualisé**

C'est celui que nous avons choisi. Il est constitué de *flashcards* faisant apparaître les questions, puis à la demande les réponses, à des jours correspondant aux « zones les plus probables d'oubli ». C'est l'application qui pilote l'émergence des questions car elle dispose d'un « algorithme de l'oubli ». Il s'agit à coup sûr de l'outil numérique le plus performant pour gérer la différence entre chaque apprenant. Il fait l'unanimité chez les élèves et les enseignants.

→ **Application numérique QUIZLET de mémorisation collective**

QUIZLET fonctionne sur la base de listes comprenant des termes associés à leurs définitions. À ce jour, il ne dispose pas de modalité permettant un rappel individualisé pour chaque élève. Pour son allure ergonomique et ses fonctionnalités complémentaires (introduction d'images et enregistrements sonores), il est très apprécié.

2 Compréhension

Pratiques, conseils

→ Le rôle du temps : scinder des chapitres difficiles

Le cerveau apprend également lorsqu'il n'a pas conscience d'apprendre. Le sommeil et les pauses sont des périodes d'activité cérébrale qui peuvent être mises à profit pour l'étude et l'assimilation de thèmes difficiles. Les musiciens le savent : trois fois une heure d'exercices valent mieux qu'une fois trois heures.

→ Gestion des prérequis, un peu d'inversion pédagogique

Permettre au maximum d'élèves d'aborder un nouveau chapitre en ayant réactivé (ou activé !) les notions-clés sur lesquelles il est construit. C'est aussi un moyen de limiter les écarts de compréhension entre élèves, et de réduire les décrochages. Les prérequis sont soigneusement sélectionnés, leur étude s'effectue grâce à des modalités (papier ou numériques) attractives et interactives, les élèves sont rapidement testés pour s'assurer que le travail a été réalisé (outil numérique).

→ Atelier en amont, pour faciliter la compréhension des élèves en difficulté

Généralement, les ateliers de remédiation sont organisés après coup pour les élèves qui n'ont pas réussi à comprendre, à apprendre. Soit. Pourquoi n'envisagerait-on pas des ateliers en amont, visant à permettre aux plus en difficulté de ne pas décrocher trop vite ? L'idée est peut-être couteuse en temps mais se révèle efficace.

→ Précision sur le vocabulaire

Nombre de malentendus et d'incompréhensions reposent sur l'imprécision dans le sens des mots et des concepts. Toutes les

disciplines sont concernées. L'exigence sur la rigueur de sens est une des conditions requises pour une meilleure compréhension, une meilleure expression écrite et orale.

Outils

→ Tests de compréhension, technique Plickers

Cette application est basée sur le principe de questions à choix multiples, pour lesquelles les élèves d'une classe entière proposent des réponses sous formes de QRcodes que le professeur scanne. Il visualise aussi les réponses de chacun et peut même les enregistrer. Le retour sur les erreurs est une étape de l'apprentissage.

→ Cartes mentales : papier ou numérique

Comprendre repose sur l'identification des éléments qui composent une situation ou une problématique. Mais aussi sur les liens qui les unissent. La carte mentale permet, en respectant la limite de la mémoire de travail, de lier en les ordonnant les éléments du système étudié. Outil individuel ou de groupe, réalisable sur papier ou en version numérique, il est un incontestable moyen de construire la compréhension. Certains enseignants l'utilisent également comme technique de contrôle.

3 Implication et différenciation

Pratiques, conseils

→ Les ilots (groupes d'apprentissage)

Chacun en connaît le principe, peu les pilotent avec rigueur : composition des groupes, feuille de route, compréhension-assimilation des consignes, objectifs de production ou de synthèse, rôles attribués, objectif de développement des compétences de travail collaboratif, séquençage mêlant le travail individuel et le travail en groupe.

→ Développement de compétences psychosociales

C'est l'un des grands maillons faibles du système français. Apprendre à vivre et à travailler en mode partagé s'apprend et ne relève pas d'une simple évidence. Et pourtant, ces qualités si fondamentales dans la vie, sont parmi les moins ciblées en période scolaire, les enquêtes internationales le constatent. Travail en ilots, tutorat élève-élève, groupes et blogs de productions, sont quelques exemples parmi tant d'autres à instaurer dans les modalités sociales d'apprentissage.

→ Techniques de la classe renversée

Les élèves produisent en petits groupes sans préparation préalable et à partir de ressources mises à leur disposition, ou qu'ils récupèrent par Internet, des petites parties de cours et les présentent à leur professeur qui joue le rôle de candide éclairé. Cette modalité, pratiquée au niveau universitaire, gagne de plus en plus d'adeptes car stimulant la motivation, éclairant la compréhension et favorisant la mémorisation. Le professeur accompagne le travail tout au long de la séance, de groupe en groupe.

→ **Elèves-professeurs**

Un binôme d'élèves prépare, en amont du cours, des notions qu'ils devront présenter à la classe, comme s'ils étaient le professeur, un peu comme un exposé, mais sur une partie du cours. Le professeur évidemment corrige. L'implication et la responsabilisation des élèves sont grandes.

→ **Tuteurs élèves-élèves avec barre intermédiaire d'objectifs**

Le modèle classique en étoile de transmission-explicitation-compréhension depuis le professeur vers chaque élève est rompu. L'apprentissage devient une affaire de groupe, dans lequel tous les élèves ne sont pas tenus d'atteindre le même niveau d'objectifs d'acquisition. Après une période de travail individuel, certains élèves plus avancés dans les tâches à accomplir tutoront des élèves plus en difficulté. Les témoignages convergent : tous s'y retrouvent, y compris et surtout ceux qui ont mission d'expliquer à leurs camarades. L'explicitation, l'oralisation, la recherche de l'explication étant des moyens efficaces pour mieux comprendre et mieux retenir. Par ailleurs la règle peut être instituée que tous les élèves doivent atteindre une barre intermédiaire d'objectifs (exercices à réaliser, notions à acquérir). Mais au-delà de cette barre, il n'y a pas de limite supérieure. À l'enseignant de mettre les ressources et activités à disposition.

4 Attention

Pratiques, conseils

→ Séquence de mise au calme des esprits

Maintes techniques issues des pratiques du yoga, de la méditation ou de la sophrologie, contribuent efficacement à développer le contrôle de la pensée. Sans tomber dans l'excès ni troubler élèves et parents, il devient de plus en plus courant de faire pratiquer durant quelques minutes des exercices de recentrage du corps et de l'esprit, soit en début de séance, soit lorsque l'enseignant en ressent la nécessité, soit aux moments sensibles de mi-demi-journées. Au fur et à mesure des pratiques qui peuvent se ritualiser, les élèves finissent par en ressentir le besoin.

→ Double modalité de présentation (visuelle et orale)

L'impact d'une information transmise dépend du nombre et de la qualité des modalités utilisées. Il est admis que la double modalité visuelle (écran, support) et auditive (parole du professeur) renforce cet impact à la condition d'une bonne cohérence entre les deux sources et sans dépasser un seuil de surcharge cognitive qui pourrait aller à l'encontre de l'objectif recherché (par exemple un support écrit surchargé, un schéma alourdi d'informations inutiles, etc.).

Outils

→ Exercices d'observations pour développer l'attention

Les exercices de développement de l'attention et des capacités d'inhibition des distractions peuvent prendre des formes variées dans chaque discipline scolaire. Ils sont fondés sur l'entraînement à rester focalisé sur un objectif bien précis sans se laisser distraire, et à l'accomplir le mieux possible : rigueur du déroulement d'un raisonnement, qualité d'un geste, précision d'une observation,

discrimination de certains éléments parmi d'autres, blocage des dérives d'attention, etc. Ces capacités se développent et donnent lieu à des exercices précis. L'enseignant énonce très clairement l'objectif à atteindre. Il indique l'importance dans la vie de contrôler la pensée, et invite les élèves à devenir « champion de leur attention ».

→ **Mentalisation numérique**

L'entraînement au calcul mental, surtout par des exercices d'atteinte d'un nombre cible à partir de plusieurs nombres de base avec manipulation d'opérations d'addition-soustraction-etc., sans support écrit, a prouvé ses effets sur la concentration et l'acquisition de mécanismes numériques. Largement diffusées auprès des enseignants et validées par l'Éducation nationale, les activités Mathador (par exemple) sont pratiquées dans les *cogni'classes* et se déclinent suivant l'âge des élèves.

→ **Développement de l'attention en utilisant l'EPS comme support**

Mobilisant à la fois le corps et l'esprit, cette discipline est privilégiée pour développer « l'attention à l'attention » (cf. le Zoom sur l'EPS).

5 Autres pistes d'activités

Pratiques, conseils

→ Expliquer aux élèves comment leur cerveau d'apprenant fonctionne

Faire prendre conscience aux élèves, y compris les plus petits, comment ils mémorisent et oublient, font attention ou se laissent distraire, comment ils peuvent apprendre plus efficacement en dormant mieux et en maîtrisant mieux ce qui se passe dans leur tête, représente un atout considérable pour tout enseignant qui souhaite engager avec des modalités pédagogiques différentes. Nous considérons que cette formation des élèves à leur cognition est absolument essentielle dans la mise en place de toute piste inspirée par les sciences cognitives. Et ils adorent !²

→ Les fonctions du cours à 5 temps

Ce déroulement de séance réunit les principaux types d'activités cognitives mises en jeu au cours de l'apprentissage : le professeur transmet des informations captées, sans prise de notes, pour activer l'attention et la première mémorisation, puis vérifie l'exactitude des éléments par une étape de restitution-ajustement, il fait noter les notions correctes. Des activités sont proposées autour de la compréhension, puis de l'application sur des situations voisines et différentes. La séance se termine par la mémorisation (sans notes) des éléments les plus essentiels étudiés.

→ Sensibilisation des collègues aux thématiques des sciences cognitives

Nous proposons un jeu de vidéos et fichiers destinés à des enseignants désireux de découvrir les connaissances-clés sur les axes traités dans les *cogni'classes*, afin de se familiariser en vue de

participer à de nouveaux projets. C'est le principe des relais-ressources (<http://sciences-cognitives.fr/relais-ressources/>).

→ **Préparation des interrogations/contrôles : s'inspirer de l'évaluation par contrat de confiance (EPCC)**

Pratiquée depuis longtemps, et inspirée par André Antibi, cette méthode de préparation des élèves aux interrogations/contrôles rejoint plusieurs de nos préoccupations, c'est pourquoi nous en encourageons l'usage : clarification des objectifs et des notions à apprendre, reprise des acquisitions et entraînements sur les méthodes, anticipation de la préparation, tests limités de transfert, importance donnée à l'acquisition des bases.

→ **Les 10 jours en amont d'un contrôle pour le réussir**

Un contrôle portant sur de nombreuses notions se prépare sur une durée longue. Il est organisé autour de moments-clés de reprises permettant une bonne consolidation en mémoire et laissant le cerveau s'approprier les notions, avec exercices fléchés pertinemment sélectionnés pour s'assurer d'une capacité de transfert de qualité. Il revient à l'enseignant de proposer une feuille de route précisant les activités à réaliser et les délais.

Conclusion

Ni formatage, ni *top-down*, ni changement violent, ni espérance de résultats miraculeux, le travail collaboratif de la cogni'classe apporte une dynamique certaine et des effets indiscutables. Ainsi convergent les témoignages unanimes des enseignants, élèves et parents concernés par cette voie de changement que nous considérons comme irréversible dans l'évolution des systèmes de formation éclairée par les apports des neurosciences cognitives. Politique des petits pas, essais et erreurs, conjuguant des modalités ayant depuis longtemps fait leurs preuves à d'autres très innovantes. C'est ce

bouquet de pratiques revisitées, harmonisées et adaptées aux compétences de chaque enseignant qui semble faire ses preuves pour le bénéfice non seulement des élèves, mais également de tous ceux qui les accompagnent dans la fascinante aventure de la formation.

Les Essentiels

- Les *cogni'classes* sont des mises en œuvre très concrètes de modalités pédagogiques inspirées par des éléments validés par les sciences cognitives autour de la mémorisation, la compréhension, l'attention, l'implication, avec en filigrane l'évaluation et le numérique. Parmi des dizaines de préconisations pédagogiques, les enseignants choisissent celles de leur choix ou peuvent en créer d'autres, prolongeant leurs compétences, se formant continuellement sur le fonctionnement du cerveau de l'apprenant, dans un esprit d'exploration et d'expérimentation partagée.
- Les *cogni'classes*, transdisciplinaires, interrogent la gouvernance de l'établissement car elles mobilisent tous les acteurs, de la direction aux élèves, des corps d'inspection aux parents.
- Les termes qui caractérisent le mieux ce dispositif sont : rigueur, formation, équipe, expérimentation, observation, remise en question, opportunité pour tous.

1. Houdé O., *L'école du cerveau. De Montessori, Freinet et Piaget aux sciences cognitives*, Mardaga, 2018.

2. Voir Houdé O., Borst G., *Mon cerveau*, coll. « Questions / réponses », Nathan, 2018.

focus

Le cerveau et les sciences cognitives à l'INSPÉ

par Alain Frugière

Il est une évidence de dire que les élèves apprennent à lire, à écrire, à compter, à raisonner, à effectuer une activité physique, etc. (en fait tous les apprentissages demandés à un élève, de l'école préélémentaire à la terminale) grâce à leur cerveau. Sans le cerveau, point de mouvement volontaire, point d'analyse de situations complexes, point de prise de décision réfléchie. Le cerveau humain qui apprend est un cerveau génétiquement programmé, mais, et c'est là un élément clef, un cerveau en construction et en interaction permanente avec le monde environnant depuis la vie embryonnaire et ce tout au long de la vie.

Formation et recherche

L'Éducation nationale est trop souvent le théâtre de querelles stériles. Il en existe une qui est récurrente, les enseignants doivent-ils être de bons connaisseurs de leur discipline ou bien de bons pédagogues ? Alors que la réponse est évidente, les deux étant indispensables pour construire les compétences professionnelles attendues d'un enseignant, cette discussion revient périodiquement au gré des réformes qui jalonnent l'Éducation nationale. Une autre querelle, présente depuis quelques années, concerne la place du

cerveau et des recherches en sciences cognitives dans la formation des enseignants, des conseillers pédagogiques et des conseillers principaux d'éducation (CPE). Ces éléments doivent-ils occuper une place prépondérante ou au contraire être minimisés au profit d'autres approches ? Là encore, il apparaît aujourd'hui important d'associer les différents courants de pensée pour une formation la plus complète possible.

Un des rôles des Instituts Nationaux Supérieurs du Professorat et de l'Éducation, les INSPÉ, est de prendre en compte dans ses formations les données les plus récentes de la recherche. Si cela est vrai dans les domaines disciplinaires, cela l'est également en didactique, en sociologie, en sciences de l'éducation et bien évidemment en sciences cognitives, dont des progrès indéniables ont été effectués ces dernières années, notamment au sein de prestigieux laboratoires français. En effet, qui irait consulter un médecin qui soignerait avec les connaissances médicales d'il y a un siècle ? Il en est de même en formation des enseignants.

Les INSPÉ ont le devoir d'intégrer dans leurs formations les données actuelles sur les mécanismes internes du cerveau humain qui apprend. Mais les INSPÉ ne doivent pas seulement utiliser les résultats de la recherche en sciences cognitives, comme dans les autres domaines, elles doivent aussi contribuer à produire cette recherche. Une des raisons même de l'existence des INSPÉ est de participer à la production de la recherche. Sinon pour quelle raison l'État aurait-il fait le choix de les créer au sein des universités, si ce n'est pour assurer un lien fort entre les acquis de la recherche et le développement de nouvelles pratiques pédagogiques favorisant les apprentissages des élèves ?

Du laboratoire à la classe

Les sciences cognitives ne peuvent bien sûr pas produire des recommandations générales qui s'appliqueraient uniformément à

tous les élèves. Le chemin qui va du laboratoire à la classe n'est pas linéaire, loin s'en faut ; il est sinueux et parsemé d'obstacles. Ce chemin doit aussi être parcouru dans l'autre sens, donnant ainsi lieu à des allers-retours réguliers entre laboratoires de recherche et terrain. Il est essentiel de partir de la réalité de la classe pour établir et modifier les protocoles expérimentaux de la recherche. Les progrès de l'imagerie cérébrale en font un outil précieux pour décrypter *in vivo* les mécanismes fins des apprentissages. Ces techniques qui ont manqué aux pédagogues de la première moitié du xx^e siècle sont maintenant disponibles et ce serait une grande erreur que de ne pas les utiliser. Mais, utiliser les progrès en neurosciences n'a de sens et d'intérêt que s'ils sont confrontés à ceux des autres domaines de recherche et c'est de la complémentarité et de la synergie de ces disciplines que doit naître une formation renouvelée des enseignants et des CPE basée sur les données les plus actuelles. La démarche qui doit être utilisée dans les INSPÉ ne peut pas être une démarche prescriptive qui conduirait inmanquablement à l'échec, elle doit au contraire intégrer les données spécifiques à chaque situation de classe. Ce qui veut dire une formation des enseignants plus ancrée encore sur le lien théorie-pratique avec la mise en place de dispositifs d'apprentissage à effectifs réduits qui doivent se dérouler pour partie in situ dans les classes. Cela a un coût, c'est l'évidence, mais c'est un choix pour notre société de savoir si nous voulons pour les enseignants ce que nous faisons pour d'autres professions, comme les médecins, avec une formation universitaire qui prend appui sur les réalités du terrain et qui permet l'acquisition de compétences professionnelles fondées sur les acquis les plus récents de la recherche.

Les INSPÉ du futur, dénomination donnée à une action dans le cadre du 3^e volet du programme d'investissements d'avenir, doivent pouvoir intégrer les données essentielles de la recherche et bien évidemment des sciences cognitives dans leurs formations. Elles doivent le faire en mettant en œuvre des dispositifs d'enseignement

adaptés. Tous les élèves peuvent apprendre et tous les cerveaux peuvent progresser dans les apprentissages, c'est un des acquis des recherches cognitives et c'est peut-être le premier que nous devons intégrer dans nos formations.

Un dernier élément qui doit être pris en compte est celui du temps. Il faut du temps pour former un enseignant ou un CPE et c'est dès la licence que nous devons mettre en place des dispositifs qui permettent aux étudiants d'appréhender la complexité des mécanismes d'apprentissage des élèves et leur donner les clefs et le goût d'une carrière qui leur permettra d'actualiser leurs compétences par la volonté de se méfier des vérités toutes faites et d'aller toujours rechercher des informations fiables et scientifiquement démontrées. ●

Du labo à l'école : Une recherche collaborative en neurosciences

L'exemple LaPsyDÉ – Lea.fr

par **Pascaline Citron et Marie Létang**

Mieux connaître le fonctionnement du cerveau dans les processus d'apprentissage ne peut que nous aider à faire progresser les élèves en adaptant nos méthodes pédagogiques. C'est de ce constat commun et de la volonté partagée d'associer les enseignants sur le terrain à ce projet qu'est née l'étroite collaboration entre le LaPsyDÉ (laboratoire CNRS de l'Université Paris Descartes) et le département de Pédagogie des Éditions Nathan. Grâce à Lea.fr, le réseau pédagogique et collaboratif de l'école riche de 90 000 inscrits, les résultats de recherche du LaPsyDÉ sur l'importance de l'inhibition – fonction du cortex préfrontal – dans l'apprentissage ont pu être largement diffusés mais surtout expliqués et confrontés aux réalités du terrain par les enseignants eux-mêmes : nous avons souhaité ensemble mettre en place une vraie recherche scientifique et pédagogique collaborative !

C'est avec beaucoup d'humilité que nous nous sommes lancés dans ce projet ambitieux : les enseignants accepteraient-ils d'être les relais de la recherche auprès de leurs élèves ? Réussiraient-ils à appliquer les protocoles en classe ? Y aurait-il des résultats probants ?

Nous nous sommes entourés des compétences d'un conseiller pédagogique

expérimenté, Julien Garbarg, et d'une doctorante en psychologie cognitive, Marie Létang, afin d'accompagner au mieux les enseignants au quotidien, répondre à leurs questions, concevoir et leur envoyer les tests et protocoles, analyser les données...

Les retours de la première année de cette expérience collaborative ont dépassé nos espérances : l'engagement des quelque 150 enseignants expérimentateurs a été total et a permis de remonter au laboratoire de nouvelles erreurs dues à un défaut d'inhibition (erreurs qui seront spécifiquement analysées) et de valider l'intérêt d'entraîner cette faculté d'inhibition par certaines activités pédagogiques régulières dans la classe. Et ce n'est que le début...

Après nous être demandé pourquoi faire de la recherche collaborative (section 1), nous reviendrons plus en détail sur la mise en œuvre de ce dispositif « Du labo à l'école » (sections 2 et 3).

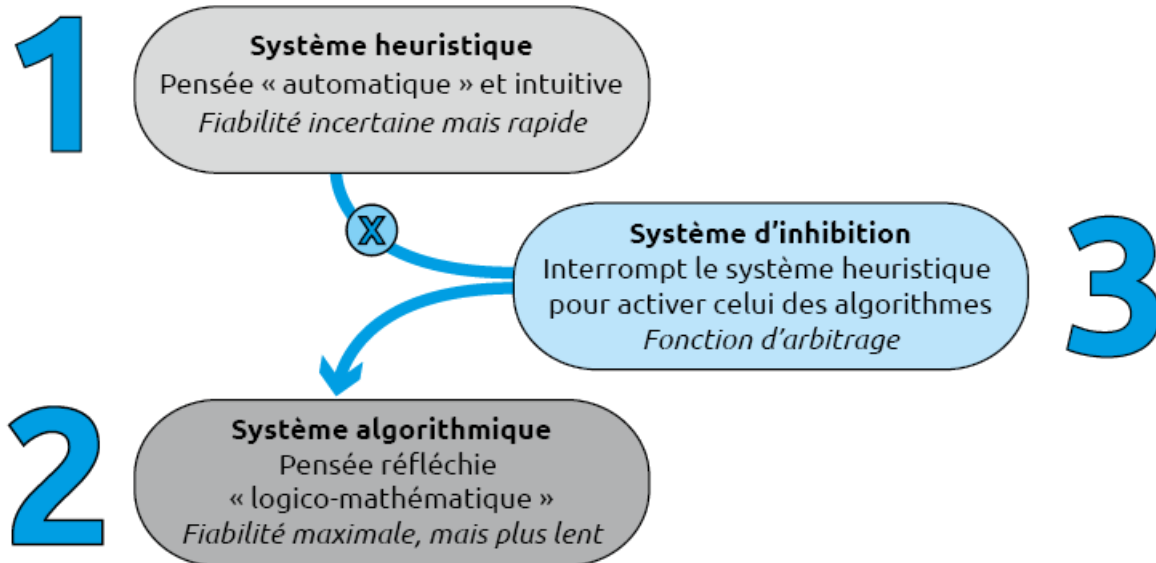
I. Pourquoi faire de la recherche collaborative ?

1 La recherche classique en neurosciences

Depuis une quarantaine d'années, les recherches en neurosciences cognitives se développent considérablement et aboutissent à de nouvelles théories sur le développement et le fonctionnement du cerveau. L'une d'entre elles est celle d'Olivier Houdé, directeur du LaPsyDÉ (Laboratoire de Psychologie du Développement et de l'Éducation de l'enfant) : la théorie de l'inhibition cognitive. Cette dernière se base sur l'idée qu'au quotidien, lorsque nous souhaitons répondre à une question ou une tâche, notre cerveau fait appel à trois stratégies cognitives. La première est une stratégie heuristique qui est très rapide, très efficace, qui fonctionne très bien, très souvent, mais pas toujours. La seconde est une stratégie

algorithmique, ou règle exacte, qui elle est plutôt lente, réfléchie et cognitivement coûteuse mais qui aboutit toujours à la bonne solution. La troisième stratégie, celle de l'inhibition cognitive, permet à chacun d'entre nous de résister à la première réponse automatique qui nous vient en tête (et qui peut nous faire échouer), pour nous permettre d'activer la réponse algorithmique (qui elle nous fera réussir immanquablement). Le système d'inhibition a donc une fonction d'arbitrage qui permet d'interrompre une stratégie heuristique au bénéfice d'une stratégie algorithmique. Lorsqu'on transfère cette théorie aux erreurs que peuvent faire les élèves en classe, on constate qu'un grand nombre d'entre elles ne sont pas dues à un manque de connaissance de la règle à suivre, mais bien à un manque d'inhibition de la stratégie heuristique. L'inhibition a donc une fonction essentielle dans les apprentissages scolaires.

Illustration de la théorie des trois systèmes cognitifs de raisonnement et d'apprentissage (O. Houdé et G. Borst)



Pour illustrer cette théorie, prenons un exemple que vous avez sûrement déjà retrouvé dans les dictées de vos élèves : les fautes du type « je les manges ». Dans le cas de cette erreur, l'heuristique utilisée par vos élèves est « après les, je mets un 's' ». Or ici, cette stratégie automatique et intuitive les fait tomber dans un piège. Pour ne pas faire l'erreur, vos élèves ont donc besoin de bloquer cette heuristique pour activer l'algorithme « un verbe s'accorde avec son sujet », qui leur permet alors de trouver la bonne terminaison du verbe. C'est le rôle de l'inhibition, le système 3 de pensée : bloquer l'heuristique et activer l'algorithme.

Lea.fr : une communauté pédagogique de plus de 90000 enseignants

[Lea.fr](#), créé en 2014, est le premier réseau pédagogique et collaboratif des enseignants du primaire, des étudiants préparant le CRPE et des professionnels de la communauté éducative. Cette communauté d'enseignants du primaire réunit aujourd'hui plus de 90 000 membres.

L'ADN de ce service en ligne est d'accompagner les professionnels de l'école primaire au quotidien dans leur métier en leur permettant d'échanger, questionner mais aussi de tester en direct des propositions pédagogiques innovantes.

La spécificité de [Lea.fr](#) repose sur la réalisation de groupes de travail. D'une part, le site s'attache à stimuler l'esprit créatif et le professionnalisme des enseignants en leur proposant de tester des méthodes pédagogiques innovantes en classe avec leurs élèves. Suite aux confrontations des méthodes écrites par les auteurs experts et de la réalité éprouvée sur le terrain, plusieurs de ces « Méthodes testées en classe » enrichies par les retours des enseignants (leurs commentaires, remarques...) sont validées et publiées depuis quelques années aux Éditions Nathan Pédagogie. Une collection, riche de ce travail collaboratif sur le site, permet ainsi de mettre en œuvre les solutions éprouvées sur le terrain.

D'autre part, les groupes de travail peuvent aussi être de véritables groupes d'expérimentation. En effet, [Lea.fr](#) est aujourd'hui le premier outil de recherche collaboratif entre les chercheurs et les enseignants. Par exemple, une expérimentation en neurosciences cognitives en partenariat avec Olivier Houdé, Grégoire Borst et leur laboratoire LaPsyDÉ est actuellement en cours.

L'objectif de cette communauté d'enseignants est de partager et diffuser les bonnes pratiques, les idées stimulantes, les innovations pédagogiques qui naissent tous les jours dans les classes. Elle permet de

mutualiser les connaissances des enseignants, mais aussi de proposer des ressources à ces mêmes enseignants, de rechercher des idées d'animation de classe, de s'informer, de se former à l'aide de modules vidéos, de consulter des documents pédagogiques, d'échanger avec les membres de la communauté, ou encore de participer à des projets de travail collaboratif, par exemple en sciences cognitives et du cerveau.

Pour valider cette théorie des trois systèmes cognitifs, mais également l'ensemble des théories en neurosciences, il est nécessaire de passer par l'expérimentation scientifique, qu'elle soit comportementale ou en imagerie cérébrale. Lorsqu'on fait un état des lieux de ce qui se fait actuellement, on constate que la plupart des interventions pédagogiques développées et proposées en laboratoire sont testées dans des conditions scientifiques optimales : directement par le chercheur, en individuel dans une salle annexe à la classe, avec un ordinateur par élève... ; et par conséquent sur des échantillons d'élèves restreints. Or, si nous souhaitons que ces recherches scientifiques soient validées dans des conditions plus écologiques¹, il est désormais essentiel que la recherche scientifique s'ouvre aux enseignants en créant des modules de recherche collaborative. C'est pour cette raison que le LaPsyDÉ s'est associé avec [Lea.fr](https://lea.fr) pour, ensemble, créer une grande recherche collaborative autour des neurosciences cognitives.

2 Les intérêts d'une recherche collaborative

a. Créer un lien entre le laboratoire et les enseignants

Le fonctionnement interactif de [Lea.fr](https://lea.fr) permet d'établir un échange et un lien fort entre les chercheurs et les enseignants. Ce contact a deux objectifs principaux. Le premier est d'informer les enseignants sur les découvertes en psychologie et neurosciences des dernières années. Ces découvertes concernent principalement le

développement et le fonctionnement du cerveau, mais aussi les méthodes d'interventions possibles permettant, par exemple, de renforcer le contrôle inhibiteur des élèves. Les enseignants peuvent aussi interagir avec les chercheurs, leur poser directement leurs questions ou même leur demander de l'aide pour agir et accompagner les élèves en difficulté. Mais ce lien n'est pas à sens unique ! Le second objectif est de permettre aux chercheurs de mieux connaître le terrain qu'ils étudient, notamment grâce aux retours qualitatifs sur la faisabilité des différentes interventions pédagogiques proposées, en situation de classe. Il s'agit donc d'adapter au mieux les contenus proposés en classe par les enseignants aux récentes découvertes neuroscientifiques mais aussi aux contraintes que peut représenter la classe.

« Il s'agit donc d'adapter au mieux les contenus proposés en classe par les enseignants aux récentes découvertes neuroscientifiques mais aussi aux contraintes que peut représenter la classe. »

b. Repérer un maximum de situations de blocages cognitifs

Au cours des dernières années, le LaPsyDÉ a déjà eu l'occasion de repérer une dizaine de situations où les élèves sont influencés par leurs heuristiques trompeuses. Cependant, pour aller plus loin et en repérer davantage, il est maintenant nécessaire d'interroger les acteurs principaux qui y sont confrontés chaque jour : les enseignants. La création d'une cartographie d'heuristiques à inhiber est donc indispensable dans cette recherche collaborative pour connaître les réels besoins du terrain. C'est grâce à ce premier recensement de blocages cognitifs que nous pouvons dans un second temps construire des interventions pédagogiques adaptées aux difficultés des élèves.

c. Valider les théories du laboratoire à grande échelle et en condition de classe

La communauté [Lea.fr](https://leaproject.org/) étant constituée de plus de 90000 enseignants, nous avons pu exposer notre projet de recherche collaborative à une vaste communauté de personnes pouvant être intéressées et motivées par ce type de démarche. Nous avons ainsi pu recruter un grand nombre d'enseignants prêts à se former aux neurosciences et à appliquer des protocoles de recherche avec leurs élèves, dans leur classe. [Lea.fr](https://leaproject.org/) nous a donc permis de faire de la recherche dans des conditions écologiques et à grande échelle, ce qui semblait essentiel après les découvertes et expérimentations en laboratoire faites au LaPsyDÉ ces dernières années. En effet, cette écologie est importante car elle nous permet de vérifier si les découvertes sont confirmées lorsque la recherche interventionnelle est menée directement par l'enseignant, mais aussi si elles sont adaptables à un fonctionnement « normal » de classe. De plus, le travail à grande échelle permet d'affiner ces découvertes et d'être certain qu'elles sont représentatives d'un maximum d'élèves, et pas seulement de ceux habitant les quelques villes où se mènent habituellement les recherches.

La cartographie des heuristiques

Pour répondre à la nécessité de mieux comprendre la logique des erreurs commises par les élèves en classe, nous avons demandé à l'ensemble des enseignants de nous remonter les heuristiques trompeuses qu'ils retrouvaient dans leur classe, ainsi que leur contexte d'apparition (en maths, en français, etc.) et leur fréquence (le nombre d'élèves concernés). Cette discussion a été menée sur [Lea.fr](https://lea.fr) et grâce à l'investissement et l'observation en classe des enseignants, nous avons pu relever près de 80 heuristiques sur les 3 cycles du primaire. En voici un exemple :



Le contexte

CatherineC - sam 25/11/2017 - 09:25

Résolution de problèmes en CE2 : Nous travaillons sur « plus de », « moins de ». 4 problèmes dont 2 « pièges ». Maxou a 27 billes dans sa trousse. Il en a 12 de plus que Tina. Combien Tina a-t-elle de billes ?

7 élèves sur 22 ayant fait ce problème ont répondu : $27 + 12 = 39$.

Bonne réponse = 15

La fréquence

L'heuristique
« après plus j'additionne »

« [Lea.fr](https://lea.fr) nous a donc permis de faire de la recherche dans des conditions écologiques et à grande échelle, ce qui semblait essentiel après les découvertes et expérimentations en laboratoire faites au LaPsyDÉ ces dernières années. »

Avec cette recherche collaborative, nous souhaitons donc observer s'il est possible de faire de la recherche scientifique déclinée en classe, et surtout si les découvertes faites en laboratoire se répètent lorsque la recherche est menée par des enseignants, sur le terrain et sans intervention directe du chercheur.

II. Comment passer du laboratoire à l'école ?

Pour développer une recherche collaborative et valider des interventions pédagogiques, il est essentiel de s'appuyer sur les recherches scientifiques réalisées en laboratoire pour ensuite les adapter et les transférer à l'école. Il est donc essentiel de se baser sur les principes de la méthodologie expérimentale pour ensuite les ajuster aux contraintes pédagogiques que représente la vie de classe.

1 La méthodologie scientifique

Elle est composée de trois éléments essentiels : l'évaluation, la constitution de groupes et la posture de l'expérimentateur.

a. L'évaluation

Le premier élément essentiel est d'évaluer les élèves avant et après l'intervention. En recherche expérimentale, ces évaluations s'appellent des pré- et post-tests. Le pré-test, avant l'intervention, permet d'évaluer le niveau initial des élèves. Cette évaluation peut être composée d'un ou plusieurs exercices. Ensuite le post-test, après l'intervention, permet de mesurer l'évolution des élèves. Bien souvent, ces deux évaluations sont analogues afin de mesurer exactement l'évolution entre les deux.

« Le pré-test, avant l'intervention, permet d'évaluer le niveau initial des élèves. Ensuite le post-test, après l'intervention, permet de mesurer l'évolution des élèves. »

b. La constitution de groupes

Le deuxième élément essentiel est de diviser la classe en deux groupes. Classiquement, il est nécessaire de répartir les élèves en deux groupes : l'un expérimental, qui suit l'intervention pédagogique ciblée que l'on évalue ; et l'autre contrôle, qui lui ne la reçoit pas. Pour que cette répartition soit optimale, il est préférable que les deux groupes soient d'un niveau comparable avant toute intervention pédagogique. Il s'agit donc de répartir les élèves dans les groupes en fonction de leur âge, leur niveau de classe, leur niveau scolaire et leur sexe. De cette façon, nous pouvons conclure scientifiquement à l'efficacité ou non de l'intervention : si les résultats au post-test du groupe expérimental sont significativement meilleurs que ceux du groupe contrôle, c'est que l'intervention pédagogique a eu un effet positif.

c. La posture de l'expérimentateur

Le troisième élément essentiel est de respecter le protocole et d'adopter une posture neutre. Pour évaluer l'effet d'une intervention en contrôlant les biais expérimentaux pouvant intervenir, l'expérimentateur se doit de rester au plus près du protocole de recherche. C'est cette condition qui permet ensuite d'assurer la répliquabilité des résultats et de gommer l'effet d'expérimentateur (tel l'effet maître) qui pourrait apparaître. L'expérimentateur se doit également d'avoir une attitude neutre envers l'ensemble des participants. Autrement dit, il est essentiel qu'il ait un comportement similaire avec les élèves des deux groupes. Il doit donc prendre garde à ne pas tomber dans l'effet Pygmalion : « Je suis ce que tu penses de moi » (se dirait l'élève) et influencer les résultats des élèves par les attentes qu'il a envers eux, en fonction de leur groupe d'appartenance (expérimental ou contrôle). Enfin, il ne doit pas informer les élèves des concepts et théories scientifiques sous-jacents à l'expérimentation pendant

toute la durée de celle-ci. Il peut en revanche les informer qu'ils participent à une recherche scientifique qui l'oblige à diviser la classe en deux groupes qui ont des instructions et/ou activités différentes (sans pour autant préciser et expliciter les concepts de groupe expérimental et groupe contrôle).

« Pour évaluer l'effet d'une intervention en contrôlant les biais expérimentaux pouvant intervenir, l'expérimentateur se doit de rester au plus près du protocole de recherche. »

2 Les aménagements nécessaires pour passer du laboratoire à l'école

Plusieurs aménagements sont nécessaires lorsque l'on souhaite transformer une recherche de laboratoire en une recherche collaborative de terrain. Il s'agit là de trouver le juste milieu entre les nécessités scientifiques et les contraintes pédagogiques.

a. Informer et rassurer les parents et les inspecteurs de l'Éducation nationale

L'inscription volontaire des enseignants sur [Lea.fr](https://leaproject.org/) fait partie de leur liberté pédagogique. Mais, avant le début du projet, nous avons transmis aux parents et aux IEN un courrier, par le biais de l'enseignant, les informant précisément de ce projet de recherche collaborative (objectifs généraux, déroulé du projet, durée) et les rassurant quant à l'anonymat des données transmises potentiellement au laboratoire.

b. Vérifier le niveau de connaissance

La formation est un point essentiel lorsqu'on souhaite faire mener une recherche à des enseignants « non-scientifiques ». Il a donc fallu

leur proposer une formation aux notions théoriques (les découvertes en neurosciences) et méthodologiques (les critères nécessaires pour monter une recherche). Pour ce faire, nous avons fait appel à Julien Garbarg, conseiller pédagogique, pour rédiger des fiches explicatives à destination des enseignants, et nous avons ouvert une discussion sur [Lea.fr](https://leaproject.org/) où les enseignants pouvaient interagir avec les chercheurs et poser l'ensemble de leurs questions. On y discutait par exemple d'heuristiques, d'algorithmes cognitifs et d'inhibition préfrontale.

Cette phase de formation s'est terminée par un QCM qui nous a permis de nous assurer de la bonne compréhension de l'ensemble des enseignants.

c. Transformer les évaluations informatisées en évaluations papier-crayon

Classiquement, lorsque l'on fait de la recherche en laboratoire, on réalise les évaluations de pré- et post-tests sur ordinateur avec des logiciels spécifiques. De cette façon, on peut mesurer le score de bonnes réponses des élèves, mais également leur temps de réaction. Dans le cas de notre recherche, il était difficile de demander à chaque enseignant d'évaluer ainsi individuellement chaque élève de sa classe. Nous avons donc transformé les évaluations de laboratoire en tests papier-crayon réalisables en groupe classe.

d. Adapter les interventions pédagogiques individuelles à une réalisation en groupe classe

La plupart des interventions pédagogiques de laboratoire se font de manière individuelle. De cette façon, il est possible de s'adapter au niveau de chacun et de contrôler de nombreux biais, tel que l'influence des pairs. Or, si on souhaite réaliser ces interventions sur le terrain, il est essentiel de les modifier pour que les enseignants puissent les faire passer à plusieurs élèves en même temps (demi-

classes ou quarts de classe).

e. Relever et transmettre les données des élèves

Pour regrouper et analyser les performances des élèves aux évaluations de pré- et post-tests, il a fallu que les enseignants puissent nous les transmettre. Pour ce faire, nous avons demandé à chaque enseignant de nous envoyer les données de leurs élèves en respectant une procédure d'anonymisation totale des données. L'ensemble des données recueillies est donc dépourvu d'informations personnelles, tels que le prénom des élèves ou l'e-mail des enseignants.

III. Comment s'est passée la première année de recherche collaborative ?

1 Une recherche en trois phases

Pour lancer cette recherche collaborative et commencer à nouer des liens entre chercheurs et enseignants de France et de toute la francophonie, nous avons organisé en septembre 2017 une conférence interactive² au cours de laquelle Olivier Houdé et Grégoire Borst, co-directeurs du LaPsyDÉ, ont pu expliquer à plus de 5 000 élèves comment fonctionne leur cerveau. Grâce à l'interactivité de cette conférence, les élèves ont posé leurs questions et obtenu des réponses en direct. Nous avons pu constater l'engouement des élèves et des enseignants dès cette première étape, puisqu'ils ont posé pas moins de 800 questions ! Nous avons ensuite lancé les inscriptions pour la recherche collaborative : 130 enseignants s'y sont engagés pour l'année 2017 –

2018, ce qui correspond à près de 3 600 élèves. Grâce à la communauté de [Lea.fr](https://leaproject.fr/), nous avons eu la chance de disposer d'un échantillon de recherche des plus représentatifs, puisque nous avons eu des classes de toute la France métropolitaine et de la Guadeloupe, Martinique, Mayotte, La Réunion, mais aussi de la Belgique, de l'Espagne, du Maroc et du Canada (Québec).

Une fois l'échantillon composé, nous avons commencé les expérimentations qui se sont déroulées tout au long de l'année scolaire 2017-2018, en trois phases.

a. Phase 1 : un entraînement au contrôle inhibiteur en général

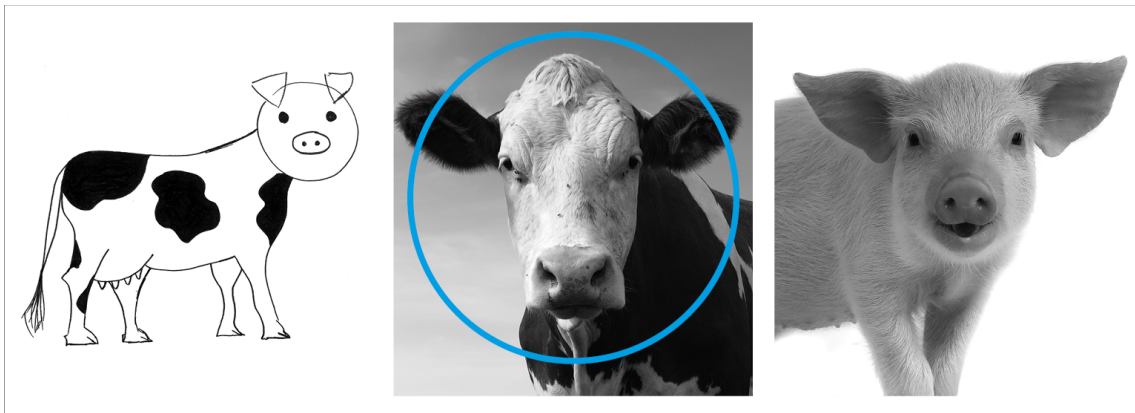
L'inhibition étant une fonction essentielle et indispensable pour réussir de nombreuses tâches à l'école mais aussi dans la vie de tous les jours, il nous a paru nécessaire de proposer un programme l'entraînant, avec pour objectif de rendre les élèves plus résistants aux pièges qu'ils peuvent rencontrer quotidiennement. Pour tester l'effet de cette intervention pédagogique dans les classes, nous avons suivi une méthode scientifique en trois temps – le pré-test, l'entraînement sur 5 semaines et le post-test – avec la répartition des élèves en deux groupes : un groupe contrôle et un groupe expérimental.

Le pré-test a permis d'évaluer le niveau d'inhibition initial de chaque élève. Pour s'adapter aux capacités de tous, nous avons proposé deux tests. Le premier, le Stroop-animal, concernait les élèves non-lecteurs (de la PS au CP) qui devaient déterminer à quel animal correspond le corps d'un animal hybride (par exemple une tête de cochon avec un corps de vache, *cf.* encadré). Le second, le Stroop-couleur, concernait les élèves lecteurs (du CE1 au CM2). La consigne était de déterminer la couleur de l'encre d'un mot (« BLEU » écrit en rouge par exemple). Dans ces deux évaluations, les élèves avaient besoin de faire appel à leurs capacités inhibitrices pour réussir : inhiber la tête de l'animal dans le premier cas et la lecture du mot écrit dans le second. Après ce premier exercice réalisé en groupe

classe, nous connaissions donc le niveau de contrôle inhibiteur de chacun. Les enseignants pouvaient alors passer au deuxième temps de ce protocole.

Exemple d'item au Stroop-animal : à quel animal correspond le dessin ?

La consigne est d'identifier selon le corps de l'animal.



L'entraînement s'est déroulé sur une période de 5 semaines, à raison de 4 séances par semaine d'une quinzaine de minutes chacune. Chaque enseignant a divisé sa classe en deux groupes : le groupe expérimental et le groupe contrôle, pour pouvoir proposer deux types d'entraînement. Le premier, pour le groupe expérimental, regroupait des activités ludiques entraînant le contrôle inhibiteur des élèves. Le second, pour le groupe contrôle, rassemblait des activités construites sur une base identique à celles du premier groupe, mais avec des consignes différentes qui, de ce fait, n'entraînaient pas le contrôle inhibiteur des élèves (seule cette variable cognitive changeait). Enseignants et élèves ont donc joué à ces activités quotidiennement en demi-classe, sur une période de 5 semaines.

Le post-test était construit sur la même base que le pré-test. Il s'agissait, une fois de plus, de mesurer le niveau d'inhibition des élèves avec le même test qu'à la première évaluation. L'objectif était

ici de mesurer l'évolution du contrôle inhibiteur des élèves et mesurer si, oui ou non, suivre un programme de 5 semaines au contrôle inhibiteur était efficace, par rapport à un groupe qui jouait à des jeux n'exerçant pas le contrôle inhibiteur.

Dans ce protocole, on s'attendait à ce que le groupe qui jouait à des jeux entraînant l'inhibition ait ensuite de meilleures capacités inhibitrices générales et une meilleure résistance face aux pièges.

b. Phase 2 : identification de blocages cognitifs spécifiques

Dans l'idée de renforcer la notion d'allers-retours entre le laboratoire et l'école, nous avons choisi de partir des erreurs que les enseignants nous ont remontées lors de la cartographie des heuristiques et de créer à partir de celles-ci des exercices. L'objectif de ces exercices, à réaliser en groupe classe, était d'évaluer les erreurs commises par les élèves pour en connaître le contexte (« dans quel type d'exercice retrouvons-nous ces erreurs ? »), la fréquence (« combien d'élèves commettent ces erreurs ? ») et le développement (« à quel âge les élèves tombent-ils dans ce piège, et à quel âge arrivent-ils à inhiber cette stratégie ? »). L'ensemble de ces informations nous a permis de mieux comprendre les erreurs des élèves et ensuite de développer des interventions pédagogiques autour d'elles, pour aider les élèves à les contourner.

Exemple d'exercice permettant d'évaluer les erreurs heuristiques

Lors de la cartographie d'heuristiques, plusieurs enseignants ont remonté l'erreur que leurs élèves faisaient en soustraction pour des nombres à deux chiffres : « $25 - 18 = 13$ car on soustrait toujours le plus petit chiffre au plus grand » (ici $8 - 5$ au lieu de $5 - 8$). C'est ce que le psychologue Daniel Kahneman appelle l'heuristique de substitution qui consiste à remplacer, par paresse cognitive, une solution compliquée (avec effort) par une solution plus (trop) simple. Cette heuristique de soustraire le plus petit chiffre au plus grand fonctionne très bien, très souvent, mais pas toujours. En effet, comme cet exemple le montre, lorsque la soustraction nécessite la pose d'une retenue, soustraire le plus petit chiffre au plus grand fait tomber dans un piège.

Pour mieux connaître le contexte, la fréquence et le développement de cette heuristique trompeuse en classe, nous avons construit un exercice composé de deux sortes d'items : les items congruents où l'heuristique fonctionne (par exemple $28 - 15$) et les items interférents (ou incongruents) où l'heuristique fait tomber dans le piège (par exemple $25 - 18$). De cette façon nous pouvons regarder si les élèves sont bien capables de soustraire les nombres à deux chiffres (réussite aux items congruents) malgré les erreurs heuristiques qu'ils font (échec aux items incongruents). Enfin, nous avons demandé aux enseignants de renseigner l'âge et la classe de chaque élève pour connaître le développement de l'heuristique.

Item congruent

$$\begin{array}{r} 28 \\ - 15 \\ \hline .. 3 \end{array}$$

Item interférent

$$\begin{array}{r} 25 \\ - 18 \\ \hline .. 3 \end{array}$$

L'heuristique rapide conduit, en mémoire de travail, à inverser verticalement les chiffres et soustraire le plus petit au plus grand comme on le fait d'habitude, ici $8 - 5$.

c. Phase 3 : un apprentissage au contrôle inhibiteur ciblé sur une heuristique particulière

Toujours dans l'optique d'un aller – retour entre les chercheurs et les enseignants, nous avons sélectionné plusieurs erreurs heuristiques que les enseignants nous ont rapportées et nous avons construit des apprentissages spécifiques visant à éviter aux élèves de tomber dans les pièges. Pour cela, nous avons développé un protocole d'apprentissage pour chaque erreur sélectionnée, en nous basant sur la théorie développée et testée par Olivier Houdé et son équipe du LaPsyDÉ. Dans cette pédagogie basée sur la métacognition et l'inhibition, il s'agit, en plus de rappeler la règle à l'élève, de mettre en avant le piège à éviter, en utilisant un outil spécifique : l'Attrape-piège. C'est une planche transparente composée de deux parties : une partie hachurée représentant le processus d'inhibition de l'heuristique trompeuse, et une partie centrale non hachurée, qui elle, représente le processus d'activation de l'algorithme exact (cf. encadré « Une application de l'apprentissage de l'inhibition sur la comparaison de fractions »).

Pour tester cette pédagogie à grande échelle, les enseignants participant au groupe de recherche sur [Lea.fr](https://leaproject.fr) ont choisi le protocole qui convenait le mieux à leurs élèves. Afin que l'apprentissage soit bénéfique, il fallait que les élèves, avant l'intervention, soient en échec dans la condition où l'heuristique ne fonctionne pas, mais pour autant connaissent la règle ou algorithme qui permet de réussir (par exemple dire que $\frac{2}{5}$ est plus grand que $\frac{2}{4}$ car 5 est plus grand que 4 mais pour autant savoir que 0,4 est plus petit que 0,5). Autrement dit, pour qu'un apprentissage leur soit bénéfique, il fallait que les élèves connaissent l'algorithme exact, mais qu'ils n'arrivent pas à inhiber leur heuristique sans intervention pédagogique. Une fois de plus, étant dans une démarche d'évaluation de l'intervention pédagogique, nous avons fonctionné selon une méthodologie scientifique en trois temps : le pré-test, l'apprentissage et le post-test.

« Pour qu'un apprentissage leur soit bénéfique, il fallait que les élèves connaissent l'algorithme exact, mais qu'ils n'arrivent pas à inhiber leur heuristique sans intervention pédagogique. »

La phase de pré-test devait permettre de mesurer les capacités des élèves dans la notion ultérieurement abordée. Cette évaluation papier-crayon à réaliser en groupe classe donnait ainsi le niveau de base de chacun des élèves.

La phase d'apprentissage a débuté par une division de la classe en deux groupes : le groupe expérimental et le groupe contrôle. Dans le groupe expérimental, l'enseignant faisait un rappel de la règle à suivre, l'algorithme, ainsi qu'une mise en avant du piège à éviter, l'heuristique. Les élèves ont ensuite pu mettre en application le mini-cours théorique et utiliser l'Attrape-piège d'inhibition/activation pour manipuler plusieurs items de mise en situation. Pour chaque situation, les élèves avaient deux cartes : l'une représentant l'heuristique (et donc la mauvaise solution) à mettre sous les hachures (zone d'inhibition) de l'Attrape-piège et l'autre illustrant l'algorithme (la bonne réponse), à placer dans le rond central (zone d'activation). Parallèlement, pour les élèves du groupe contrôle, l'enseignant rappelait la règle à suivre et faisait manipuler aux élèves des cartes sans Attrape-piège (pour ne pas mettre en avant le besoin d'inhiber l'heuristique-piège).

La phase de post-test était identique au pré-test et se déroulait en deux temps : une première évaluation directement consécutive à l'apprentissage (le post-test immédiat) et une seconde évaluation, une semaine après l'apprentissage (le post-test différé) pour mesurer les effets à plus long terme – ou maintien de l'apprentissage.

À l'issue de ce protocole d'apprentissage, on s'attendait à ce que les élèves ayant suivi un apprentissage métacognitif mettant en avant le

piège à éviter (autrement dit l'heuristique à inhiber) aient de meilleurs résultats que les élèves qui avaient seulement reçu un apprentissage classique (contrôle) rappelant la règle à suivre, l'algorithme.

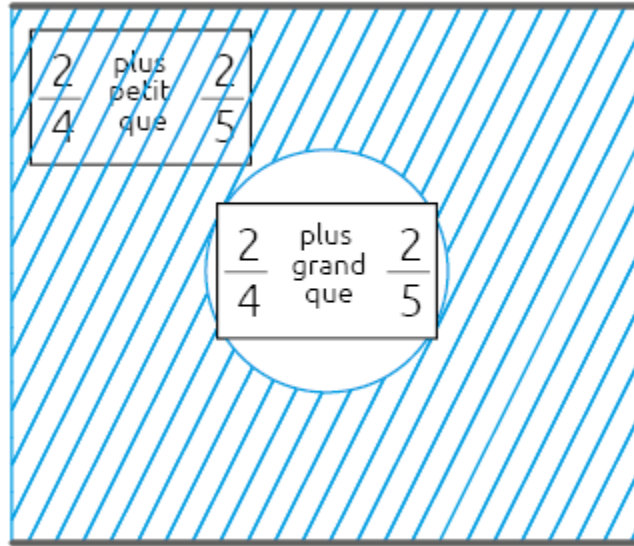
2 Un bilan positif

À la fin de cette première année de recherche collaborative, l'analyse des retours chiffrés et qualitatifs est prometteuse. Ces premiers retours concernent essentiellement l'entraînement au contrôle inhibiteur, les autres expériences n'ayant pas encore été analysées à l'heure où cet ouvrage est publié.

Une application de l'apprentissage de l'inhibition sur la comparaison de fractions

Lors de la cartographie d'heuristiques, plusieurs enseignants nous ont remonté que les élèves avaient des difficultés dans la comparaison de fractions. Un élève ne vous a-t-il jamais dit que $\frac{2}{4}$ était plus petit que $\frac{2}{5}$ car 4 est plus petit que 5 ? En effet, nous avons remarqué que les élèves avaient souvent tendance à transférer les rapports de grandeur des nombres entiers aux fractions. C'est une heuristique. Lorsque les fractions ont des numérateurs communs, cette heuristique fait tomber dans un piège. Il faut alors l'inhiber pour activer l'algorithme « pour comparer deux fractions, il faut comparer leur résultat exact de division ».

Pour aider les élèves à surmonter cette heuristique, nous avons construit un apprentissage métacognitif autour de la comparaison de fractions. Après un rappel de l'algorithme et une mise en avant de l'heuristique, les élèves sont passés à la phase de manipulation avec l'Attrape-piège. En voici l'illustration ci-dessous. Chaque élève avait deux cartes : une représentant la bonne réponse (la réponse algorithmique), et l'autre représentant la mauvaise réponse (la réponse heuristique). Ils devaient alors placer sous les hachures la carte-réponse heuristique, pour être inhibée, puis placer au centre, la carte-réponse algorithmique, pour être activée. Et ainsi s'entraîner intensément.



a. Des enseignants et des élèves impliqués et satisfaits

Les enseignants n'ont pas hésité à nous faire, sur [Lea.fr](https://leaproject.fr), un retour qualitatif sur cet entraînement au contrôle inhibiteur.

– **L'organisation et la mise en place** de la recherche n'ont pas posé de problème aux enseignants, tout comme le fait que la classe ait été séparée en deux groupes, expérimental et contrôle. En revanche, ces activités quotidiennes ont parfois demandé une réorganisation de la classe (spatiale et/ou temporelle).

– **Les activités d'entraînement** étaient, d'après les enseignants, adaptées à l'âge et au niveau de leurs élèves et assez nombreuses pour ne pas être redondantes. Concernant le niveau de stimulation des activités, les enseignants ont validé une grande partie d'entre elles.

– **Le retour des enseignants quant à leur ressenti et à leur vécu** a montré qu'une bonne partie d'entre eux pensait qu'un entraînement groupal n'était pas un frein à la progression des élèves, par rapport à un entraînement individuel. Un tiers des enseignants a observé avec joie un changement d'attitude chez certains de leurs élèves, habituellement en retrait dans la classe.

– **Le ressenti et le vécu des élèves** ont ensuite été interrogés. En

général, les élèves ont apprécié les activités proposées durant cet entraînement et une bonne partie d'entre eux ont eu la sensation de progresser au fil des semaines.

Ces retours sont pour nous essentiels car ils nous permettront d'aller plus loin dans les années suivantes, et nous laissent constater à quel point les enseignants et les élèves se sont impliqués dans ce programme de recherche et y ont pris plaisir. En lançant cette recherche collaborative nous n'avions pas pour certitude que les enseignants et les élèves adhèreraient à ce mode de fonctionnement, assez éloigné d'une séquence pédagogique habituelle. Les retours que nous avons eus nous confortent donc dans l'idée de continuer ce projet, tout en adaptant les futurs protocoles de recherche aux remarques que nous avons pu recueillir, en veillant toujours à conserver une validité scientifique.

« Lorsqu'on regarde le cout d'inhibition au post-test, on remarque que le groupe expérimental a un cout d'inhibition significativement plus faible que celui du groupe contrôle. »

b. Des premiers résultats très encourageants

En supplément de ces retours qualitatifs positifs, les enseignants nous ont transmis les données aux pré- et post-tests de leurs élèves. Avec ces performances, nous avons pu calculer le cout d'inhibition au test de Stroop-couleur (où la consigne est de dénommer la couleur de l'encre d'un mot), en fonction du groupe (expérimental ou contrôle) et de l'évaluation (pré-test ou post-test). Il existe dans ce test deux types d'items : les items congruents (« bleu » écrit en bleu) qui ne demandent pas l'intervention de l'inhibition ; et les items interférents (« bleu » écrit en rouge) où il est nécessaire d'inhiber sa lecture. Le cout d'inhibition, représenté sur le graphique ci-dessous, est la différence du nombre de bonnes réponses entre la planche

d'items congruents et la planche d'items interférents. Par conséquent, un cout d'inhibition proche de 0 signifie que le participant n'alloue pas de cout supplémentaire au traitement d'un stimulus interférent, par rapport à un stimulus congruent. Cela montre donc de bonnes capacités inhibitrices. A contrario, un cout d'inhibition élevé signifie que l'élève a besoin d'un temps supplémentaire pour répondre aux items interférents, par rapport aux items congruents, ce qui révèle un contrôle inhibiteur moins efficace.

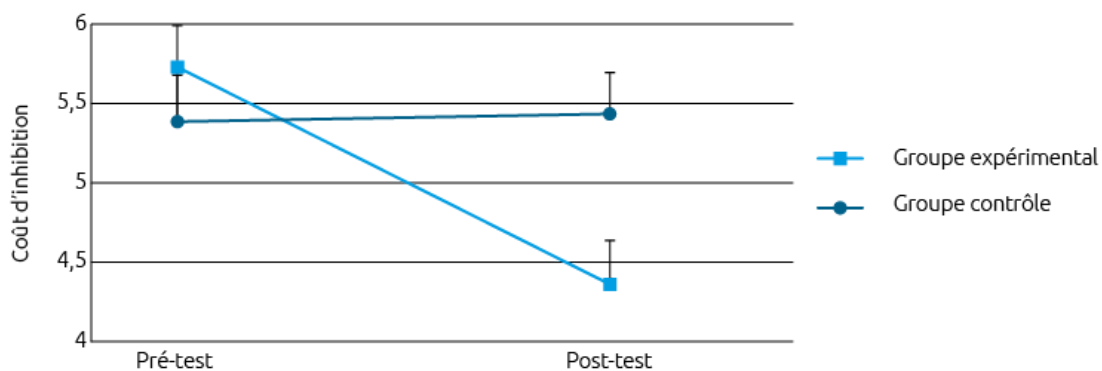
Au regard du graphique, les données aux évaluations remontées par les enseignants montrent donc qu'au pré-test, il n'existe pas de différence significative entre les élèves des deux groupes. Cette absence de différence signifie qu'avant toute intervention pédagogique, les deux groupes ont bien un niveau d'inhibition équivalent. C'est ce qui était recherché puisque les enseignants avaient pour mission de constituer au départ deux groupes de niveau similaire. En revanche, lorsqu'on regarde le cout d'inhibition au post-test, on remarque que le groupe expérimental a un cout d'inhibition significativement plus faible que celui du groupe contrôle. Ainsi, entre le pré et le post-test, le groupe expérimental a une diminution très nette de son cout d'inhibition, révélant un renforcement du contrôle inhibiteur, ce qui n'est pas le cas du groupe contrôle. Le groupe expérimental montre donc, suite à un entraînement au contrôle inhibiteur réalisé en classe, des capacités d'inhibition plus fortes que celles du groupe contrôle.

Ces résultats nous permettent dès lors de dresser deux constats. Le premier est qu'il est possible, avec seulement 15 minutes d'activités par jour en classe, de rendre des élèves plus résistants face à un conflit cognitif (dénommer la couleur de l'encre du mot « bleu » écrit en rouge). Ces données étant similaires à celles que l'on peut retrouver dans des conditions de laboratoire, nous arrivons au deuxième constat : il est possible de faire de la recherche collaborative où l'enseignant devient expérimentateur, sans

intervention directe du chercheur. Cela signifie qu'adapter une méthodologie scientifique à une vie de classe est possible, sans pour autant altérer l'effet de l'intervention pédagogique.

« Il est possible de faire de la recherche collaborative où l'enseignant devient expérimentateur, sans intervention directe du chercheur. Cela signifie qu'adapter une méthodologie scientifique à une vie de classe est possible, sans pour autant altérer l'effet de l'intervention pédagogique. »

Graphique représentant le coût d'inhibition au Stroop-couleur en fonction du groupe des élèves et de l'évaluation : plus le coût est faible, plus la capacité d'inhibition est grande.



La variabilité entre les élèves est représentée par les petites barres verticales (en statistiques c'est la moyenne des écarts à la moyenne).

Maintenant que nous avons démontré que la recherche collaborative est possible en classe, et que l'enseignant peut entraîner le contrôle inhibiteur de ses élèves, les prochaines phases d'entraînement lancées sur [Lea.fr](https://lea.fr) auront pour objectif de mesurer si cette amélioration se transfère ou non aux apprentissages scolaires. En effet, étant donné qu'il a été montré que pour apprendre, connaître la règle ne suffit pas et qu'il faut également inhiber les heuristiques

trompeuses (en maths, en orthographe, en raisonnement, etc.), il est nécessaire de regarder si ce gain de contrôle inhibiteur permet aux élèves de ne plus tomber dans les pièges heuristiques qu'on retrouve à l'école, mais également dans la vie quotidienne.

Conclusion

Cette première année d'expérimentation LaPsyDÉ – [Lea.fr](https://leaproject.fr) a eu pour vocation de valider une démarche et une méthodologie scientifiques dans le monde de l'éducation, à grande échelle, *via* une plateforme numérique. C'est désormais chose faite. Nous allons maintenant pouvoir poursuivre cette recherche collaborative entre chercheurs et enseignants et continuer de renforcer les allers-retours du labo à l'école en accompagnant les enseignants à agir face aux difficultés que rencontrent leurs élèves.

Les Essentiels

- Pour faire avancer les découvertes scientifiques en neurosciences du développement cognitif et en pédagogie, il est nécessaire de créer un lien entre les chercheurs et les enseignants.
- Le repérage des blocages cognitifs doit être fait par les enseignants qui y sont confrontés chaque jour. Les chercheurs ont ensuite pour mission de les aider à agir en classe.
- Faire de la recherche scientifique en classe par le biais de l'enseignant est possible, à condition d'y apporter des adaptations méthodologiques sur les conditions de passation, l'organisation de la classe et la position de l'enseignant face à ses élèves.
- Les enseignants sont prêts et ravis de s'investir dans une recherche collaborative, bien que celle-ci soit couteuse en temps et organisation.

1. Par conditions écologiques, on entend « conditions réelles de classe », c'est-à-dire en groupe classe où l'enseignant réalise seul l'intervention pédagogique.
2. Une conférence vidéo en direct où les élèves, depuis leur salle de classe, peuvent questionner et échanger avec les intervenants. Un replay s'ajoute ensuite, permettant aux classes qui n'étaient pas disponibles au moment du direct, de regarder la conférence en différé.

focus

Le point de vue d'une professeure des écoles sur la communauté pédagogique [Lea.fr](https://leaprof.fr)

par Laure Argouet-Stol

Enseignante depuis 20 ans, et en CE1 depuis 4 ans, je m'intéresse depuis toutes ces années au fonctionnement des apprentissages.

Une première approche des neurosciences

En 2012-2014, j'ai profité d'un congé parental pour reprendre mes études de master « recherche » en sciences de l'éducation. Lors de ces deux années d'études, j'ai rencontré des personnes de tous horizons et certaines m'ont conviée à quelques conférences sur les neurosciences. Progressivement, j'ai réalisé que mes questionnements par rapport aux apprentissages trouvaient davantage écho dans les neurosciences, qu'ils se tournaient davantage vers le comment faire : qu'est-ce qui entrave l'apprentissage... au niveau du fonctionnement du cerveau ? Mes lectures, recherches et discussions me confortaient dans l'idée que les récentes découvertes sur le fonctionnement du cerveau dans l'apprentissage doivent servir la pédagogie. En novembre 2017, c'est à l'occasion de la soutenance de thèse d'un ami de faculté, aujourd'hui docteur en psychologie cognitive, que j'ai découvert le

groupe collaboratif « Du labo à l'école » du portail [Lea.fr](https://leaproject.fr).

Une mise en œuvre *via* le site collaboratif [Lea.fr](https://leaproject.fr)

Dès mon retour de cette soutenance, j'ai consulté le site et participé à quelques tests qui ont validé ma candidature et mon inscription à cette recherche collaborative « Du labo à l'école » sur le site [Lea.fr](https://leaproject.fr) en partenariat avec LaPsyDÉ. J'étais très heureuse de trouver enfin le moyen de continuer mes recherches en sciences de l'éducation sans quitter mes élèves et la pratique de classe. En effet, suite à mon master, je souhaitais trouver un domaine de recherche « action » c'est-à-dire sur le terrain et au service de l'enseignement.

Dès la semaine suivante, je présentais brièvement à mes élèves ce projet de participer activement à une recherche scientifique sur le fonctionnement de nos cerveaux pendant l'apprentissage. De plus, [Lea.fr](https://leaproject.fr) m'a demandé s'il était possible de réaliser un film sur cette expérimentation, ce qui a enthousiasmé les parents et leurs enfants. Mon objectif est de faire prendre conscience aux élèves que l'apprentissage n'est pas magique et que même si certains semblent avoir des « facilités », c'est l'entraînement, la répétition et la prise de conscience de ce qu'on fait qui peuvent leur permettre de progresser. L'idée est donc que si les élèves ont une meilleure connaissance du fonctionnement de leur cerveau, en s'exerçant à le « dompter », ils pourront davantage progresser et mieux apprendre. Tout comme dans les petites classes, on apprend aux élèves à mieux maîtriser leur corps par les séances de motricité générale, puis de motricité fine, il me semble indispensable de faire prendre conscience aux élèves des capacités de leur cerveau à mémoriser, à raisonner...et de les entraîner à cela consciemment.

La première étape consistait en une conférence interactive intitulée « Le cerveau, comment ça marche ? » présentée par Olivier Houdé, directeur du LaPsyDÉ, et Grégoire Borst, directeur adjoint et à laquelle les élèves pouvaient participer en direct.

L'expérimentation a débuté en décembre 2017, dans ma classe, par la passation des pré-tests (Stroop couleurs et dictée de chiffres, tests d'inhibition et de mémoire de travail). Toutes les indications de passation étaient sur le site Lea.fr. Les équipes du LaPsyDÉ et de Lea.fr étaient là pour nous assister dans cette première étape. Le stress était au rendez-vous pour les élèves comme pour moi : nous avions des scrutateurs, et pas des moindres. Cette première étape s'est très bien déroulée.

Juste après les tests, nous avons eu le plaisir d'accueillir Olivier Houdé dans notre classe. Il a posé quelques questions aux élèves sur leur cerveau et sur son rôle. Il leur a dessiné un cerveau au tableau et en a expliqué les principales fonctions afin que chaque enfant prenne conscience qu'il a un extraordinaire cerveau ; les élèves devaient toujours rester assez « naïfs » sur le fonctionnement de leur cerveau afin de ne pas fausser les résultats tandis que les enseignants étaient informés et sensibilisés au protocole exact *via* le groupe collaboratif.

Les élèves étaient enchantés de cette première rencontre et impatients de savoir ce qui allait se passer ensuite. Cette première étape franchie, j'attendais avec impatience, moi aussi, la suite de l'expérimentation.

À partir de la rentrée de janvier, durant 5 à 7 semaines, il s'agissait d'entraîner au contrôle inhibiteur les élèves répartis en deux groupes, un expérimental et un contrôle. Cette phase était animée par l'enseignant et se déroulait sous forme de jeux qui développaient, pour le groupe expérimental, une « capacité » du cerveau sans qu'on explique le phénomène aux élèves pendant cette phase.

La préparation matérielle de cette phase a été assez longue : 9 jeux étaient à préparer, des jeux de cartes, en l'occurrence, qui devaient servir à plusieurs reprises et que de ce fait, j'ai préféré plastifier, puis massicoter.

Ensuite, j'ai repensé la disposition des deux groupes à entraîner car

seule, et sans temps de dédoublement de classe, il fallait que j'entraîne un groupe pendant que l'autre travaillait en autonomie. Dès la rentrée de janvier 2018, j'ai disposé la classe de manière à ce que mes deux groupes puissent s'entraîner par sous-groupes parfois, ou en groupe, soit contrôle, soit expérimental, avec moi pendant que le second groupe travaillait seul.

Cette période d'entraînement a été assez difficile à mener seule, surtout lors de la présentation des jeux, les deux premières semaines : découverte des jeux, explicitation des règles, mise en place dans les groupes. Finalement après les 5 semaines d'entraînement, les deux groupes fonctionnaient bien.

À mi-parcours, l'équipe de [Lea.fr](https://leaproject.fr/) est revenue filmer les deux groupes en entraînement, ce qui nous a permis d'échanger et d'affiner certains points d'organisation.

Mi-février 2018, à l'issue de cette phase d'entraînement, les élèves ont passé de nouveau les deux tests (Stroop couleurs et dictée de chiffres) dans le but de vérifier l'efficacité ou non de l'entraînement au contrôle inhibiteur. À cette occasion, Olivier Houdé a réinterrogé les élèves qui ont pu exprimer leurs impressions sur cette période d'entraînement. Dans l'ensemble, les élèves étaient très heureux d'avoir participé à cette expérimentation et contents d'avoir découvert de nouveaux jeux. Le groupe contrôle a aussi exprimé certaines frustrations car les règles de leurs jeux étaient moins « stimulantes ».

Par exemple, un Jacques-a-dit sans piège, des jeux d'imitation simple.

Leurs remarques ont été entendues par les expérimentateurs, ce qui permet un véritable aller-retour « du labo à l'école ».

Un premier bilan de l'expérimentation positif

Par rapport à mon objectif personnel initial, cette expérimentation a permis aux élèves de prendre conscience que leur cerveau existe et

qu'ils peuvent apprendre à mieux l'utiliser.

Cette expérimentation laisse des traces dans la vie de la classe : très fréquemment les élèves, ou moi-même, faisons référence aux pièges que nous tend notre cerveau afin de les éviter. Cette vigilance, demandée aux élèves du groupe expérimental pendant les entraînements est un nouvel atout pour l'apprentissage. Actuellement, il est difficile d'affirmer que cette expérimentation a des répercussions sur les résultats des élèves. Par contre, j'ai pu remarquer quelques interventions très pertinentes de leur part quand ils rencontrent des heuristiques à inhiber : « Ah oui, là y'a un piège ! » ou bien « là, il faut switcher »... Ces interventions m'encouragent à poursuivre cette expérimentation.

En parallèle de cette expérimentation, les chercheurs ont demandé aux enseignants contributeurs de leur fournir des « heuristiques » repérées dans leur classe. Certaines heuristiques ont été choisies par les chercheurs. Celles-ci serviront à des entraînements pour nos élèves.

Le temps consacré à cette expérimentation n'est pas investi au détriment d'autres disciplines, et a des répercussions positives pour l'apprentissage sur le long terme. Cette expérimentation rend explicite aux élèves un « mécanisme » de leur cerveau. Cette découverte les rassure quant aux erreurs « banales » qu'ils font et développe une nouvelle aptitude à « l'esprit critique » et à la « vigilance » pour prendre les commandes sur leur cerveau.

Cette culture scientifique commune dépasse déjà le champ de l'expérimentation ; j'ai pu le remarquer dans d'autres disciplines, et même dans des attitudes comportementales des élèves au quotidien. ●

Sciences, sciences cognitives et éducation : l'expérience de *La main à la pâte*

par Elena Pasquinelli

L'enseignement des sciences est un enseignement fondamental parce qu'il porte en soi des valeurs et des opportunités uniques. La science est ancrée sur la réalité, la mise en relation des idées avec les faits, le respect de la preuve et de l'argumentation collective. Les enfants possèdent en eux des aptitudes pour faire de la science, parce qu'ils sont naturellement curieux, explorateurs, expérimentateurs, capables de raisonner et de chercher des explications pour ce qu'ils observent, et ce dès le plus jeune âge. *La main à la pâte* a saisi ces valeurs et ces opportunités dès sa naissance en 1995, il y a plus de 20 ans. Elle est née d'une initiative de l'Académie des sciences en France pour promouvoir la science et les activités d'investigation à l'école. À ses débuts, *La main à la pâte* s'est nourrie des expériences internationales et des recherches en éducation pour favoriser une rencontre fructueuse des enfants avec la science, et leur permettre de développer leurs capacités de raisonnement. Aujourd'hui le panorama s'est enrichi d'une contribution fondamentale, celle qui vient des sciences cognitives. *La main à la pâte* s'y est donc ouverte pour mieux s'outiller. Cette ouverture a eu lieu en salle de classe, tout comme dans les lieux de formation et *via* des ponts jetés entre recherche et éducation. Nous avons cherché à développer des activités pour

les élèves, afin de leur permettre de mieux connaître des aspects fondamentaux de leur fonctionnement cognitif pour les apprentissages et le bien vivre ensemble. Nous avons eu une approche analogue avec les enseignants en formation, car le développement professionnel des acteurs de l'éducation peut profiter des connaissances stabilisées sur l'attention, la mémoire, le raisonnement, et les autres fonctions fondamentales du cerveau pour l'apprentissage. Enfin, nous avons souhaité créer des situations de rencontre et de collaboration entre scientifiques et enseignants pour ouvrir des voies nouvelles à la connaissance et à la pratique.

I. Le dispositif *La main à la pâte*

1 Les prémisses de l'enseignement des sciences

L'enseignement des sciences est un enseignement bien particulier. Au début du ^{xx}^e siècle, le philosophe et éducateur John Dewey considérait la méthode scientifique comme le modèle à suivre pour toute éducation « progressive », qu'il opposait à l'éducation traditionnelle. Une éducation progressive a essentiellement trois caractéristiques, dans la vision deweyenne : elle est fondée sur l'expérience vécue par les enfants dans leur quotidien, elle est centrée sur l'enfant, en tenant compte de ses capacités et de ses intérêts, et elle favorise une pensée réflexive, la capacité d'acquérir des connaissances par ses propres moyens. Tout enfant observe le monde qui l'entoure, en fait l'expérience, raisonne sur ce vécu. La science a donc un ancrage naturel dans la vie de l'enfant : elle lui offre une manière d'apprendre sans le détourner de ses intérêts. Le deuxième atout de la science est de s'appuyer sur une méthode rigoureuse pour réfléchir et établir, par exemple, si un argument est fondé, appuyé sur des faits, ou s'il relève d'une simple opinion. La science offre donc à l'enfant (et à l'adulte) des outils pour penser de manière plus réflexive, à partir de ses expériences. Elle lui permet de

ne pas s'arrêter sur ses opinions, sans pour autant accepter celles des autres comme un dogme. « S'il y a un savoir qui mérite d'être acquis », écrivait Dewey en 1938, « c'est celui de considérer un savoir comme tel et non comme opinion ou comme dogme ». Sur la base de ces considérations, Dewey proposait que la science joue un double rôle en éducation : être enseignée en tant que telle à l'école et inspirer l'enseignement de toutes les disciplines, qui serait ainsi basé sur une forme ou une autre d'investigation.

« La science a un ancrage naturel dans la vie de l'enfant : elle lui offre une manière d'apprendre sans le détourner de ses intérêts. »

2 Naissance et brève histoire de *La main à la pâte*

La pensée de John Dewey a fortement influencé celle d'autres penseurs en éducation : John Bruer et le mouvement de la réforme de l'enseignement des sciences qui a vu le jour aux USA dans les années 1960, puis des expérimentations menées dans les années 1980 par un physicien, lauréat du Prix Nobel : Leon Lederman. C'est par cette voie que l'idée d'un enseignement des sciences pour tous, fondé sur l'investigation, précoce, a fait son chemin dans l'esprit de trois physiciens français : Georges Charpak, également lauréat du prix Nobel de physique en 1992, Pierre Lénà et Yves Quéré, membres de l'Académie des sciences. En 1995, ces trois scientifiques sont frappés par le constat qu'en France, à l'école primaire, l'enseignement des sciences n'a pas trouvé sa vraie place. Les sciences ne sont pas enseignées ou bien, si elles le sont, c'est souvent en tant que savoir à transmettre, héritage culturel, et non comme activités vivantes. Même à un niveau élémentaire, les enfants n'apprennent pas à observer, à se questionner, à expérimenter, à penser comme des scientifiques en herbe. Dommage ! Car cela trouverait un écho favorable dans leurs

aptitudes naturelles et permettrait de développer ces dernières au-delà de ce que la nature seule et l'expérience quotidienne peuvent garantir. Mener une observation de façon rigoureuse, se préparer à répondre à un questionnement, mettre en place une expérimentation, même élémentaire, sont des compétences que l'on n'apprend pas tout seul. En 1995, les trois physiciens décident donc de s'engager dans le domaine de l'éducation primaire, et lancent un programme ambitieux pour l'école française : l'action *La main à la pâte* est née. Son objectif initial est de donner aux professeurs des écoles les outils pour enseigner les sciences et leur démarche : modules pédagogiques, fiches d'expériences, actions de développement professionnel, accompagnement pédagogique.

« Le rôle des chercheurs dans la formation scientifique des enseignants est renforcé par la création en 2012 des Maisons pour la science, un réseau d'Universités de pointe qui hébergent des structures de développement professionnel pour les enseignants – de vrais ponts entre école et recherche. »

Après une phase expérimentale de 5 ans qui va toucher quelques milliers de professeurs, naissent en 2 000 les centres pilotes *La main à la pâte* qui vont permettre de créer un réseau d'établissements et de professeurs, capables d'essaimer sur le territoire, – ils sont aujourd'hui au nombre de 23, distribués aux quatre coins de la France, en zone rurale et prioritaire pour la plupart, mobilisant ainsi 9 000 classes qui servent de lieux d'expérimentation pour de nouvelles approches et thématiques. Pour maintenir un contact constant avec la recherche et le monde de la science, se développent différentes formes d'accompagnement scientifique : l'école et le laboratoire s'ouvrent l'une à l'autre, des scientifiques participent à des actions de formation des professeurs pour leur faire vivre la

science et sa démarche. À partir de 2006, l'ambition de *La main à la pâte* s'étend au collège, dans l'idée de favoriser une vision intégrée des sciences et d'amener progressivement les enfants, puis les adolescents, au contact de cette science vivante, en train de se faire. L'objectif : inspirer des carrières futures, mais aussi développer, chez les élèves, le raisonnement rigoureux, le respect des faits, la capacité de distinguer une connaissance d'une opinion. En 2011, *La main à la pâte* entre dans son âge de maturité en devenant une Fondation de coopération scientifique associant l'Académie des sciences, l'Ecole normale supérieure de Paris et celle de Lyon. Le rôle des chercheurs dans la formation scientifique des enseignants est renforcé par la création en 2012 des Maisons pour la science, un réseau d'Universités de pointe qui hébergent des structures de développement professionnel pour les enseignants – de vrais ponts entre école et recherche. Aujourd'hui, 10 structures de ce genre existent en France, mais l'action du réseau s'étend aussi à l'étranger. Ce qui caractérise le mieux *La main à la pâte* est certainement son approche pédagogique.

3 Les objectifs pédagogiques de *La main à la pâte*

Depuis ses débuts, l'action de *La main à la pâte* s'est inspirée des pédagogies dites « actives » pour élaborer une approche qui met l'élève activement au centre de ses apprentissages, en lui permettant de mobiliser ses idées ou conceptions initiales, de proposer des questions à partir de ses idées et d'observations menées sous l'impulsion du professeur, et d'envisager des méthodes pour mettre ces idées à l'épreuve des faits. Enfin, il s'agit de réfléchir à la manière dont cette mise à l'épreuve a permis, éventuellement, de revoir les idées initiales des élèves afin qu'ils parviennent à de nouvelles idées, possiblement dans un cycle ultérieur de nouveau questionnement et de nouvelle mise à l'épreuve. On reconnaît dans cette approche une manière de procéder qui correspond à l'idéal

deweyen d'éducation progressive. L'objectif est de permettre à l'élève de raisonner sur ce qu'on sait, mais aussi sur la manière dont on arrive à savoir ce qu'on sait. On retrouve ainsi dans l'approche de *La main à la pâte* la réponse à l'objectif suivant : permettre à l'élève, pas à pas, d'une manière adaptée à son âge, d'apprendre à connaître les « rouages » de la science et de ce qui fait de la science une entreprise de construction de connaissances solides, appuyées sur des faits. On a beau expliquer que par la science, on parvient, *via* des efforts considérables, à des connaissances qui ont passé maintes épreuves avant de pouvoir gagner leur degré de certitude, sans en faire l'expérience, même simplifiée, ce concept risque tout simplement de rester obscur ; la confiance qu'on demande de porter à la science risque alors de reposer sur un acte aveugle. Enseigner les sciences en s'appuyant sur leurs méthodes est donc également une manière de garantir au citoyen de demain de pouvoir développer une confiance éclairée en la science.

« On a beau expliquer que par la science, on parvient, *via* des efforts considérables, à des connaissances qui ont passé maintes épreuves avant de pouvoir gagner leur degré de certitude, sans en faire l'expérience, même simplifiée, ce concept risque tout simplement de rester obscur. »

Pourquoi veut-on atteindre un tel objectif ? Les connaissances solides, les informations bien fondées sont des outils précieux pour donner force à nos arguments et pour nous permettre d'effectuer des choix plus cohérents avec la réalité. L'éducation scientifique pose donc les bases – si tel est son objectif – pour effectuer de meilleurs choix, dans différentes circonstances de la vie – individuelles et sociales.

II. Sciences cognitives et sciences de l'éducation

1 Ce que la science nous dit à propos de la cognition scientifique

Un apport fondamental des sciences cognitives à l'éducation scientifique vient des études sur le raisonnement précoce des enfants. Une image règne encore dans notre imaginaire, entretenue par une science largement dépassée : celle de l'enfant et notamment du jeune enfant, comme un organisme peu « raisonnable » : lié à des actions concrètes, emprisonné dans le court terme et dans le présent spatial. Or, les 30 dernières années de recherche en psychologie du développement ont modifié cette image et nous restituent plutôt celle d'un enfant largement doté de capacités de raisonnement, spécialisées, qui l'amènent à mettre du sens dans le monde qui l'entoure et à anticiper les événements à venir. Le tout selon des lois particulières qui sont communes et partagées à travers les cultures, qui ont une origine évolutive traçable et peuvent donc être considérées comme faisant partie de notre kit de départ naturel pour interpréter le monde.

« Les 30 dernières années de recherche en psychologie du développement nous restituent plutôt celle d'un enfant largement doté de capacités de raisonnement, spécialisées, qui l'amènent à mettre du sens dans le monde qui l'entoure et à anticiper les événements à venir. »

a. Un kit de départ riche

Les bébés, puis les enfants, possèdent une propension naturelle à

connaître leur environnement : une curiosité pour ce qui les entoure qui les amène à explorer, expérimenter, chercher et formuler des explications à propos de ce qui peut causer les phénomènes qu'ils observent autour d'eux – physiques, biologiques, psychologiques. De plus, ils savent capter les régularités présentes dans leur environnement. Grâce à ces mécanismes et dès leurs premières expériences, les enfants construisent leur propre compréhension du monde naturel, qui devient de plus en plus riche et sophistiquée au fur et à mesure des occasions d'exploration et d'interaction. Ainsi, le bébé de moins de six mois est déjà capable de découper les stimuli en objets et de leur attribuer des propriétés physiques, d'évaluer des quantités, de distinguer des formes géométriques, d'attribuer aux entités animées la capacité unique de se mettre en mouvement de manière autonome, et de les distinguer ainsi des autres objets, de développer des idées sur ce qui est réel et ce qui ne l'est pas, sur ce que les autres pensent, savent, ou croient, de conduire des expériences simples, de tester des hypothèses. On parle, en anglais, de *core knowledge* pour décrire un ensemble de capacités, intuitions, inférences que les bébés démontrent posséder dès l'époque la plus précoce de leur vie et qui les prédisposent à l'acquisition rapide de certaines connaissances en mathématiques, géométrie et espace, raisonnement causal et sur les propriétés physiques des objets, identification d'une classe particulière d'objets comme étant des agents auxquels attribuer des intentions, identification des « lois du groupe » et application d'un raisonnement de type social. Ainsi, un bébé de 6 mois sera surpris de voir un objet disparaître derrière un écran et deux objets réapparaître peu après : signe d'une attente qu'il s'est formée sur le comportement et le nombre des objets présents sur la scène. Il sera surpris aussi de constater qu'un objet se met en mouvement tout seul, mais il ne le sera pas si l'objet est mis en mouvement par une main (un agent). À deux ans, il sera capable de mener une investigation pour chercher la cause de la mise en marche d'un jouet qui produit sons et lumières. Il passera plus de

temps à chercher, si la cause est ambiguë, signe qu'il se rend compte du rôle de l'exploration : permettre de découvrir ce qui n'est pas évident. Il fera ses expériences et sera capable d'identifier la cause correcte, si celle-ci n'est pas trop cachée. Cette capacité se développe avec le temps et l'enfant utilise, comme l'adulte, des indices (association, séquence temporelle) pour formuler son hypothèse causale. Avant l'entrée à l'école primaire, l'enfant raisonne sur différentes catégories d'être vivants, leur attribue des propriétés et des relations. Les bases des mathématiques, de la physique et de la biologie sont en place.

« Le bébé de moins de six mois est déjà capable de découper les stimuli en objets et de leur attribuer des propriétés physiques, d'attribuer aux entités animées la capacité unique de se mettre en mouvement de manière autonome, et de les distinguer ainsi des autres objets, de développer des idées sur ce qui est réel et ce qui ne l'est pas, sur ce que les autres pensent, savent, ou croient, de conduire des expériences simples, de tester des hypothèses. »

Le phénomène des saisons

Quelle est la raison principale pour laquelle il fait plus froid en hiver et plus chaud en été (dans notre hémisphère) ? Bien que cette question fasse l'objet de cours de sciences dès l'école primaire et soit abordée plusieurs fois au cours de la scolarité (c'est en raison de l'inclinaison de l'axe de la Terre), il arrive que même des adultes éduqués donnent la réponse intuitive, et erronée, selon laquelle la *distance* Terre-Soleil produit le phénomène des saisons. Cette réponse est peut-être renforcée par des images trompeuses qui représentent l'orbite terrestre autour du Soleil comme étant plus elliptique qu'en réalité, mais elle peut aussi se nourrir d'expériences quotidiennes, comme celle qui nous fait comprendre que plus on s'approche d'un objet chaud, plus on ressent de chaleur. Nous sommes face à une préconception résistante, qu'il vaut mieux connaître, pour pouvoir imaginer des situations pédagogiques capables d'en montrer les limites.

Une question d'évolution

La théorie de l'évolution est évoquée de plusieurs manières, certaines étant d'ordre idéologique et d'appartenance à un groupe d'opinion. Mais elle est aussi particulièrement difficile à appréhender d'un point de vue cognitif, car elle perturbe des intuitions fortes. Par exemple, spontanément, nous avons tendance à identifier une catégorie à partir d'un prototype exemplaire et à la considérer comme uniforme. Si l'on vous demande de dessiner une chaise, un oiseau, une fleur, vous allez très probablement dessiner trois objets assez semblables : une chaise traditionnelle (et pas une chaise de bureau), un oiseau qui ressemble à un moineau (et pas à un manchot ou une autruche), une marguerite (et pas une orchidée). Si on vous demande de décrire le comportement d'un tigre, vous direz probablement qu'il s'agit d'un animal agressif, d'un carnivore dangereux pour de potentielles proies. Or, le tigre ne passe pas ses journées à attaquer des proies, et on peut facilement concevoir, si on se donne le temps de la réflexion, que tous les tigres n'ont probablement pas le même niveau d'agressivité. Notre tendance à généraliser à partir de peu d'éléments d'information – du moins quand nous ne prenons pas le temps de réfléchir – peut donc induire des généralisations abusives. Mais elle a certainement comporté l'avantage évolutif d'éviter à beaucoup de nos ancêtres de se faire dévorer par le tigre affamé et agressif qu'ils ont pu rencontrer. Ce type de fonctionnement, que nous avons hérité, peut ainsi rendre difficile la compréhension de la variation interne à chaque espèce qui est propre à la théorie darwinienne et donc amener à des erreurs et des mécompréhensions de la théorie, telle qu'elle nous est enseignée à l'école. De même, il existe des erreurs qui consistent à ignorer que l'apparente perfection de l'œil est le fruit de nombreuses étapes de sélection, opérées à partir d'une banque assez vaste, quoique non infinie, de variations entre individus de la même espèce. Pourtant, cette même tendance à généraliser est aussi à l'origine de nos connaissances, qui ne peuvent être établies qu'à partir d'un

nombre fini d'observations. Pour se faire une image de notre monde, pour arriver à faire de la science, il faut bien, à un moment, généraliser. Certes, la science répond à des critères précis pour procéder à cette généralisation, mais sa base cognitive naturelle est bien la même qui nous amène à voir dans « ce tigre » un tigre.

b. Des pièges cachés

Ce « kit » de connaissances et compétences précoces représente donc une précieuse base de départ. Une fois mis à l'épreuve des enseignements scolaires, toutefois, il peut aussi se révéler un obstacle à l'acquisition de connaissances qui vont au-delà de ce qui peut être observé directement et compris intuitivement. Certaines difficultés d'apprentissage, en sciences notamment, peuvent lui être attribuées et rester présentes même à l'âge adulte. On constate en effet que l'apprentissage de certains contenus scientifiques se heurte à des difficultés qui ne correspondent pas uniquement à la complexité des contenus *per se*, mais à l'existence d'intuitions préalables (théories naïves, cadres conceptuels, explications ou classifications spontanées) qui bloquent l'acquisition de nouveaux concepts. Les deux exemples sur le phénomène des saisons d'une part, sur la théorie de l'évolution d'autre part (*cf.* encadrés ci-après) nous permettront de mieux comprendre comment cela peut entraver l'acquisition de connaissances scientifiques avancées.

Le message est que le même kit de départ qui fait de nous des scientifiques en herbe et nous prépare (au double niveau de la motivation et des capacités) à connaître notre environnement est aussi celui qui peut nous induire en erreur et rendre nos nouvelles connaissances plus ardues à acquérir. Tôt ou tard l'apprentissage se fait. L'élève apprend que le facteur principal qui explique les saisons est l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de son orbite autour du Soleil. Il apprend également que le hasard passe par la variation et la sélection pour arriver à des formes stables

et adaptatives de traits. Mais cet apprentissage est-il stable ? La recherche plus récente met en évidence que même les experts qui semblent avoir pleinement dépassé leurs intuitions initiales en sont toutefois encore influencés : celles-ci doivent être à chaque fois contrées et contrôlées, effort qui produit un léger « ralentissement » dans la recherche de la réponse correcte. Notre cerveau continue à héberger nos intuitions préalables et à nous faire payer un coût cognitif pour les écarter. Si nous ne sommes pas capables de payer ce coût (à cause du stress, par exemple à l'occasion d'un examen) nous pouvons retomber sur la mauvaise réponse. Les sciences cognitives nous aident ainsi à comprendre pourquoi nous nous trompons, parfois, contre toute attente.

« Le même kit de départ qui fait de nous des scientifiques en herbe et nous prépare (au double niveau de la motivation et des capacités) à connaître notre environnement est aussi celui qui peut nous induire en erreur et rendre nos nouvelles connaissances plus ardues à acquérir. »

2 Ce que les sciences cognitives nous disent à propos du raisonnement scientifique

Une distinction est souvent opérée, plus ou moins explicitement, entre le développement des connaissances et celui des capacités de raisonnement. À côté des études portant sur les conceptions et les méconceptions des élèves, d'autres cherchent à décrire comment évoluent le raisonnement, et notamment les capacités expérimentales (formulation d'hypothèses, conception d'expériences) et la capacité d'articuler idées et faits. Les deux courants d'études avancent la plupart du temps de manière indépendante l'un de l'autre. La distinction entre connaissances et raisonnement scientifique est toutefois artificielle et problématique.

Contrairement à la vision qui décrit la cognition scientifique comme fondée sur certaines opérations générales de raisonnement, résolution de problèmes, inférence, induction, déduction, à distribuer indifféremment sur des contenus variés, il est de plus en plus évident que chaque domaine d'expertise et chaque contenu mobilisent ces capacités de manière différente. Les connaissances aident à sélectionner des stratégies expérimentales appropriées et les stratégies appropriées permettent le développement de connaissances plus complètes. Posséder des connaissances dans un domaine est non seulement utile mais nécessaire pour bien raisonner à l'intérieur de ce même domaine. Les capacités de raisonnement peuvent donc varier en fonction du domaine et des contenus où elles sont exercées. On peut observer qu'un enfant peut atteindre un niveau sophistiqué de compréhension et de raisonnement dans un domaine de connaissances bien particulier, sans que cela ne se manifeste dans d'autres domaines. De même, des enfants du même âge et du même niveau scolaire peuvent avoir de grandes différences de compréhension du monde naturel. Ces différences peuvent dépendre de la mise en place de stratégies différentes de raisonnement, ou des connaissances possédées. Encore une fois, la variabilité règne au sein d'un même individu comme elle existe entre individus. Depuis une trentaine d'années, la psychologie cognitive et celle du développement ont donc remis en cause la vision de l'enfant traversant progressivement et nettement des étapes invariables de développement. Les recherches dans ces deux domaines ont aussi mis en évidence que le développement du raisonnement scientifique était le produit d'influences multiples. Ce que les enfants peuvent apprendre à une certaine période de leur vie ne dépend pas seulement de leur maturation cérébrale, mais également de leurs expériences vécues et de l'éducation (familiale, formelle) qu'ils ont reçue auparavant. Les opportunités fournies par l'éducation peuvent faire la différence, non seulement en termes de connaissances, mais aussi de raisonnement. Par conséquent, il n'est

pas aisé de démêler dans cet apprentissage la part de l'éducation reçue de celle des connaissances accumulées « par soi-même » ou de celle due à l'âge cérébral. Il devient donc difficile de donner des indications sur ce que les enfants seraient prêts à apprendre à 6, 8 ou 10 ans, car cela dépend aussi de l'histoire personnelle de chacun. Sans dicter de réponses pédagogiques précises, ce constat peut être utilisé pour justifier le recours à des évaluations plus fréquentes de l'état d'avancement de chacun dans ce type de raisonnement et à une plus grande personnalisation des apprentissages.

« Depuis une trentaine d'années, la psychologie cognitive et celle du développement ont remis en cause la vision de l'enfant traversant progressivement et nettement des étapes invariables de développement. »

3 Les contributions des sciences cognitives à l'éducation

On peut considérer que l'apport des sciences cognitives est précieux pour l'éducation à plusieurs niveaux, principalement selon quatre axes :

- Premièrement, la recherche de méthodes efficaces, qui prennent en considération le fonctionnement cognitif naturel ;
- En deuxième lieu, la mise à l'épreuve de ces méthodes par des tests et des études permettant d'en valider l'efficacité de la manière la plus fiable possible (tests écologiques dans les classes, mais aussi tests de laboratoire pour comprendre plus finement comment les méthodes en question agissent sur les apprentissages, études de cas pour susciter de nouvelles hypothèses) ;
- Troisièmement, la veille critique sur les mécompréhensions qui peuvent être générées dans la rencontre entre sciences cognitives et éducation – comme cela arrive par exemple entre science et société. L'intérêt montant pour les sciences de la cognition peut en effet rendre difficile, pour un public non spécialisé, la distinction entre des

connaissances scientifiques solides et appuyées par des preuves et des informations en circulation qui relèvent plutôt du mythe que de la science : imprécisions, affirmations vagues, des fois complètement fausses car dépassées par les connaissances actuelles ou jamais confirmées par la science. Ces idées imprécises ou fausses peuvent à leur tour donner lieu à des interventions ou méthodes qui – tout en se targuant d’être fondées sur la science et notamment d’être « basées sur le cerveau » – ne répondent pas à des critères de scientificité. C’est le cas actuellement avec les méthodes dites de la « gym pour le cerveau » et aussi de beaucoup de soi-disant entraînements cérébraux qui ne produisent pas des résultats transposables dans la vie de tous les jours. Le mot « cerveau » associé à ces méthodes constitue donc un appât qui se confond avec les travaux sérieux en sciences cognitives et en éducation ;

– Une quatrième forme de contribution des sciences cognitives à l’éducation consiste à utiliser les connaissances fondamentales concernant la cognition humaine comme une sorte de boussole pour orienter – sans en définir les détails – les choix pédagogiques. J’en ai donné deux exemples en discutant des obstacles à l’apprentissage de contenus et formes de raisonnement scientifique. Il ne s’agit pas dans ce cas d’appliquer une méthode particulière, mais plutôt de se doter, en tant qu’enseignant et formateur, d’une connaissance suffisamment fine du fonctionnement cognitif – sans pour cela se transformer en neuroscientifique ! – pour être à même d’interpréter et d’anticiper les comportements d’apprentissage des élèves – en connaissance de cause des mécanismes fondamentaux qui les sous-tendent – et d’envisager des stratégies pour les faciliter. Ces solutions pourront ensuite être mises à l’épreuve des faits – comme il est souhaitable dans le cadre de toute démarche inspirée par la science. Il s’agira donc d’envisager des situations expérimentales pour mesurer les effets de ces méthodes de façon aussi rigoureuse que possible pour obtenir des résultats aussi objectifs que possible (dépourvus de biais indésirables).

« Il s'agit de se doter, en tant qu'enseignant et formateur, d'une connaissance suffisamment fine du fonctionnement cognitif – sans pour cela se transformer en neuroscientifique ! – pour être à même d'interpréter et d'anticiper les comportements d'apprentissage des élèves – en connaissance de cause des mécanismes fondamentaux qui les sous-tendent – et d'envisager des stratégies pour les faciliter. »

III. Les sciences cognitives et la Fondation *La main à la pâte*

Les considérations exprimées ci-dessus ont guidé l'action de la Fondation *La main à la pâte* depuis 2012, quand il a été collectivement décidé d'intégrer ces sciences cognitives nouvelles dans le panel plus général des sciences qui depuis toujours relèvent de son action. Cette intégration a comporté trois modalités d'actions principales.

1 Les modalités d'intégration des sciences cognitives

a. Des actions de formation

La première modalité consiste à proposer des actions de développement professionnel pour les enseignants et formateurs en poste, autour de contenus propres aussi bien aux sciences cognitives qu'à l'éducation : l'attention, le raisonnement, l'apprentissage, le développement de l'enfant. Ces formations ont été conçues en collaboration avec des chercheurs spécialisés dans les domaines cités, et ont permis aux participants d'interagir avec ces mêmes chercheurs pour découvrir leurs méthodes, les connaissances

produites par cette recherche, et les pistes de recherche nouvelle.

b. La production de ressources

La deuxième modalité d'action a consisté à produire des ressources pédagogiques pour les enseignants, fortement influencées par les sciences cognitives. Une première ressource concerne les écrans et leur utilisation « sage » (*cf.* section III.2 sur les pistes pratiques). Elle s'appuie fortement sur les fonctions cognitives en tant que contenus d'apprentissages.

Les élèves apprennent à mieux connaître leur attention, leur contrôle exécutif, leur mémoire, leurs réactions émotionnelles et sociales, les propriétés du sommeil et du mouvement, la perception ; ceci, afin de réfléchir de façon plus informée sur la manière dont les écrans sollicitent ces différentes fonctions. Par le biais de la problématique de l'usage des écrans, les enfants sont amenés à mieux connaître leur propre fonctionnement cognitif d'une manière qui pourra leur être utile à plusieurs occasions – par exemple, pour gagner plus d'autonomie dans l'apprentissage (Voir Pistes pratiques 1). Une seconde ressource pédagogique a mobilisé les sciences cognitives comme base théorique pour investir le champ de l'éducation de l'esprit critique, en s'appuyant sur différentes formes de raisonnement et différentes capacités – et limites – manifestées par les enfants et les adolescents (*cf.* section III.2 sur les pistes pratiques). Encore une fois, les élèves sont amenés à prendre une position réflexive, d'observation de leurs modalités de fonctionnement (certaines choses sont plus faciles, dans d'autres situations on se trompe plus fréquemment) pour sentir le besoin d'acquérir des stratégies de résolution plus puissantes – dans notre cas, inspirées par les méthodes scientifiques – et de les employer dans leur quotidien.

c. La mise en place de partenariats

Enfin, la troisième modalité d'intégration des sciences cognitives – qui traverse aussi les deux premières – a consisté à mettre en place des partenariats avec les chercheurs en sciences cognitives et les laboratoires de recherche, de manière à mobiliser leurs connaissances pour la création de contenus pédagogiques, pour la formation des enseignants et pour la mise à l'épreuve des actions pédagogiques proposées dans le cadre de programmes de recherche-action. Ce troisième volet comporte la naissance d'un écosystème nouveau où enseignants et chercheurs en sciences cognitives partagent des questions de recherche et agissent ensemble pour chercher des réponses nouvelles. Il est pour cela nécessaire de créer des ponts, des passerelles entre les deux « mondes » (celui de l'éducation et celui de la recherche), pour se croiser. Nous avons opéré dans cette direction en créant des espaces de rencontre – les formations, les actions de recherche-action accompagnées par nos médiateurs.

« Il ne s'agit pas de transposer telles quelles dans la salle de classe les connaissances acquises en laboratoire mais plutôt de répondre à un besoin d'amélioration des pratiques par des outils qui sont le fruit d'une construction commune. »

Nous avons ainsi appris une leçon importante ! La rencontre entre éducation et sciences cognitives ne pourra pas se faire correctement sans que les deux parties ne soient mobilisées ensemble. Il ne s'agit pas de transposer telles quelles dans la salle de classe les connaissances acquises en laboratoire mais plutôt de répondre à un besoin d'amélioration des pratiques par des outils qui sont le fruit d'une construction commune. Les enseignants ont à y gagner des pratiques plus efficaces et fluides : dans certains cas, ils verront se confirmer la validité de gestes professionnels déjà en place, et dans

d'autres cas, ils seront convaincus de la nécessité d'apporter des changements. De façon plus générale, chercheurs et éducateurs pourront explorer ensemble la manière de répondre plus efficacement à des problèmes éducatifs encore non résolus. Comment permettre aux élèves de devenir plus autonomes dans leurs apprentissages ? Comment les aider à prendre une posture plus réflexive ? À réutiliser dans leur quotidien les apprentissages scolaires ? Comment fortifier leur capacité à penser de façon critique face à un monde en changement rapide ? Les enseignants n'ont pas vocation à se transformer en chercheurs eux-mêmes, mais ils ont besoin d'acquérir un regard plus scientifique et une documentation plus avancée dans les domaines propres aux sciences cognitives pour penser leurs pratiques à la lumière des connaissances actualisées et fondées sur des preuves. Les chercheurs en sciences cognitives n'ont pas vocation à se transformer en éducateurs, mais ils ont à gagner de cette collaboration de nouvelles questions de recherche à explorer qui pourraient faire avancer de façon significative leurs méthodes et connaissances.

2 Des pistes pratiques pour les enseignants

a. Pistes pratiques 1 : les écrans, le cerveau et l'enfant

En 2012 a été publié le premier module pédagogique *La main à la pâte* dédié aux sciences cognitives. Son thème spécifique était celui des écrans et de la relation que les enfants entretiennent avec les technologies nouvelles (téléphones, consoles de jeu, ordinateurs, tablettes) et leurs différentes applications. Chaque activité conduit les élèves à la découverte active d'une fonction cognitive ou cérébrale particulièrement importante dans leur relation aux écrans : la perception, l'attention, le contrôle sur les automatismes, la mémoire, les émotions, la relation à autrui, le mouvement, le sommeil... Les activités sont conçues de manière à répondre aux différents objectifs pédagogiques de *La main à la pâte*, mais aussi à

permettre aux élèves de prendre une posture métacognitive : prendre conscience de leur propre fonctionnement cognitif et réfléchir sur les conséquences de cela pour leurs comportements quotidiens. Cette prise de conscience ne passe pas par l'introspection mais par l'investigation « scientifique » (adaptée à l'âge des élèves) des processus cognitifs nommés ci-dessus. Par exemple, les élèves découvrent grâce à une vidéo certaines limites de l'attention : lorsque nous sommes concentrés sur une tâche, nous avons du mal à porter notre attention sur d'autres objectifs.

Notre cerveau, quand l'attention est impliquée, est essentiellement mono-tâche. Cette connaissance, bien établie par de nombreuses études et modèles en sciences cognitives, représente une information précieuse pour l'enfant, à mobiliser pour prendre de meilleures décisions à propos de l'usage des écrans (chercher à faire ses devoirs avec la télé allumée, pour les élèves plus âgés, chercher à écouter un cours tout en surfant sur Internet...). En même temps, comprendre les limites de l'attention permet de mieux gérer, en autonomie, ses apprentissages. En classe, les élèves mettent en place des expériences permettant de mettre en évidence ces limites, en s'inspirant du travail et des méthodologies adoptées par les scientifiques. Ils proposent des protocoles, réalisent leurs tests, analysent les résultats et en tirent des conclusions qui sont comparées à celles des scientifiques de profession. Il en résulte une connaissance plus approfondie de l'attention, et du genre de méthodes et de protocoles qui permettent d'arriver à l'établir. Ce gain de connaissances scientifiques peut alors être mis à profit dans la vie quotidienne. Grâce encore une fois à l'accompagnement de l'enseignant, l'élève apprend à utiliser les connaissances scientifiques acquises pour développer des stratégies d'action qui lui permettront de tirer un meilleur profit de sa propre cognition. L'enseignant invite la classe à faire un pas de côté, à adopter une attitude réflexive : quelles stratégies peut-on imaginer pour éviter les distractions inutiles et ne pas surcharger notre attention ? Les

élèves produisent des recommandations et les partagent aussi largement que possible. Certaines classes ayant participé au projet « Les écrans, le cerveau et l'enfant » ont conçu des expositions ouvertes aux parents, aux élèves et aux enseignants d'autres écoles, invités à vivre des expériences menées par les enfants et à partager une « charte pour le bon usage des écrans » produite dans les classes.

L'avantage de bien se saisir de cette connaissance sur l'attention et les autres fonctions cognitives de base n'est pas limité aux élèves, ni à l'utilisation des écrans. Les enseignants qui mettent en place le module pédagogique dans leurs classes sont eux mêmes accompagnés par des formations et des éclairages scientifiques pour qu'ils aient une meilleure compréhension – adaptée à leur niveau, plus exigeant que celui des élèves – de ces fonctions cognitives et cérébrales et puissent ainsi utiliser ces connaissances pour concevoir des cours moins couteux en termes d'attention, ou arriver à mieux s'expliquer – et à anticiper pour éviter – certains échecs des élèves. Si l'élève se trouve en situation de double tâche attentionnelle (son attention est requise par deux tâches simultanées), il peut en effet être au-dessous de son niveau réel juste parce que son attention ne peut pas être focalisée correctement sur la tâche que l'enseignant demande de résoudre. Le problème est qu'en tant qu'adultes, nous avons automatisé beaucoup de tâches qui pour l'enfant – ou pour certains enfants – demandent encore un grand effort d'attention. Nous ne nous en rendons pas facilement compte quand nous proposons plusieurs tâches aux élèves en même temps. Tout comme l'élève, l'enseignant prend donc conscience de l'importance de respecter les limites de l'attention et sa pratique s'en trouve enrichie. Des considérations semblables s'appliquent au contrôle exécutif, à la mémoire et aux autres fonctions traitées dans le module.

« Grâce à l'accompagnement de l'enseignant, l'élève

**apprend à utiliser les connaissances scientifiques
acquises pour développer des stratégies d'action qui lui
permettront de tirer un meilleur profit de sa propre
cognition. »**

b. Pistes pratiques 2 : esprit scientifique, esprit critique

Entre 2017 et 2018, *La main à la pâte* a produit deux modules pédagogiques d'activités de classe dédiées aux enseignants de l'école primaire et du collège jusqu'à la seconde. Leur objectif est d'aider les enseignants à développer l'esprit critique des élèves. Cette notion n'a pas de définition unique et plusieurs approches existent, proposant des méthodes pédagogiques ayant pour objectif d'éduquer l'esprit critique. L'approche de *La main à la pâte* pour cette question est fortement influencée par les sciences cognitives. Nous avons pris comme point de départ les capacités des enfants et des adultes à capturer des informations, soit dans le monde qui les entoure (informations de première main), soit par l'intermédiaire d'autres personnes (informations données ou recherchées auprès de sources secondaires), ainsi que leur capacité à résoudre des problèmes. Nous savons que les enfants ont une curiosité instinctive, qu'ils explorent et tirent des conséquences de leurs observations – parfois trop rapides, basées sur peu de constats ou sur des constats qui ne sont pas guidés par une méthode rigoureuse. Nous savons aussi qu'ils s'interrogent spontanément sur les causes des phénomènes observés, et qu'ils cherchent à en donner des explications. De nouveau, cette démarche est parfois rapide et peu consciente des erreurs qui peuvent se cacher dans une attribution hâtive de causes pour des effets constatés. Ceci est aussi vrai pour les adultes. La science a su inventer, au cours de son histoire, une série d'outils permettant de limiter les risques d'erreur dans la prise d'information et dans la construction de connaissances à partir de l'observation et de la recherche d'explication. Dans le cadre des

activités proposées, les élèves passent donc par une première étape qui consiste à déployer leurs capacités naturelles d'observation et d'explication pour se rendre compte des limites et des difficultés que ce déploiement non outillé rencontre. Il s'agit d'un premier acte métacognitif. À l'étape suivante, les élèves découvrent, grâce à leur enseignant, des outils pour améliorer ces capacités et dépasser les erreurs ou difficultés rencontrées : des outils propres à la démarche et aux méthodes de la science. Ils peuvent ainsi constater le rôle de ces outils dans la construction de connaissances plus correctes et solides. Ils sont enfin amenés, par le questionnement de l'enseignant, à identifier d'autres situations, notamment des situations de la vie quotidienne, où leur jugement peut être amélioré grâce à ces mêmes outils. Ils sont par exemple amenés à identifier des situations où la tendance à généraliser trop rapidement à partir de peu d'observations ou à sauter directement aux conclusions sans s'arrêter sur une phase de description et d'observation détachées, peut amener à des interprétations incorrectes ou pauvres. Le même type de procédure est utilisé pour amener les élèves à identifier les limites et difficultés de la prise d'information « de seconde main » : sur Internet, par exemple.

« Dans le cadre des activités proposées, les élèves passent donc par une première étape qui consiste à déployer leurs capacités naturelles d'observation et d'explication pour se rendre compte des limites et des difficultés que ce déploiement non outillé rencontre. Il s'agit d'un premier acte métacognitif. »

Encore une fois, nous avons pour cela exploité les connaissances actuelles que les sciences cognitives mettent à notre disposition quant aux capacités naturelles de « vigilance épistémique » dont font preuve les enfants et pas seulement les adultes. Les uns comme les

autres ne peuvent pas être considérés comme étant aveuglement crédules. Ils ont recours à des critères qui leur permettent d'exercer un certain degré de contrôle critique sur l'information qui vient d'autrui. Ces critères et ces « heuristiques » ne sont pas infaillibles. On peut même y reconnaître les racines d'erreurs argumentatives classiquement reconnues. Par exemple, il apparaît que, lorsqu'ils doivent choisir entre plusieurs sources qui fournissent des informations divergentes, les enfants d'âge scolaire – entre 5 et 7 ans – font plus confiance à des informateurs qui leur sont familiers, qui font des affirmations cohérentes avec ce que l'enfant connaît déjà et/ou qui ont l'approbation d'autres adultes. Ils font ainsi preuve de « vigilance ». Pourtant, ces mêmes critères peuvent donner lieu à des biais d'autorité, de confirmation dans nos propres opinions, de conformisme par rapport au groupe. Prendre connaissance de ces heuristiques – couramment mais la plupart du temps inconsciemment utilisées par l'enfant (voire l'adulte !) – permet de les mobiliser de façon consciente, par exemple à l'aide de grilles pour l'évaluation des sources d'information sur Internet. Tout en étant guidée par l'enseignant, cette construction s'appuie sur des bases déjà présentes dans le fonctionnement cognitif de l'enfant. Il s'agit de la rendre explicite et de montrer en quoi et comment outiller ultérieurement l'élève pour faire face à des situations de plus en plus complexes, comme l'analyse de médias et réseaux sociaux, qui peuvent activer des réponses de confiance inappropriées.

« Lorsqu'ils doivent choisir entre plusieurs sources qui fournissent des informations divergentes, les enfants d'âge scolaire – entre 5 et 7 ans – font plus confiance à des informateurs qui leur sont familiers, qui font des affirmations cohérentes avec ce que l'enfant connaît déjà et/ou qui ont l'approbation d'autres adultes. »

Les sciences cognitives sont donc présentes en tant que sources de connaissance sur le raisonnement – et ses limites – et permettent d'identifier à la fois des capacités à développer et des obstacles à ce développement.

Le pas suivant dans une approche scientifique de l'éducation à l'esprit critique est la construction d'outils adaptés pour évaluer cet ensemble de capacités et notamment en mesurer la progression. Il s'agit de mesurer le plus objectivement possible l'efficacité des méthodes d'enseignement envisagées pour vérifier si elles permettent de faire progresser l'esprit critique des élèves. Pour répondre à cet objectif, la Fondation *La main à la pâte* a mis en place des collaborations avec des chercheurs en sciences cognitives et en éducation (notamment le Laboratoire de Psychologie du Développement et de l'Éducation – LaPsyDÉ – de l'Université Paris 5 et le Laboratoire CRAC-Paragraphe de l'Université Paris 8) et s'est engagée dans des programmes de recherche-action qui ont pour but de développer des mini-parcours éducatifs sur l'esprit critique et d'en évaluer l'impact sur les élèves. Au cours de ces programmes de recherche-action, les enseignants participants reçoivent une formation qui leur permet, entre autres, de se rapprocher des sciences cognitives.

D'autres actions de développement professionnel, qui incluent différents aspects issus des sciences cognitives, sont également proposées en collaboration avec des scientifiques pour permettre aux enseignants de développer leur bagage de connaissances tout en s'appropriant des outils pratiques pour la classe.

Nous assistons ainsi à un système fortement intégré où les sciences cognitives commencent à faire partie de la conception d'outils pédagogiques, sont mobilisées pour évaluer l'impact de ces derniers et sont au centre d'actions de développement professionnel visant à la fois l'appropriation d'outils pédagogiques, le développement d'une culture scientifique et une meilleure compréhension des processus cognitifs des élèves.

Conclusion

Pourquoi mobiliser les sciences cognitives au service de l'éducation scientifique – et de l'éducation plus généralement ? Quel genre de bénéfices pratiques s'attend-on à obtenir ? Chacun de nous a des intuitions sur la façon dont nous apprenons. Ne pouvons-nous pas, tout simplement, nous fier à ces intuitions – et à notre expérience – pour guider nos comportements d'apprentissage et ceux de nos élèves ? C'est un fait, d'ailleurs, qu'un grand nombre d'apprentissages s'opèrent sans avoir recours à une instruction formelle ou à une réflexion explicite sur l'apprentissage : on apprend naturellement à marcher, à parler, à comprendre les autres en interprétant leurs pensées. On pourrait donc être tenté de penser que tout apprentissage se passe de la sorte et ne mérite pas une attention particulière de la part des sciences cognitives pour bien se mettre en place. Il suffirait de laisser faire la nature.

Or, il y a là une confusion fondamentale, que les sciences cognitives nous permettent justement de démêler, entre apprentissages « naturels » – pour lesquels notre cerveau est largement préprogrammé – et apprentissages culturels qui sont relativement nouveaux pour notre espèce. Si on peut apprendre à parler en étant exposé précocement et intensivement à des « parlants » d'une langue, on ne peut pas apprendre à lire et à écrire sans un apprentissage et un enseignement dédiés. Notre cerveau n'est pas préprogrammé pour acquérir cette capacité, d'où la difficulté et le risque d'échec lorsque des méthodes non adaptées sont employées. Nous sommes ainsi obligés d'inventer des techniques permettant de favoriser l'acquisition de nos propres inventions. Et nous devons faire en sorte que les techniques d'apprentissage et d'enseignement ainsi inventées s'accordent au mieux à notre fonctionnement cognitif et cérébral : à la manière dont est structurée notre mémoire, aux mécanismes de la motivation et de la récompense, aux limites et contraintes de notre raisonnement et compréhension. Ce qui est vrai

pour l'apprentissage de la lecture et de l'écriture, de l'algèbre et de l'histoire des populations est vrai également pour la science et pour le développement de formes plus sophistiquées de raisonnement. Nous pouvons compter dès notre naissance sur un kit de démarrage riche pour apprendre à connaître le monde qui nous entoure, mais ce kit nécessite des expériences particulières et des enseignements dédiés pour pouvoir se développer et dépasser ses naturelles limites. Des méthodes adaptées sont nécessaires pour saisir la complexité de connaissances scientifiques, produit de siècles d'évolution culturelle. Ces connaissances sont souvent contre-intuitives par rapport à nos observations, explications et conceptions « naïves », spontanées, non éduquées.

De la même manière, nos capacités naturelles de raisonnement (associatif, causal, hypothético-déductif, inductif, analogique), pourtant riches dès les premières années de la vie, restent limitées et contraintes (certains disent : « biaisées ») même à l'âge adulte, et nous commettons au quotidien des erreurs d'évaluation et de prise d'informations à cause de ces limites et contraintes. L'éducation scientifique permet de déplacer ces limites, en dotant l'individu d'outils pour mieux raisonner, de façon plus objective – et ces outils sont, du moins en partie, le fruit de la conquête culturelle que nous appelons la méthode scientifique. Mais l'éducation scientifique ne part pas « de zéro ». Aucune éducation ne le fait, à vrai dire.

Un enseignement fondamental qui nous vient des sciences cognitives est que le cerveau humain n'est, à aucun moment de notre développement, une *tabula rasa*, une argile sur laquelle tout serait à écrire, à graver. Le cerveau impose d'abord des limites et contraintes à ce que nous pouvons apprendre à différents moments de son développement – et cela est facile à constater même pour des non spécialistes. Mais le cerveau impose aussi des voies privilégiées pour l'apprentissage, pour la compréhension du monde qui nous entoure, pour la manière dont nous lui donnons du sens. Ignorer cela nous empêche de comprendre – et donc d'anticiper et

contourner – certaines difficultés d'apprentissage, par exemple dans le domaine des sciences. Comprendre le fonctionnement de notre cognition et de ses atouts nous permet en outre d'inventer, par ingénierie pédagogique, des techniques efficaces pour enseigner des contenus qui sont très éloignés de notre horizon quotidien, contre-intuitifs et donc particulièrement difficiles à comprendre et ensuite, à mémoriser et employer.

Les Essentiels

- *La Fondation La main à la pâte* vise l'éducation de l'esprit scientifique et critique à l'école éclairée aujourd'hui par une meilleure connaissance du cerveau humain.
- Les voies de l'apprentissage peuvent être contre-intuitives, bien que notre cerveau soit préparé et adapté pour apprendre.
- Mieux connaître les mécanismes du fonctionnement de certaines capacités cognitives – par exemple celles qui sous-tendent le raisonnement scientifique – peut aider à se doter d'outils d'enseignement efficaces.
- Le but de ces outils est de favoriser le développement des capacités naturelles de l'enfant vers de nouvelles capacités, plus avancées de raisonnement logique, au-delà des biais perceptifs et cognitifs. Pour cela il est nécessaire de prendre en compte les difficultés naturelles de l'enfant et de l'adulte face à certaines formes de raisonnement.
- L'enfant peut profiter d'une meilleure connaissance de ses processus cognitifs, s'il est guidé pour les reconnaître et les mobiliser de façon réfléchie dans ses apprentissages et dans ses choix.

Des groupes de formation-action sur la créativité

par Mathieu Cassotti, Anaëlle Camarda et Lison Bouhours

Imaginez qu'un enseignant demande à un élève de CM1 par exemple de réaliser une courte rédaction dont le sujet consiste à moderniser le conte classique du *Petit chaperon rouge*. Si le simple fait d'écrire une histoire constitue en soi une difficulté pour la plupart de ces élèves, maîtrisant encore peu ce type d'exercice, la nécessité de proposer un conte moderne qui impose la génération d'idées nouvelles et originales est susceptible de les conduire à connaître la douloureuse angoisse de la page blanche. Pire, lorsque les enseignants tentent de les inspirer et de libérer leur potentiel créatif en suggérant des exemples du type « Imaginons un Petit chaperon jaune », les élèves ont tendance à s'enfermer dans des histoires déclinant toutes les couleurs de l'arc-en-ciel (chaperon bleu, vert, violet), sans parvenir à sortir de cette proposition pour moderniser le conte autrement.

Les enseignants, démunis face à ce constat d'échec des méthodes scolaires traditionnelles, ont partagé leurs expériences avec des chercheurs en psychologie qui avaient d'ores et déjà démontré des phénomènes de blocage cognitif de cette nature en laboratoire et dans des contextes industriels. En effet, que l'on soit élève de CM1, ingénieur dans une école prestigieuse ou auteur de contes pour

enfant, nous avons tous tendance à rester fixés sur les connaissances les plus facilement accessibles en mémoire pour proposer des idées nouvelles. Dès lors, ces idées intuitives et communes conduisent à des solutions faiblement originales, qu'il convient précisément d'éviter pour « sortir de la boîte » et devenir plus créatif.

La littérature scientifique a permis de décrire et de caractériser ces phénomènes de fixation dans divers contextes, mais aussi d'étudier comment des exemples de solutions pouvaient contribuer à les renforcer. Il convenait ainsi de co-construire avec les enseignants des séquences d'apprentissage permettant à ces élèves de CM1 de dépasser leur blocage pour les aider à produire des rédactions plus originales.

Des ateliers co-construits

Ce type de recherche-intervention impose d'emblée une participation active des experts de terrain que sont les enseignants, mais également un transfert des connaissances du monde scientifique vers celui de l'éducation. Cela permet de susciter l'adhésion de l'ensemble des acteurs dans la construction et la validation d'un dispositif expérimental de stimulation de la créativité des élèves. Ce fut ainsi une réelle immersion de chercheurs de laboratoire dans le monde de l'éducation avec une première phase d'observation de trois jours au sein des classes, la réalisation d'un premier atelier pilote, et une série de réunions de travail qui ont associé l'ensemble des partenaires du projet sur une période d'un an en amont de la mise en place du dispositif expérimental. Ce travail de co-construction avec les enseignants était indispensable pour prendre en compte de façon dynamique les contraintes et les objectifs pédagogiques du programme scolaire des enseignants, et permettre la mise en place d'ateliers adaptés aux élèves.

La littérature scientifique a souligné plusieurs leviers d'action susceptibles de stimuler la capacité à sortir des effets de fixation

chez des étudiants à l'université ou des experts industriels, mais peu d'études ont adapté et transféré ces outils au monde de l'éducation. Dans ce contexte, nous avons construit un ensemble d'ateliers avec les enseignants au cours desquels les élèves de CM1 étaient invités à générer des idées créatives afin de produire une rédaction sur une thématique définie par les enseignants eux-mêmes. Ceci permet à la fois de respecter le programme pédagogique qu'ils avaient défini en amont et d'éviter l'utilisation de tâches de laboratoire peu écologiques. Ainsi, les élèves ont travaillé sur les sujets que les enseignants auraient utilisés naturellement pour développer les compétences rédactionnelles de leurs élèves. Les rédactions ont par exemple consisté à imaginer ce que serait une rencontre inattendue, ce que serait une école fantastique, ou encore ce que pourrait être un animal de compagnie hors du commun.

130 élèves de CM1 ont été répartis aléatoirement dans trois groupes expérimentaux. Ils ont bénéficié d'une formation à l'utilisation d'outils de génération d'idées, identifiés d'une part dans la littérature scientifique et d'autre part dans l'arsenal des méthodes classiques mises en place spontanément par les enseignants. Ainsi, chaque élève a participé à cinq ateliers de génération d'idées, chacun d'eux se terminant par une phase de rédaction d'histoire. Les ateliers étaient centrés sur une des trois méthodes que l'on va présenter ici :

- La première est la méthode utilisée classiquement par les enseignants, dite « à la manière de », où les élèves étaient confrontés à un texte littéraire correspondant à un exemple de rédaction possible. Une discussion collective autour des éléments caractéristiques de l'exemple était ensuite proposée afin que les enfants puissent s'en inspirer.

- La deuxième méthode, classiquement proposée lors d'exercices de créativité en milieu industriel, était celle du *brainstorming*. Après avoir rappelé les règles princeps du *brainstorming* visant notamment à réduire la pression sociale, les enfants de la classe travaillaient en groupes afin d'inscrire un maximum d'idées créatives sur des post-its

qui sont affichés ensuite au tableau.

– Enfin, la dernière méthode est celle de l'identification/inhibition de la fixation, développée et utilisée dans les grandes écoles d'ingénieurs et au LaPsyDÉ¹, où les élèves étaient invités à proposer et à catégoriser les premières idées qui leur venaient à l'esprit (c'est-à-dire la fixation). Cette phase de catégorisation permettait de visualiser sur un « arbre à idées », les classes d'idées faiblement originales qu'il convient d'éviter (c'est-à-dire inhiber) ensuite dans les rédactions². Puis, les élèves exploraient les autres branches de l'arbre correspondant à des catégories de solutions nouvelles et originales.

Des outils pour évaluer

Dans ce type d'intervention pédagogique, il est essentiel pour le chercheur, mais également pour l'enseignant qui souhaitait généraliser une méthodologie particulière à d'autres contextes, de disposer d'une évaluation objective de l'efficacité des ateliers proposés aux élèves. Nous avons donc eu recours à un paradigme classique en psychologie expérimentale de pré-test – ateliers – post-test. Le pré-test permet d'obtenir une mesure initiale des compétences de génération d'idées des élèves sur des exercices de créativité différents de ceux utilisés dans les ateliers. Le post-test, identique au pré-test, réalisé après les interventions pédagogiques, permet de mesurer l'impact des différents ateliers et de déterminer si les élèves parviennent à transférer les connaissances qu'ils ont acquises à d'autres contextes.

Même si le simple fait de disposer d'outils de génération d'idées a considérablement stimulé la motivation et l'engagement des élèves dans les exercices de rédaction, les premières données soulignent que seule la méthode dite de détection/inhibition de la fixation permet d'obtenir un tel transfert attestant d'une réelle stimulation de la créativité chez les élèves.

Cette expérience de recherche-intervention confirme qu'un travail collaboratif du monde scientifique et du monde de l'éducation est possible et source de progrès mesurable objectivement dans le domaine de la créativité. ●

1. Laboratoire de Psychologie du Développement et de l'Éducation de l'enfant (CNRS).

2. Cassotti M. et al. (2016). Inhibitory control as a core process of creative problem solving and ideas generation from childhood to adulthood. *New Directions for Child and Adolescent Development*, 151, 61-72.

Troubles d'apprentissage et difficultés scolaires : l'apport des sciences cognitives

par Hervé Glaser

Dès que l'école a été rendue obligatoire et universelle en France (1882), s'est posée d'emblée la question des enfants en difficulté dans un système scolaire uniformisé. On s'est d'abord interrogé sur les compétences générales de ces élèves, et les premiers tests psychométriques ont été développés et utilisés dans le but de les identifier dans leurs aptitudes et besoins. Les réflexions et recherches visant l'évaluation et la prise en charge de ces enfants ont conduit à un début de modélisation des compétences intellectuelles humaines, avec l'individualisation des divers facteurs contribuant à la réalisation d'une tâche, scolaire ou non. Ces tests « d'intelligence », tels le Binet-Simon (1905), permettaient surtout d'identifier les enfants ayant les plus grandes difficultés en particulier dans le domaine de la dynamique intellectuelle et de les orienter vers des filières et structures dédiées.

La réponse pédagogique est néanmoins restée longtemps assez peu spécifique et adaptée. Pendant des décennies, et jusqu'à la loi de 2005¹, des classes et des filières spécialisées ont été créées, visant la prise en charge scolaire de ces enfants, le plus souvent coupés de l'expérience traditionnelle des autres élèves. Depuis les mouvements de la société faisant évoluer la

notion de handicap et l'avènement des notions d'abord d'intégration, puis plus récemment, d'inclusion scolaire, des dispositifs de type ULIS ont vu le jour², visant la participation des enfants à besoins particuliers aux classes ordinaires, tout en proposant un complément d'accompagnement *ad hoc* au sein d'une unité spécialisée. De même, avec l'augmentation drastique des enfants reconnus comme nécessitant un accompagnement renforcé (doublement du nombre d'enfants en situation de handicap scolarisés en milieu ordinaire entre l'avènement de la loi de 2005 et 2015³), l'aide humaine individuelle dédiée à un enfant en particulier (notamment les auxiliaires de vie scolaire – AVS) s'est fortement accrue⁴.

Malgré l'augmentation des moyens humains et financiers⁵ mis à disposition des élèves à besoins particuliers, les méthodes ont peu évolué. Pour ce qui est du handicap moteur ou sensoriel, la formation des personnels (enseignants, encadrement, auxiliaires de vie scolaire) s'est depuis longtemps structurée⁶. Pour ce qui est des handicaps cognitifs, et particulièrement des troubles spécifiques des apprentissages, l'information et la formation des acteurs s'avèrent être encore le plus souvent le fait de la volonté personnelle des individus.

La demande d'adaptation par les parents, mieux informés et accompagnés par des associations d'usagers ayant un impact plus large⁷, s'est accrue, sans rencontrer toujours des réponses adéquates. Les modifications et évolutions institutionnelles sont devenues plus nombreuses (PAI puis PAP, PPS⁸), tentant de répondre d'une part à l'appel d'air induit par la reconnaissance du handicap scolaire comme faisant partie du handicap tout court, et d'autre part à la meilleure prise de conscience et reconnaissance de cette réalité. Cependant, l'identification de ces besoins et la mise en œuvre de stratégies pédagogiques adéquates mettent encore le plus souvent les enseignants dans une situation inconfortable, du fait de leur faible connaissance des troubles dont il est fait état, et des réponses possibles pouvant être apportées.

Pourtant, le développement des sciences cognitives a permis d'affiner l'analyse, de mieux comprendre les enjeux pour l'enfant en difficulté et d'apporter des réponses précises et plus ciblées. En effet, le paradigme du

traitement de l'information par le cerveau permet la modélisation des mécanismes généraux des apprentissages et de leurs spécificités.

I. De la difficulté scolaire aux troubles des apprentissages

En France, comme dans tous les pays de l'OCDE, 15 à 20 % des élèves sont décrits comme étant en échec scolaire, défini comme une sortie du système éducatif secondaire sans qualification formelle⁹. Cependant, les causes de cet échec scolaire sont multiples : environnement socioéconomique et/ou familial défavorable, faible connaissance des arcanes du système éducatif, poids limité de la formation scolaire dans les ambitions parentales, concentration des enfants en difficulté au sein des mêmes établissements, rendant l'impact pédagogique des enseignants moins favorable... Le système français, dans ces aspects, est d'ailleurs l'un des plus inéquitables dans les comparaisons internationales¹⁰. Outre ces paramètres, les élèves peuvent être gênés dans leur réussite par des facteurs plus individuels : troubles émotionnels ou comportementaux, phobie scolaire, troubles des apprentissages.

C'est dans cette dernière dimension que les sciences cognitives se sont avérées les plus fécondes pour la détection, le diagnostic et la prise en charge des enfants en difficulté. En effet, le modèle du traitement de l'information a permis d'isoler et de modéliser divers types de troubles en entités autonomes, et de viser leur prise en charge rééducative et scolaire de la manière la plus déterminante. Définis comme une difficulté durable à maîtriser des compétences fondamentales, avec un impact fonctionnel significatif dans la vie quotidienne (y compris la scolarité), les troubles des apprentissages s'entendent à l'exception du retard intellectuel chez un enfant

normalement exposé en qualité et intensité à ces apprentissages¹¹. On connaissait depuis longtemps chez l'adulte les circuits du traitement du langage. Depuis, les modèles développementaux de la cognition ont pu mettre en évidence les voies spécifiques et les étapes de l'acquisition du langage chez l'enfant, et ce dès la naissance¹², le développement des praxies¹³, les aspects précoces du sens du nombre¹⁴, les voies de la lecture¹⁵, la maturation des fonctions attentionnelles et exécutives¹⁶, ou encore les capacités de traitement des signaux sociaux¹⁷. Outre l'identification de ces réseaux dédiés, on parvient désormais à isoler cliniquement au moyen d'outils étalonnés les troubles spécifiques associés à ces diverses dimensions cognitives, révolutionnant en passant les stratégies d'identification et la compréhension de ces troubles.

II. Le primat du bilan neuropsychologique dans la prise en charge des troubles des apprentissages

1 Un bilan neuropsychologique préalable

Avant d'envisager une prise en charge adaptée des enfants en difficulté scolaire présentant des troubles des apprentissages, la mise au jour à la fois des aptitudes mais aussi de la nature et de l'intensité de ces troubles est capitale. En effet, un même « symptôme » scolaire peut en réalité recouvrir des aspects variés de la cognition, qu'il s'agit d'isoler et d'analyser avant de formuler des recommandations précises en termes d'interventions ciblées et efficaces.

Depuis une vingtaine d'années, le développement des sciences cognitives a permis de proposer, de valider et d'étalonner de nombreux outils cliniques de dépistage des troubles des apprentissages. Ces outils sont à même, le plus souvent, d'analyser de manière fine les étapes du traitement de l'information par le cerveau au cours d'une tâche donnée. Se rapportant à des modèles sous-jacents du traitement attendu chez l'enfant tout-venant, ces épreuves permettent d'isoler les étapes préservées et de pointer celles qui sont plus fragiles, voire déficitaires.

Cependant, la réalisation d'un bilan neuropsychologique à visée diagnostique ne se résume pas à l'administration d'une série de tests. Elle est la mise en œuvre d'une démarche hypothético-déductive sérieuse, partant des interrogations initiales issues d'une anamnèse complète et affinant ses investigations par arbre de décision¹⁸. En effet, très peu (sinon aucune) épreuve cognitive n'est « pure », ne convoquant qu'un seul aspect isolé de la cognition. Une véritable démarche diagnostique doit systématiquement s'enquérir, dans un souci d'exhaustivité, des fonctions préservées et, le plus finement possible, de la ou des étapes pouvant expliquer l'échec lors de la réalisation d'une tâche.

Trouble du graphisme ?

Xavier a 9 ans et est scolarisé en classe de CM1 au sein de l'école primaire publique du bourg où il est domicilié. Son père est directeur du collège voisin, sa mère assistante sociale. L'enfant unique du couple est en difficulté scolaire depuis le CP. Un trouble du graphisme a été observé. Une prise en charge a été rapidement entreprise en psychomotricité, dans le but d'améliorer et d'accélérer le geste. L'enfant investit volontiers les séances de rééducation, mais les progrès, dans les faits, sont limités. Après deux ans de soins, l'enfant ayant de plus en plus de mal à suivre, une souffrance scolaire s'installe. Les parents s'inquiètent des enjeux du passage en 6^e. Un bilan neuropsychologique complet est réalisé. Il s'avère que cet enfant très pertinent (aptitudes intellectuelles dans l'intervalle supérieur) est en réalité non lecteur. La dyslexie massive non seulement lui interdit l'accès aux consignes écrites, mais rend extrêmement difficile l'encodage des lettres nécessaire au graphisme manuel. Ne présentant aucun trouble moteur ou praxique, Xavier ne maîtrise donc pas le code écrit dans ses deux dimensions réceptive (lire) ou expressive (transcrire). La prise en charge en psychomotricité ne peut donc avoir d'impact déterminant. La réorientation vers une prise en charge énergétique en orthophonie est désormais destinée à stimuler les voies de lecture qui sont non fonctionnelles. En attendant d'éventuels progrès dans le domaine du langage écrit, des stratégies de contournement du trouble sont initiées (supports pédagogiques en format électronique, retour vocal informatisé, dictée orale pour les réponses...).

Cas pratique

Une élève lente

Marie a 11 ans et vient d'entrer en 6e. La scolarité primaire a été laborieuse, mais l'enfant est investie, combative. L'entourage familial est soutenant. Les débuts au collège sont néanmoins préoccupants. L'enfant est particulièrement lente. La réalisation des devoirs est écrasante. Le temps passé à les faire occupe une grande partie du temps libre et envahit toute la sphère familiale, mettant à contribution de manière disproportionnée la maman qui a déjà réduit son temps au travail afin d'accompagner sa fille. Diverses prises en charge (orthophonique, psychologique...) semblent avoir apporté un certain réconfort à l'enfant, mais la transition vers le collège s'avère inquiétante. Un bilan neuropsychologique complétant des bilans orthophoniques est réalisé. Il révèle l'intrication d'un trouble du regard important, avec en particulier des saccades¹⁹ mal calibrées et peu endurantes. La fixation est parfois erratique. Séparément, les fonctions attentionnelles sont labiles, la vigilance est fragile, avec une authentique sensibilité aux captures attentionnelles. La mise en place d'une prise en charge en orthoptie, visant la qualité et l'automatisation des mouvements oculaires nécessaires à la lecture est immédiatement engagée (organisation et entraînement des saccades de progression, de régression, grande saccade oblique de retour à la ligne...). Des aménagements sont proposés en classe, comme à la maison, afin de limiter l'impact du trouble de l'attention. Un suivi en neuropédiatrie est initié, afin d'observer l'enfant et d'envisager, éventuellement dans un second temps, l'administration d'une médication psychostimulante.

« Depuis une vingtaine d'années, le développement des sciences cognitives a permis de proposer, de valider et d'étalonner de nombreux outils cliniques de dépistage des troubles des apprentissages. »

C'est donc par recoupements successifs, partant des interrogations initiales des parents, des enseignants et du clinicien et évaluant de manière systématique et organisée que l'on pourra aboutir à un diagnostic fin, en évitant le risque de négliger un ou plusieurs facteurs pouvant expliquer les difficultés de l'enfant.

Un garçon « immature »

Ali a 10 ans. Au vu de sa grande « immaturité », et le voyant peu prêt aux apprentissages formels du début de l'élémentaire, il a redoublé sa Grande Section de maternelle, avec l'accord des parents, et les encouragements des enseignants. Ali est brouillon, agité. Son comportement en classe est inadapté, impulsif. Il gêne les autres enfants, interrompt les adultes. Son graphisme est très limité : ses dessins consistent en des traces désorganisées sur l'espace de la page. Ses productions sont pauvres et répétitives. Il peut faire cinq fois le même dessin en quelques minutes. À l'entrée au CP, les apprentissages formels n'ont pourtant pas été trop difficiles : la lecture est acquise dans les temps. La numération est plus difficile et le dénombrement est le plus souvent chaotique et inefficace. Pour ce qui est de l'écriture, Ali est en panne. Il écrit n'importe où dans la page. Les lettres sont mal formées, il y a beaucoup de ratures. On parle d'Ali comme d'un garçon désinvolte, ne prenant pas sa place d'élève, peu respectueux des adultes. Il interrompt, se lève au beau milieu d'une activité et circule dans la classe, voire dans le couloir, sans y avoir été invité. Il est souvent puni de récréation, car dans la cour, Ali peut devenir très agité, frappant certains enfants quand les jeux ne vont pas dans son sens. Le bilan neuropsychologique réalisé met en évidence un trouble dysexécutif massif. Les capacités attentionnelles ne sont pas particulièrement en cause. La planification, l'inhibition sélective sont très déficitaires. Au cours des tâches étalonnées, les persévérations et les bris de règles sont notables. Des aménagements sont mis en œuvre en classe comme à la maison. Un permis à points permet aux parents comme aux enseignants de donner un feedback régulièrement à l'enfant. Il bénéficie de petits privilèges quand le comportement s'est amélioré.

2 Les grands axes du bilan neuropsychologique

Un bilan neuropsychologique visant un diagnostic fin et l'articulation de recommandations précises se doit d'être « à large spectre ». C'est-à-dire qu'il doit couvrir l'ensemble des dimensions intellectuelles et cognitives de l'enfant :

- dynamique intellectuelle,
- fonctions sensori-motrices et praxies (dont le graphisme),
- langage oral en expression comme en compréhension,
- langage écrit (en fonction de l'âge de l'enfant) : lecture et orthographe,
- sens du nombre,
- processus mnésiques,
- fonctions attentionnelles,
- fonctions exécutives,
- selon les questions sous-jacentes : cognition sociale, fonctionnement émotionnel, personnalité...

Intégrant deux ambitions, celle de l'exhaustivité et de l'approfondissement, un bilan neuropsychologique est une démarche intensive en temps et investissement de la part du praticien. Quand il est correctement mené, il évite les « angles morts », confondant signe et mécanismes sous-jacents.

3 Où faire réaliser un bilan ?

Les Centres de Référence pour les troubles du langage (ou des apprentissages) selon le Centre Hospitalo-Universitaire (CHU) duquel ils dépendent, sont équipés pour proposer des bilans complets. Du fait de la disponibilité des praticiens, il peut s'étaler sur plusieurs jours, mais permet aussi une observation comportementale de l'enfant, avec ses pairs et des adultes. Il est construit comme une approche pluridisciplinaire, laissant à chaque praticien la responsabilité de sa spécialité propre. Si la démarche est gratuite, les listes d'attente sont longues. Certains organismes privés proposent cette démarche approfondie. Le CERENE par exemple (Centre de

Référence pour l'Évaluation Neuropsychologique de l'Enfant) propose une approche intégrée, permettant au neuropsychologue de mettre en perspective l'ensemble des aspects intellectuels et cognitifs, avec une unité de vue limitant les risques lors de l'interprétation des données issues du bilan.

III. La mise en place d'une feuille de route pour l'enfant, les enseignants et les parents

Si les parents et les enseignants sont, en première intention, les mieux placés pour repérer et détecter les difficultés de l'enfant au cours de son développement et de sa scolarité, le diagnostic doit être réservé à des praticiens chevronnés. En effet, l'ambition, une fois une évaluation fiable et approfondie réalisée, est d'articuler des recommandations quant aux prises en charge nécessaires aux progrès de l'enfant.

L'apport des sciences cognitives est ici déterminant, car outre la capacité à élucider la ou les dimensions en cause dans les difficultés de l'enfant, la mise en œuvre des prises en charge et des adaptations pourra viser la ou les étapes des traitements qui sont en cause.

Notons d'emblée que les propositions d'adaptation ne seront généralement pas univoques du fait de deux éléments clés :

- identification et mesure du trouble vs. impact fonctionnel,
- co-occurrence des troubles.

1 Impact fonctionnel

La complexité des prises en charge scolaires des troubles provient de la difficulté dans les faits à traduire la mesure objective des troubles en recommandations ajustées au plus près des besoins de

l'enfant. En effet, pour une même mesure, l'impact au quotidien dans la vie et la scolarité de l'enfant dépendra de multiples facteurs : compétences générales de l'enfant, capacités de compensation spontanée, mise en œuvre efficace des stratégies de contournement, acceptation des outils d'aide, engagement scolaire de l'enfant, implication parentale... Cet impact fonctionnel du trouble est du reste le seul qui devrait intéresser l'enseignant. La définition diagnostique du trouble devrait de ce point de vue paraître relativement secondaire, et la nosographie²⁰, le plus souvent inconnue des professionnels de la pédagogie peut même parfois être source de biais, au regard des savoirs plus ou moins fermes ou investis de représentations erronées (ex : trouble de l'attention vs. trouble du comportement vs. contexte éducatif).

De ce point de vue, les innovations institutionnelles issues des tentatives de l'Éducation nationale de prendre en compte cette dimension fonctionnelle du trouble peinent à trouver leur plein effet du fait de la difficulté de l'enseignant à évaluer l'impact concret des troubles chez l'élève. Le PAP (Plan d'accompagnement personnalisé), initié en 2015 pour alléger et raccourcir les circuits d'aide aux enfants en difficulté scolaire redonnait partiellement l'initiative aux enseignants dans le but de rester au plus près des besoins pédagogiques nécessaires à la réalisation du potentiel de l'enfant. Mais la formation trop limitée des pédagogues dans le domaine des sciences cognitives et la concentration de l'enseignant sur les contenus des apprentissages, au détriment des mécanismes généraux prévalant, ne permettent pas toujours de partir des observations depuis la salle de classe pour construire et accompagner les adaptations nécessaires. Reste donc le plus souvent encore au neuropsychologue d'articuler les recommandations de base.

« La complexité des prises en charge scolaires des troubles provient de la difficulté dans les faits à traduire

la mesure objective des troubles en recommandations ajustées au plus près des besoins de l'enfant »

Les conférences de consensus ne parviennent pas toujours à converger vers des dispositions véritablement opérationnelles dans le domaine de la mesure de l'impact fonctionnel des troubles des apprentissages. Le livret de recommandation de la Caisse nationale de solidarité pour l'autonomie publié en 2015²¹, en corolaire de la mise en place du PAP, dans l'intention de créer un référentiel commun lors de l'évaluation du trouble garde comme principe la mesure objective des difficultés de l'enfant (l'aspect diagnostic) en affirmant le trouble dans le cas d'un écart d'au moins 2 écarts-types à la moyenne attendue des performances de l'enfant. Malheureusement, traduite sous cette forme, l'évaluation reste cantonnée à l'objectivation de la réalité du trouble en méconnaissant la traduction dans la vie quotidienne (et scolaire) dudit trouble...

2 Co-occurrence des troubles

L'intrication des troubles est un autre élément souvent source de complexité dans la déclinaison des recommandations nécessaires au soutien de l'enfant dans son développement et sa scolarité. Butterworth²² met en évidence une co-occurrence importante des troubles du développement cognitif chez l'enfant. Au cours du bilan, du reste, la vigilance est de mise afin de ne pas ramener l'ensemble des difficultés de l'enfant à une cause apparemment unique, mais de rester sensible jusqu'au bout de l'évaluation à la règle générale de l'autonomie des dimensions cognitives (confirmée par l'observation de double dissociation possible entre les troubles²³), et avec une vigilance particulière à porter aux fonctions de régulation (attentionnelles et exécutives en particulier).

La co-occurrence des troubles, outre la complexité diagnostique

additionnelle qu'elle entraîne, interroge quant aux effets de potentialisation des troubles entre eux. En effet, un trouble de la lecture isolé aura certainement un impact fonctionnel plus limité qu'un trouble de lecture majoré par un trouble concomitant de l'attention. Il est probable du reste que l'impact ne pourra être estimé comme une simple addition des effets, mais par une combinaison plus péjorative des effets individuels.

Intrication des troubles

Louise a 13 ans et est scolarisée en 6^e. Elle a redoublé deux fois une classe. Les apprentissages sont laborieux, dans tous les domaines. L'enfant est élevée par une mère isolée qui travaille beaucoup, le suivi à la maison manque de continuité. La maman elle-même n'est pas forcément très à l'aise dans les apprentissages scolaires. Un bilan neuropsychologique met en évidence des capacités intellectuelles dans la moyenne attendue. Cependant, Louise doit être beaucoup étayée, et ce dans toutes les tâches. Elle a sinon tendance à se disperser. Au fur et à mesure du prolongement des séances, le besoin de soutien devient de plus en plus prégnant et essentiel pour garantir la validité des données. L'enfant présente par ailleurs des troubles ou des fragilités dans plusieurs dimensions cognitives : dyslexie mixte, éléments de dyscalculie, trouble de l'attention (sans instabilité motrice), trouble dysexécutif. En classe, les progrès sont modérés, il faut souvent refaire, et ce que l'on croyait acquis est régulièrement oublié. Pourtant les processus mnésiques sont indemnes. Chez cette enfant multi-dys, les prises en charge rééducatives sont nombreuses (orthophonie, ergothérapie, pédopsychiatrie...). Tous les professionnels sont en difficulté et évoquent des progrès limités dans leur domaine respectif. Après révision du projet de Louise, on constate chez la jeune fille que l'impact du syndrome dysexécutif est déterminant. L'addition des objectifs scolaires et paramédicaux aide peu l'enfant, du fait que dans la même séance et dans la même journée, trop de compétences sont travaillées. Perdue, Louise survole tout ce qu'elle fait. Les effets d'intrusion entre apprentissages sont patents : l'enfant mélange tout. Après discussion pluridisciplinaire, et la mise au jour de ces éléments, une réorientation des objectifs scolaires et paramédicaux est suggérée : viser un objectif unique au cours d'une séance ou d'un cours, entraîner la compétence visée et chercher à automatiser l'acquisition avant de passer à un autre objectif. Les progrès seront lents, mais l'enfant, moins dispersée, identifiera plus aisément ce qu'on attend

d'elle, et pourra graduellement s'appuyer sur ses acquis incrémentaux, sans se perdre dans un trop plein de stimulations.

IV. Stimulation des fragilités, contournement des difficultés

Par le biais du paradigme du traitement de l'information, les sciences cognitives ont permis d'identifier certains circuits présidant à des apprentissages spontanés (langage, sens du nombre...) ou culturels (lecture, praxies...). Pour les enfants présentant des troubles des apprentissages, la capacité de pouvoir singulariser la ou les étapes des traitements qui sont en cause est une avancée considérable dans les moyens de prise en charge. À l'exception des troubles de l'attention pour lesquels le praticien dispose d'une pharmacopée efficace²⁴, il n'existe pas d'approches validées permettant de compenser les troubles des apprentissages autrement que par la stimulation des réseaux dysfonctionnels ou le contournement des troubles constatés.

1 La stimulation cognitive

Elle consiste à viser le ou les traitements déficitaires et à entraîner l'enfant à faire travailler « ce qui marche moins bien ». En effet, si le sujet ne crée plus ou peu de nouveaux neurones après la naissance, on sait que les apprentissages, s'appuyant sur la plasticité cérébrale, permettent d'enrichir les cortex visés en connexions efficaces, d'éliminer celles qui le sont moins et de structurer les réseaux. C'est la base même de la notion d'apprentissage. Or chez l'enfant présentant des troubles cognitifs, il n'existe aucun autre moyen d'atteindre ces réseaux que de les stimuler par des exercices appropriés. Le fait de pouvoir viser le ou les cortex en cause, plutôt

que d'espérer des progrès par le biais d'une exposition à des apprentissages plus larges ou non ciblés, est un gage bien meilleur de succès. On évite ainsi les pertes de temps, le découragement voire l'épuisement de l'enfant et de son entourage. Si la notion de période critique est largement discutée, il est prudent d'engager une prise en charge ciblée et d'une intensité appropriée de façon précoce, afin de s'appuyer sur la plasticité cérébrale particulièrement forte pendant l'enfance. Notons aussi que les recherches mettent en évidence l'activation et l'expression de certains gènes à des moments variés du développement cérébral. L'ouverture ou la réouverture de certaines fenêtres développementales peuvent permettre des acquisitions jusque-là déficitaires, grâce à une exposition systématique de l'enfant.

« La stimulation cognitive vise le ou les traitements déficitaires et à entraîner l'enfant à faire travailler « ce qui marche moins bien ». »

Une stimulation ciblée

Juliette a 11 ans et va entrer en 6^e. Les apprentissages des classes primaires ont été laborieux. Lente, l'enseignante l'engage souvent à rester en classe pendant la récréation pour terminer son travail. La lecture est particulièrement pénible, et fatigable. Elle n'accède pas immédiatement au sens de ce qu'elle lit, et doit souvent relire plusieurs fois. Des années de prise en charge orthophonique dédiées au langage écrit n'ont pas produit les bénéfices escomptés.

Un nouveau bilan met en évidence que la conscience phonologique est préservée (ou a bien progressé), que les deux voies de lecture (assemblage et adressage) situent désormais l'enfant dans la petite moyenne par rapport à ses pairs du même âge et du même niveau de classe. En revanche, le bilan approfondi de langage oral met en évidence un discret mais authentique trouble de la compréhension, avec une difficulté à interpréter les consignes complexes, le langage élaboré, les métaphores, le second degré et l'implicite. Répéter une simple phrase de 15 mots lui est difficile.

Il ne s'agit donc pas d'un trouble de la lecture à proprement parler, mais d'un trouble de type dysphasique, sur le versant réceptif, alors que le versant expressif est plutôt bien préservé, particulièrement quand Juliette reste dans la sphère du langage spontané. Les conséquences sur la lecture interviennent donc en réalité dans les dernières étapes d'accès au sens. La prise en charge orthophonique sera donc réorientée vers le langage oral (enrichissement du vocabulaire, analyse morphosyntaxique de la phrase matérialisée sous la forme de pictogrammes, travail dédié au langage d'un certain niveau de complexité). Deux ans plus tard, Juliette reste toujours plus lente que ses pairs, mais la lecture est nettement plus fonctionnelle et devient au contraire un véritable point d'appui pour compenser les difficultés à l'oral. Le support stable du texte est une ressource précieuse pour l'enfant.

2 Le contournement des troubles

Les troubles des apprentissages touchent de manière élective des dimensions cognitives clés pour le bon fonctionnement de l'enfant dans sa vie quotidienne, et particulièrement sa scolarité. Pour être qualifiés de troubles, les dysfonctionnements doivent avoir un impact significatif et *durable* sur les potentialités de l'enfant. Durabilité ne veut pas dire fixité, ce qui autorise d'anticiper des progrès dus à la maturation cérébrale endogène ainsi qu'un impact des prises en charges et stimulations cognitives ciblées. Cependant, les progrès et compensations possibles prendront du temps, et l'horizon se compte en années. Pendant ce temps, la scolarité suit son cours, et les risques d'échec scolaire sont élevés²⁵. L'épuisement de l'élève (et de la famille) est courant, ainsi que les orientations non souhaitées. Mettre en place au plus vite des stratégies de contournement est donc essentiel afin d'éviter une perte de chances pour l'enfant.

Le contournement des troubles consiste à s'appuyer sur les fonctions cognitives préservées de l'enfant, tout en évitant de trop solliciter celles qui sont fragiles ou déficitaires. Par exemple pour l'enfant dyslexique, la stratégie de contournement prioritaire est de diminuer (ou supprimer) l'écrit (lecture), et de privilégier la voie orale. L'adulte (enseignant, auxiliaire de vie scolaire ou parent) lira les consignes à l'enfant. Si la voie de production de l'écrit est aussi touchée (ce qui est courant, mais avec une intensité qui peut être différente, en plus ou en moins), l'adulte pourra prendre les réponses de l'enfant à l'oral et, le cas échéant, en fonction de la trace finale demandée, jouer le rôle de scripteur. Bien entendu cette stratégie restera pertinente si les voies du langage oral (réceptive et/ou expressive) sont préservées.

« Le contournement des troubles consiste à s'appuyer sur les fonctions cognitives préservées de l'enfant, tout

en évitant de trop solliciter celles qui sont fragiles ou déficitaires. >>

La plupart des troubles des apprentissages se prêtent aux stratégies de contournement. Les bénéfices attendus dépendent donc bien entendu de la qualité des fonctions préservées. Cependant, ces aménagements mêmes peuvent comporter des enjeux cognitifs non nuls. Par exemple, pour ce qui est de la lecture, le texte écrit constitue une mémoire externe. C'est-à-dire que le normo-lecteur peut toujours se rapporter à cette trace, y retrouver les éléments oubliés. Pour le lecteur médiocre ou déficitaire, cet avantage de l'écrit est nettement diminué, voire annulé. Le retour à l'écrit est trop coûteux et inefficace. En transposant la lecture vers un passage par la voie orale, on oblige l'enfant à maintenir les informations en tête. Le recours au texte est faible. Le risque d'une surcharge en mémoire de travail est donc élevé. L'enfant ne pourra conserver les informations pertinentes que le temps de les utiliser pour répondre aux exigences de l'enseignant. C'est pourquoi une simple lecture à l'enfant sera insuffisante. Il faut que l'accompagnant puisse lire et relire, autant de fois que nécessaire le texte et les consignes à l'élève. Il faut aussi que l'élève soit en mesure de faire une évaluation métacognitive²⁶, implicite ou explicite, de ce qu'il a retenu ou pas, de ce dont il a besoin pour répondre à la demande, et de solliciter des compléments si nécessaire.

3 Les technologies d'assistance

Les technologies d'assistance permettent désormais à l'enfant présentant des troubles des apprentissages, et ce de manière courante et à un coût modéré ou nul, de contourner ses troubles. Ces outils largement disponibles, voire intégrés de manière native dans les logiciels proposés, sont des solutions limitant le recours à l'aide humaine, et favorisent l'autonomie de l'enfant. La maîtrise de

ces outils informatisés nécessite chez l'enfant le recours à une prise en charge en ergothérapie. Ce professionnel s'assurera de la bonne adéquation entre l'outil et l'enfant, et des voies d'automatisation de son usage. Parmi ces outils on citera : le retour vocal (du texte à l'énonciation), la dictée vocale (de l'énonciation au texte), la note vocale (trace vocale), le prédicteur orthographique (il propose les mots les plus fréquents ou les plus probables au fur et à mesure de la frappe), le correcteur orthographique (alerte sur une erreur orthographique possible), le clavier de l'ordinateur, les formulateurs mathématiques (rubans, plug-ins), les logiciels de tracé en géométrie...

Les moyens et outils de contournement sont des auxiliaires essentiels de l'enfant présentant des troubles des apprentissages. Cependant, un bilan neuropsychologique fin reste nécessaire afin de confirmer que les voies de traitement de substitution sont elles-mêmes intègres, et que la modification du format de l'information ainsi proposée n'induit pas à son tour des biais qui rajouteraient des contraintes supplémentaires à l'élève. De plus, une bonne automatisation dans l'usage de ces outils est impérative, afin d'éviter d'encombrer l'enfant avec des propositions qui ne seraient pas fluides et opérationnelles.

« Les moyens et outils de contournement sont des auxiliaires essentiels de l'enfant présentant des troubles des apprentissages. Cependant, un bilan neuropsychologique fin reste nécessaire afin de confirmer que les voies de traitement de substitution sont elles-mêmes intègres. »

Contournement des troubles

À 9 ans, Henri se présente comme un garçon énergique, actif et sportif. Il est cependant en difficulté à l'école. Scolarisé dans un environnement bilingue, il peine à suivre les enseignements. Un redoublement de classe est suggéré en CM1. Un bilan neuropsychologique confirme que Henri est un garçon pertinent, mais qui pâtit d'une dyspraxie mixte, gestuelle et visuo-constructive, avec un impact significatif sur l'écriture manuelle. Son graphisme est simplement illisible. Au surplus, un trouble de l'attention co-occurent est diagnostiqué. Une prise en charge par méthylphénidate est engagée. Elle est bien tolérée et induit des bénéfices notables dans l'implication scolaire de l'enfant.

Après plusieurs années de rééducation en graphothérapie, les progrès du graphisme d'Henri ont été négligeables. Vitesse et lisibilité des productions sont très insuffisantes, et l'enfant ne peut laisser des traces utilisables. Il paraît donc important d'engager une stratégie de contournement des troubles, par le moyen du clavier de l'ordinateur. Une prise en charge en ergothérapie visant la bonne adéquation de l'apprentissage du clavier (clavier caché ou pas ? étapes, progression...) est mise en œuvre. Au bout de quelques mois, Henri est partiellement en état de réaliser certaines productions scolaires au clavier.

Un bilan de suite à l'âge de 13 ans met en évidence une bonne maturation des compétences praxiques. En revanche, le graphisme reste très déficitaire. Cherchant à éviter les regards stigmatisants de ses pairs, Henri a plus de mal à utiliser le clavier de l'ordinateur en classe. Les enseignants font de grands efforts pour le relire, mais pensent toujours pour certains d'entre eux que leur élève « ne fait pas assez d'efforts ».

À la demande de la famille, une nouvelle évaluation est sollicitée dans le but d'anticiper les besoins d'aménagement aux examens (baccalauréat). Le graphisme n'a toujours pas progressé. Henri écrit très vite, mais la lisibilité est quasi inexistante pour tout autre que lui-même (et encore...). La frappe au clavier est en revanche fonctionnelle. L'orthographe est bien

stabilisée. La production écrite issue de l'utilisation de l'ordinateur (dictée, expression libre) est désormais de bonne qualité, et Henri parvient à développer pleinement ses idées. Il en produit le double quand il passe par l'ordinateur comparé à ce qu'il produit quand il écrit à la main.

Combinaison de la stimulation ciblée et du contournement des troubles

Pascal est un garçon de 8 ans, en grande difficulté scolaire depuis les premières classes. Dès la maternelle, on mettait en évidence une adaptation scolaire peu harmonieuse. Très anxieux, l'enfant pleurait beaucoup à l'école, restait souvent seul. Il s'exprimait peu mais parvenait néanmoins à suivre les consignes. Des bilans multiples rassuraient sur la dynamique intellectuelle. La structuration du langage paraissait normale, aussi bien sur le versant expressif que réceptif. Pourtant, au vu des fragilités perçues par les parents comme par les enseignants, une orientation précoce en CLIS²⁷ dédiée aux enfants présentant des troubles du langage était décidée d'un commun accord. Les bénéfices se révélèrent faibles, Pascal restant en difficulté, replié sur lui-même. Un diagnostic de trouble envahissant du développement était posé. Des prises en charge dans tous les domaines étaient engagées : psychomotricité, pédopsychiatrie, orthophonie. Les acquis formels étaient contrastés. Si la numération était assez aisément acquise et que Pascal montrait une vraie appétence pour les domaines scientifiques et techniques, faisant une grande consommation de documentaires sur ces sujets, il était très en panne dans le domaine du langage écrit. Une dyslexie mixte sévère était mise en évidence, avec des éléments évocateurs d'une agnosie des signes conventionnels de la lecture (mais pas des symboles numériques).

Après un certain nomadisme diagnostique et scolaire, Pascal est scolarisé au sein d'une structure spécialisée dédiée aux enfants présentant des troubles des apprentissages. L'enfant étant non lecteur, on engage immédiatement une stratégie de contournement des troubles. En effet, la lecture est non fonctionnelle, et l'enfant s'épuise à déchiffrer, avec peu ou pas d'accès au sens. Outre l'enseignement à l'oral de l'enseignant, on fournit des supports de cours, que l'enfant n'a ainsi pas besoin de noter/copier. En effet, la transcription est rendue très

difficile du fait du faible accès au code écrit en général. De plus, utilisant ces supports en format électronique, Pascal peut se faire lire les consignes et les textes, par l'intermédiaire d'un logiciel de retour vocal. Bien que le type de réponses possibles ait été simplifié (entourer, souligner, surligner, déplacer...), l'élève peut aussi donner sa réponse en note vocale.

Dans le même temps, une prise en charge énergétique en orthophonie est entreprise, à raison de trois à quatre séances par semaine. En effet, nul besoin de « saupoudrage », il est important de mettre en place une prise en charge dédiée et intensive, afin de viser la stimulation des réseaux corticaux dysfonctionnels. Chez Pascal, toutes les lettres d'imprimerie ou cursives ne sont pas encore reconnues, la conscience phonologique est très déficitaire. On ne passera donc pas par la stimulation classique de la voie d'assemblage. On passera par une stratégie d'imprégnation syllabique, qui va chercher des unités plus larges du langage écrit. On s'appuie aussi sur les morphèmes (/lait/ pour lait, laiterie, laitière, allaiter, laitage...). Pour ce qui est de la voie d'adressage, Pascal se constitue doucement un lexique, mais l'approche est très laborieuse, les acquis sont lents.

En dépit de cette approche croisée contournement/stimulation, les progrès sont initialement lents. Enfant, parents et équipes sont régulièrement prêts à se décourager. Cependant, à partir de l'âge de 11 ans, on note une certaine accélération des progrès (effet de seuil des acquis ? maturation endogène des cortex ? réorganisation de ces cortex au contact des stimulations ciblées ?). La lecture devient plus fluide, et surtout, à voix basse, l'accès au sens devient meilleur. Pascal devient plus autonome, et même s'il a besoin le plus souvent de ses outils de contournement pour les consignes complexes ou les textes longs, il devient plus fonctionnel pour les consignes simples et les textes courts.

V. Pédagogie renouvelée et différenciée : le travail de l'enseignant

Si les sciences cognitives permettent de mieux comprendre le fonctionnement standard du cerveau humain, et de dépister les troubles des apprentissages, elles éclairent aussi d'un nouveau jour les enjeux pédagogiques pour l'enseignant. En effet, encore souvent présentée comme un talent *intuitu personae* du pédagogue, la faculté de transmettre de manière efficace est désormais nourrie par les connaissances acquises dans ce champ.

En particulier, l'enseignant peut désormais être armé d'un cadre conceptuel lui permettant de penser ses pratiques, dans leurs dimensions cognitives²⁸. Le paradigme du traitement de l'information suggère en effet d'analyser une tâche scolaire donnée sous l'angle d'au moins deux dimensions : le contenu des apprentissages et le format de ces apprentissages.

« Chez l'enfant présentant des troubles des apprentissages, ce sont d'abord les voies instrumentales d'entrée et de sortie qui sont perturbées. Charge à l'enseignant d'identifier les diverses manières dont les contenus peuvent être présentés aux élèves, et la variété des voies de réponses possibles. »

Les enjeux liés à la prise en charge scolaire des enfants présentant des troubles des apprentissages rendent plus aiguë encore et donc plus nécessaire cette prise de conscience. Ces enfants ne sont pas plus gênés que les autres par la complexité conceptuelle des acquisitions à réaliser. En effet, par définition, les troubles des

apprentissages s'entendent à l'exception de la déficience intellectuelle. En revanche, ils sont mis en difficulté par la manière dont les compétences leurs sont transmises ou le type de réponse qui leur est demandée.

De ce fait, l'enseignant doit désormais être en mesure d'analyser une tâche scolaire afin d'en dissocier les différentes contraintes :

- voies d'entrée d'acquisition des informations,
- type de traitements sous-jacents sollicités,
- voies de sortie des réponses attendues.

Par voies d'entrée, on entend la forme « matérielle » de présentation des informations transmises : voies visuelles (images, tableaux, graphiques, mais aussi lecture), voies auditivo-verbale (essentiellement le langage)...

Les voies de sortie mobilisées peuvent être langagières, motrices, praxiques (l'écriture par exemple)...

Pour ce qui est des traitements sous-jacents, il s'agira de l'ensemble des étapes, le plus souvent implicite, permettant la réalisation de la tâche demandée (par exemple mémoriser, raisonner...)

Chez l'enfant présentant des troubles des apprentissages, ce sont d'abord les voies instrumentales d'entrée et de sortie qui sont perturbées. Charge à l'enseignant d'identifier les diverses manières dont les contenus peuvent être présentés aux élèves, et la variété des voies de réponses possibles. En cela, il rejoindra les besoins de contournement des enfants pour lesquels un certain format de l'information est « toxique » (par exemple, le format écrit pour l'élève dyslexique), et/ou les réponses demandées sont freinées par leur trouble (par exemple, le graphisme chez l'enfant dysgraphique ou dyspraxique).

Par exemple, la résolution d'un problème d'arithmétique élémentaire, présenté à l'écrit, demande une série de compétences complexes :

- voie d'entrée : visuelle (format écrit de l'information),
- traitements :

- mobilisation des voies de lecture,
 - accès au sens (langage),
 - représentation de la situation problème,
 - compétences pragmatiques²⁹,
 - systèmes de mémoire (connaissances sur le monde),
 - raisonnement,
 - manipulation de quantités numériques,
 - mise en œuvre de procédures d'opération (choix, régulation, monitoring)...
- voies de sortie : motricité, praxie de l'écriture.

VI. Règles générales des apprentissages et spécificités issues des troubles

Les recherches en sciences cognitives ont permis d'énoncer quelques principes fondamentaux des apprentissages³⁰ :

- focaliser l'attention de l'apprenant sur ce qui fait sens pour l'apprentissage dont il est question,
- solliciter l'engagement actif de l'apprenant,
- travailler sur l'erreur et donner un feedback immédiat,
- viser l'automatisation des apprentissages.

Ces divers aspects des apprentissages prennent un relief tout particulier en cas de troubles cognitifs chez l'apprenant. Si les règles restent les mêmes, certains éléments nécessiteront une implémentation spécifique.

1 Focaliser l'attention de l'apprenant sur ce qui fait sens

Pour l'enfant dys, cette règle reste pertinente, mais devra être adaptée. En effet, il est courant que les aspects clés des

apprentissages soient précisément ceux qui sont rendus difficiles d'accès pour les élèves ayant des troubles des apprentissages. Il faudra alors détecter la cible de substitution permettant malgré tout l'apprentissage.

Ainsi, pour ce qui est de la lecture, pour l'apprenant tout-venant, il s'agira de focaliser son attention sur le lien phonème-graphème. Par le biais de la conscience phonologique, le débutant parviendra à extraire les sons de la langue et à les associer aux lettres ou groupes de lettres. Il s'agit des briques élémentaires de la voie d'assemblage. Chez l'enfant dyslexique, la faculté de conscience phonologique peut être déficitaire. L'extraction première du lien graphème-phonème ne peut plus être nécessairement le bon objet de l'entraînement. On devra donc chercher d'autres unités cibles afin de faciliter l'accès, et *in fine* l'apprentissage de la lecture. Pour une langue syllabique comme le français, on pourra par exemple se focaliser sur la syllabe, dont la combinatoire dans la langue est limitée, et ainsi proposer une voie alternative, certes moins pertinente en général, mais plus adaptée dans la situation spécifique l'enfant dyslexique.

2 Travailler sur l'erreur

L'analyse cognitive de la tâche permet un travail pédagogique beaucoup plus fin sur l'interprétation des sources des erreurs. Or, l'erreur chez l'apprenant est rarement de nature aléatoire, mais est le plus souvent le révélateur d'un biais cognitif. Comme pour tout apprenant, l'enfant présentant des difficultés commettra des erreurs en cours d'apprentissage. Le risque pour cet enfant-là sera soit de négliger l'impact du trouble sur les processus cognitifs sous-jacents, ou au contraire, de ramener toute erreur à l'existence du trouble.

Or le trouble étant spécifique, toute erreur ne peut par définition être ramenée exclusivement à l'existence d'un trouble. Ce dernier ne

doit pas masquer l'ensemble des compétences de l'élève, et les insuccès de l'enfant ne doivent pas être interprétés au prisme unique de ses troubles.

Inversement, les troubles de l'enfant pourront être une source clé de l'échec, et il s'agira de débusquer ce qui, dans les réponses erronées de l'élève peut se rapporter spécifiquement à ses fragilités.

3 Automatisation des tâches

L'entraînement dédié et intensif chez l'apprenant est un des gages de l'acquisition stable des compétences. L'objectif est en effet de passer d'un traitement conscient, cognitivement coûteux, vers un traitement non conscient, automatisé, déclenchable à volonté et à moindre effort, libérant ainsi un espace cognitif nécessaire à la réalisation simultanée d'autres tâches. Chez le normo-lecteur par exemple, l'automatisation de la lecture permet de libérer les ressources nécessaires à la compréhension.

C'est précisément ce qui fait défaut chez l'enfant présentant des troubles des apprentissages : malgré l'entraînement pertinent et d'intensité appropriée, l'élève ne parvient pas à automatiser le traitement proposé. Les ressources cognitives sollicitées restent significatives, ce qui gêne, voire empêche la réalisation simultanée d'autres tâches visées. Ainsi, l'enfant dyslexique, ne parvenant pas à automatiser la lecture n'accédera que peu ou pas au sens, avec un effet de fatigabilité et d'épuisement des ressources cognitives, l'augmentation du nombre d'erreurs, et souvent l'échec de la bonne fin de la procédure toute entière.

C'est ainsi que l'enfant dys est le plus souvent en situation de double-tâche ou de tâche multiple. Une ou plusieurs des tâches sous-jacentes étant peu ou pas automatisées, elles envahissent l'ensemble de l'espace cognitif, diminuant voire annulant les ressources disponibles pour d'autres tâches attendues. De plus, l'apprenant doit alors très souvent réaliser des arbitrages explicites

ou implicites entre les diverses sous-tâches d'une même tâche. D'où la variabilité de la réussite, du fait de l'allocation fluctuante des ressources cognitives entre les sous-tâches.

Par exemple, l'enfant dysgraphique a du mal à automatiser le geste d'écriture. Les causes peuvent en être variées (trouble de la latéralisation, de la motricité, de la coordination oculo-manuelle, des praxies...). Cependant, la conséquence première est une écriture lente, fatigable, de qualité faible et peu lisible. Au cours d'une tâche de dictée, l'enfant doit à la fois écrire et mobiliser ses connaissances en orthographe d'usage et les règles d'orthographe grammaticale. Du fait de ses difficultés d'écriture, l'enfant dysgraphique devra rapidement faire un arbitrage : lisibilité ou correction de l'orthographe ? Avec le prolongement de l'épreuve, on pourra voir s'accumuler les erreurs d'orthographe. S'agit-il d'un trouble associé ? Plus probablement il s'agit d'un artefact, lié aux effets de double tâche : l'enfant ne peut faire correctement les tâches simultanément, par défaut d'automatisation de la tâche d'écriture, qui sollicite encore trop de ressources cognitives, ne permettant pas de réaliser la tâche orthographique visée. Il suffira de demander à l'enfant non plus d'écrire mais d'épeler certains mots, pour lever l'ambiguïté.

Cas pratique

Identifier la source de l'erreur

Loïc présente un syndrome dysexécutif. Chez lui, les fonctions de régulation sont immatures ou déficitaires. Planification, inhibition sélective, flexibilité mentale... sont perturbées. L'enfant a alors du mal à faire un choix organisé, à suivre un plan d'action structuré, à passer d'une tâche à une autre. En particulier, il peut être gêné par des persévérations, consistant à poursuivre un traitement initié pour une première tâche, lors d'une seconde tâche sans rapport. Quand on lui propose de résoudre une série d'opérations numériques, Loïc réalise correctement les trois premières opérations qui sont des additions. Les deux suivantes sont des soustractions. L'enfant continue néanmoins à faire des additions. Il est cependant plausible de penser que Loïc maîtrise les deux types d'opérations, mais a poursuivi dans sa lancée, manquant de capacités d'inhibition sélective. En proposant de manière séparée sur deux supports différents, et lors de deux temps de classe différents, une série d'additions et une série de soustractions, on confirme bien que c'est son trouble qui l'a gêné et pas la nature de la tâche.

Conclusion

Les sciences cognitives ont permis de clarifier les principes de l'architecture cérébrale : autonomie des fonctions cognitives, connectivité cérébrale, fonctions instrumentales et fonctions de régulation, traitements séquentiels ou en parallèle... Les modèles du traitement de l'information, toujours plus précis, permettent désormais de tester finement chaque étape du traitement et d'éclairer celles qui dysfonctionnent, et peuvent mener à l'échec le traitement tout entier. De fait, les troubles des apprentissages ont posé une loupe sur les enjeux des traitements cognitifs, mettant en relief les étapes du traitement standard. Par le biais de l'analyse des erreurs provoquées par l'existence de dysfonctionnements cognitifs,

on peut confirmer ou infirmer les modèles du traitement cognitif.

Si l'existence des troubles des apprentissages apporte un éclairage fondamental sur le fonctionnement normal, les sciences cognitives apportent à leur tour de multiples bénéfices pour la prise en charge des élèves présentant des difficultés. Le dépistage est désormais plus fin et plus spécifique. De ce fait les stratégies de rééducation sont plus pertinentes, fondées et efficaces. En classe, on peut proposer des approches par contournement des troubles, évitant à l'enfant d'être systématiquement pénalisé par le mode de transmission des savoirs.

Les apports des sciences cognitives sont donc en passe de révolutionner le métier de l'enseignant. Celui-ci peut s'appuyer sur une grille de lecture validée de la manière dont l'enfant apprend. Il peut penser sa mission de manière plus fine, en distinguant le contenu des savoirs et le format sous lequel il s'apprête à les transmettre. Cette approche féconde est particulièrement importante pour l'élève « dys³¹ ». En effet, sans l'élucidation des voies de prise de l'information, des traitements sous-jacents sollicités, et des moyens mobilisés par l'enfant pour donner ses réponses, l'élève en difficulté risque d'être constamment confronté à son trouble. Il s'épuise et risque plus qu'un autre l'échec scolaire.

« Le dépistage est désormais plus fin et plus spécifique. De ce fait les stratégies de rééducation sont plus pertinentes, fondées et efficaces. »

En comprenant mieux ses facultés et ses besoins, l'enseignant pourra adapter son approche. Les règles générales d'apprentissage, qui s'appliquent à tout un chacun devront être modulées, afin d'aider l'enfant en difficulté à contourner, puis dépasser ses troubles. Encore faut-il que l'enseignant ait une connaissance et une pratique suffisamment intimes des principes et données issues des sciences cognitives afin de pouvoir ajuster ses pratiques de manière

efficace et appropriée.

Les Essentiels

- Les sciences cognitives ont apporté un cadre conceptuel inédit pour comprendre les difficultés et troubles des apprentissages.
- Les modèles qui en sont issus permettent de viser finement les étapes des traitements qui sont préservées et celles qui peuvent expliquer les troubles.
- Grâce à un bilan précis et exhaustif, le neuropsychologue peut produire une feuille de route destinée aux professionnels de santé et aux enseignants, dans le but d'accompagner au mieux les élèves en difficulté.
- La compréhension du fonctionnement du cerveau permet de viser dans les prises en charge ce qu'il faut travailler en priorité. En classe, on peut mettre en place des stratégies de contournement de ce qui gêne l'élève.
- Les sciences cognitives sont en passe de bouleverser le travail de l'enseignant en lui permettant de construire de manière plus fondée la manière dont il présente et transmet les savoirs et savoir-faire.
- Les sciences cognitives permettent de mieux identifier les lois régissant les apprentissages en général, et comment les adapter pour l'enfant en difficulté.

1. Loi n° 2005-102 du 11 février 2005 pour l'égalité des droits et des chances, la participation et la citoyenneté des personnes handicapées.

2. <http://eduscol.education.fr/cid53163/les-unites-localisees-pour-l-inclusion-scolaire-ulis.html>

3. <http://www.education.gouv.fr/cid111136/depuis-la-loi-de-2005-la-scolarisation-des-enfants-en-situation-de-handicap-a-tres-fortement-progresse.html>

4. <http://scolaritepartenariat.chez-alice.fr/page785.htm>

5. <http://www.education.gouv.fr/cid207/la-scolarisation-des-eleves-en-situation-de-handicap.html>

6. CAP ASH, INSHEA.

7. FFDys, associations par type de trouble, avec chapitres locaux et instances nationales (Apedys, AAD, DMF, DFD, Hyper Super, Asperger France, Tête en l'air...).

8. PAI : Projet d'Accueil Individualisé ; PPS : Plan Personnalisé de Scolarisation ; PAP : Plan d'Accompagnement Personnalisé . Voir : http://cache.media.education.gouv.fr/file/12_Decembre/37/3/DP-Ecole-inclusive-livret-repondre-aux-besoins_373373.pdf.

9. http://www.education.gouv.fr/cid55632/la-lutte-contre-le-decrochage-scolaire.html#Les_chiffres_du_decrochage
10. <http://www.oecd.org/fr/france/PISA-2015-France-FRA.pdf>
11. CIM-10, OMS (1994).
12. Dehaene-Lambertz G. (2017). The human infant brain: A neural architecture able to learn language. *Psychonomic Bulletin & Review*, 24(1), 48--55.
13. Mazeau M., *L'enfant dyspraxique et les apprentissages : Coordonner les actions thérapeutiques et scolaires*, Elsevier Masson, 2016.
14. Dehaene-Lambertz G., Spelke E. (2015). The infancy of the human brain. *Neuron*, 88(1), 93-109.
15. Dehaene S., *Les neurones de la lecture*, Odile Jacob, 2007.
16. Houdé O., *Apprendre à résister*, Le Pommier, 2017.
17. Baron-Cohen S., *Mindblindness: An essay on autism and theory of mind*, Bradford, 1997.
18. Glasel H., Mazeau M., *Conduite du bilan neuropsychologique chez l'enfant*, Elsevier Masson, 2017.
19. Saccades et fixations oculaires sont des fonctions oculomotrices fondamentales, permettant les mouvements oculaires essentiels à la lecture.
20. Nosographie : organisation des catégories diagnostiques.
21. https://www.cnsa.fr/documentation/cnsa-dt-dys-web-corrige-mai_2015.pdf
22. Butterworth B., Kovas Y. (2013). Understanding neurocognitive developmental disorders can improve education for all. *Science*, 340(6130), 300-305.
23. On trouvera un patient présentant le trouble touchant la dimension cognitive A tandis que la dimension cognitive B est préservée, avec inversement un autre patient présentant un trouble cognitive dans la dimension B, tandis que la dimension B est préservée. A et B sont donc indépendantes.
24. Médication basée sur l'emploi du méthylphénidate.
25. On ne dispose pas de chiffres précis, mais on estime qu'un enfant sur deux présentant des troubles des apprentissages pourrait être en échec scolaire, c'est à dire sortir du système scolaire sans qualification formelle. Au total, 15% des élèves français, mais aussi au sein des pays de l'OCDE sont dits en échec scolaire.
26. La métacognition recouvre les facultés du sujet à juger du fonctionnement de sa propre cognition.
27. Ancien nom des classes ULIS primaire.
28. En focalisant notre attention sur la dimension cognitive des apprentissages, on ne néglige pas pour autant les enjeux sociaux, culturels ou institutionnels de ces apprentissages.
29. La pragmatique recouvre les compétences liées à la capacité de lever les ambiguïtés d'un discours en fonction des éléments de contexte situationnel.
30. D'après Dehaene S. (Conférence Collège de France, 2012). <https://www.college-de-france.fr/site/stanislas-dehaene/symposium-2012-11-20-10h00.htm>.
31. Autre dénomination des troubles des apprentissages dits instrumentaux.

focus

Mais QI sont vraiment les enfants surdoués ?

par Jeanne Siaud-Facchin

Les enfants surdoués font aujourd'hui l'objet d'une attention toute particulière. On les appelle HP, pour Haut Potentiel, ou EIP, Enfants Intellectuellement Précoces, pour l'Éducation nationale. Le sujet peut sembler à la mode mais c'est une meilleure connaissance de leur fonctionnement, grâce entre autre aux avancées prodigieuses des neurosciences, qui permet de prendre en compte sérieusement ces enfants dans leur double dynamique cognitive et intellectuelle.

Définir l'enfant surdoué est simple sur un plan psychométrique, plus subtil dans les arcanes de ce qu'ils sont, de leur mode de pensée, de leur dynamique affective, de leur personnalité singulière.

Dans la communauté scientifique internationale, il est admis que l'on considère HP un enfant ou un adulte qui obtient un score de QI égal ou supérieur à 130 sur une échelle d'intelligence validée. Ce fameux QI exprimant la combinaison de compétences intellectuelles que le test permet d'actualiser dans l'ici et maintenant de la passation. Ce n'est pas une mesure absolue de l'intelligence mais un score relatif qui permet de comparer l'expression de l'intelligence avec une population de même âge chronologique. Mais le QI n'est jamais tout à fait précis ni tout à fait homogène et c'est l'analyse des mécanismes qui sous-tendent l'intelligence et les composantes de la

personnalité qui permettront cette identification. Être surdoué n'est pas un diagnostic, ce n'est pas une pathologie, mais être surdoué ce sont des caractéristiques qu'il faut bien connaître pour donner à ces élèves tous les atouts pour réussir leur parcours scolaire, social, personnel. Ils sont livrés sans « mode d'emploi » de leur intelligence et ils représentent 2,3 % de la population, soit au moins un élève par classe¹.

Une intelligence qualitativement spécifique

Être surdoué, c'est une intelligence qui va vite. La transmission des informations captées par les cinq sens et transmises au cerveau circule à vive allure, deux fois plus vite. À l'intérieur du cerveau, les connexions entre neurones se font aussi beaucoup plus rapidement, comme d'un hémisphère à l'autre. Observer en imagerie cérébrale le cerveau d'un surdoué exécutant tout type de tâche est un feu d'artifice de neurones qui circulent, se connectent, se déploient sans relâche. « Je n'en peux plus de penser », disent certains ; « Où est le bouton stop ? » L'analyse fulgurante, la compréhension immédiate, les associations qui s'enchaînent caractérisent cette intelligence. Le mode analogique, celui qui s'appuie sur le sens, sur la saisie de formes globales, holistiques de la pensée est privilégié. Celui plus lent du mode analytique, séquentiel, est mobilisé quand la nécessité intellectuelle s'impose et face au défis. La mémoire, celle à court terme, la mémoire de travail, ou celle à long terme, sont des machines à intégrer. Tout est capté, mémorisé, absorbé. L'intelligence est puissante, intense, en activité continue, intégrant les informations à 360°, prenant en compte le moindre détail, scannant, analysant, mettant en perspective le moindre grain d'intelligence à moudre.

Des composantes singulières de personnalité

L'intelligence, étymologiquement, *inter ligere*, c'est faire des liens.

Plus l'intelligence est élevée, plus elle perçoit les composantes de l'environnement. La grande intelligence se conjugue toujours avec l'hypersensibilité. L'hypersensibilité qui évoque cette qualité de porosité avec ce qui la touche, ce qu'elle touche. L'hyperesthésie – les cinq sens particulièrement aiguisés – souvent observée chez les surdoués, déclenche sans relâche cette vibration particulière avec le moindre murmure du monde. Le surdoué est une surface sensible qui absorbe chaque particule. Cette hypersensibilité ne peut se séparer des émotions qui l'alimentent pour le meilleur et pour le pire. Nous savons aujourd'hui que l'intelligence, la pensée, sont toujours étroitement intriquées aux émotions. Cognitions et émotions tissent dans un lien intime, subtil, indissociable notre intelligence humaine.

L'alchimie de ce monde de l'intelligence sous haute tension et de cette dynamique de personnalité à forte sensibilité dessine un profil d'enfant à l'affut du monde, le cœur en bandoulière, les valeurs non négociables. La lucidité est leur compagnon de route, une lucidité qui permet le discernement, l'intelligence aiguisée, mais peut faire des croche-pieds vers des questionnements existentiels insolubles.

Les enjeux pour l'école

Un élève surdoué est avide d'apprendre, de comprendre, de connaître. Il se saisit vite de ce qui est dit. Il s'approprie les connaissances et les remet en perspective avec tout ce qu'il sait déjà, tout ce qu'il suppose déjà. Le premier écueil à l'école est le rythme. Il a compris d'un mot, il a mémorisé sans même s'en rendre compte, pose des questions pour avancer qui seront, parfois, souvent, vécues comme insolentes, impertinentes, déplacées. L'élève surdoué a besoin de complexité et ne peut se contenter d'un savoir délivré en petites unités qui se succèdent les unes à la suite des autres, sans être prises dans une globalité qui leur en donnerait la profondeur et la perspective. L'ennui le guette, l'ennui qui pourra devenir dense,

compact, douloureux, bien différent de l'ennui ordinaire que tout élève peut ressentir. L'ennui du surdoué conduit parfois au sérieux décrochage scolaire, à la phobie jusqu'à la sortie du système scolaire. L'arborescence de sa pensée peut le noyer : il a du mal à inhiber les informations non pertinentes, tant celles qui se présentent à sa pensée lui semblent toutes importantes, il a des difficultés à activer sa métacognition, cette clef qui permet d'accéder et de contrôler ses processus de pensée. La vitesse, le foisonnement, les hyperliens, ne lui donnent pas de visibilité sur ses processus cognitifs qui se déploient dans les voies souterraines de son cerveau suralimenté. Les hors sujets, l'incompréhension des implicites de la consigne scolaire, les réponses à côté, les développements sans fin, les fréquentes coupures attentionnelles peuvent surprendre enseignants et enfants. Ni les uns ni les autres ne comprennent ce paradoxe de l'intelligence. Les enfants ne savent pas qu'ils fonctionnent différemment de leurs petits camarades et ne savent plus comment s'ajuster. Les enseignants attendent des résultats que leur intelligence avérée pouvait faire espérer et les accusent de le faire exprès ou de ne pas être motivés. Cela provoque de la souffrance pour les enfants, pour les parents, qui ne savent plus à quel professionnel se vouer pour les aider à comprendre, à décoder, à soulager ces impasses imprévues².

La sensibilité donne une tonalité encore bien singulière. Pour ces enfants, tout compte, tout le temps. Leur affectivité les rend perméables au moindre mouvement de l'âme. Ils réagissent fort, souvent, parfois de façon mal contrôlée, non pas par provocation mais par engagement. Les surdoués s'engagent dans leur vie, dans la vie des autres, dans les enjeux de l'humanité avec conviction, détermination, passion. Leur hypersensibilité les rend extrêmes dans tout ce qu'ils sont, dans tout ce qu'ils font.

En conclusion, être surdoué est un immense atout. L'intelligence est une chance. La grande intelligence peut emmener la vie très loin, très haut, très accomplie. La sensibilité apporte le charisme,

l'authenticité, l'intégrité, l'engagement, la compassion. Être surdoué est une façon d'être au monde. Une façon intense d'être au monde. Pour s'épanouir, l'enfant, les enseignants ne peuvent faire l'impasse du décodage précis de ce qu'est cette intelligence particulière qui demande beaucoup, exige sans relâche, a des besoins de rythme, de complexité, de défis, d'agrandissement du champ de connaissances et qui ne peut s'accomplir que dans un contexte où les valeurs humaines d'estime, de confiance, d'amour, oui d'amour, sont reconnues comme les seuls vrais ingrédients d'un apprentissage réussi, d'un parcours de vie dont les balises sont l'envie, l'envie d'avancer, l'envie d'accomplir, l'envie de réaliser, l'envie d'embrasser le monde, l'envie d'être ensemble. ●

1. Siaud-Facchin J., *L'enfant surdoué. L'aider à grandir, l'aider à réussir*, Odile Jacob, 2012.

2. Siaud-Facchin J., *Trop intelligent pour être heureux ?*, Odile Jacob, 2008.

Annexes

Petit lexique du cerveau

Axone

Sorte de tube unique, long parfois de 10 centimètres (jusqu'à 1 mètre dans le corps *via* la colonne vertébrale), qui transmet l'information d'un neurone aux autres neurones.

Cellules gliales

Cellules qui forment l'environnement des neurones. Elles produisent la myéline et jouent un rôle de soutien et de protection du tissu nerveux en apportant des nutriments et de l'oxygène, en éliminant les cellules mortes et en combattant les maladies.

Connexions inhibitrices/activatrices

Dans le cerveau, de part et d'autre de la membrane des neurones, des macromolécules appelées « protéines-canaux » interviennent qui s'ouvrent ou se ferment et créent de ce fait des courants excitateurs ou inhibiteurs à l'origine du départ (activation) ou du blocage (inhibition) du signal nerveux. Les neurones inhibiteurs équilibrent par leur nombre et leur importance physique les neurones excitateurs dont on pense souvent, à tort, qu'ils sont dominants dans le cerveau.

Cytoarchitecture

La composition cellulaire d'un tissu biologique, en particulier les types de neurones du cortex.

Darwinisme neuronal

Développement de la pensée évolutionniste de Darwin en neurosciences et en psychologie selon un schéma de variation-sélection des populations de neurones. Le neurobiologiste Jean-Pierre Changeux en est l'artisan en France. Il a ainsi généralisé le schéma darwinien à l'interaction entre le système nerveux et le monde extérieur durant le développement postnatal, du bébé à l'adulte, lors de l'acquisition des fonctions cognitives supérieures. L'évolution se réalise toutefois, dans ce cas, à l'intérieur du

cerveau (épigenèse synaptique) sans changement nécessaire du matériel génétique et dans des échelles temporelles courtes : des mois, des jours, des heures, des minutes, jusqu'à des fractions de secondes pour la réorganisation des stratégies cognitives au cours des apprentissages.

EEG

L'électroencéphalographie (EEG) est une méthode d'enregistrement cérébral qui mesure l'activité électrique du cerveau par des électrodes placées sur le cuir chevelu. La précision temporelle de l'EEG est de l'ordre de la milliseconde, ce qui est parfait pour les études de psychologie expérimentale. Aujourd'hui, les bonnets d'EEG les plus sophistiqués comportent 256 capteurs ou électrodes qui se posent très facilement sur la tête de l'enfant ou de l'adulte au laboratoire. C'est l'EEG-haute densité.

Embryogenèse

Le processus de développement de l'embryon humain après la fécondation, où se mettent en particulier en forme le système nerveux central et le cerveau du futur bébé, encore dans le ventre de sa mère.

Épigenèse

Phase de superposition à l'action des gènes, après la naissance (racines grecques : le préfixe *épi* veut dire « sur, au-dessus », et *genesis*, la naissance). Au cours du développement, dans l'épigenèse, l'apprentissage neuronal se fait par 1/ *la croissance*, quelque peu au hasard, des contacts entre neurones, 2/ *l'exubérance transitoire* et 3/ la sélection de distributions (ou géométries) particulières de contacts synaptiques, selon les interactions de l'enfant avec son environnement perceptif, cognitif, social et culturel. La scolarité s'inscrit dans ce processus d'épigenèse neuronale.

Homéostasie

Processus de régulation biologique qui permet, à un organisme ou individu donné, de se maintenir en vie le plus longtemps possible et de se projeter dans le futur. L'émotion est nécessaire à cette homéostasie et à la survie car, en son absence, les organismes cesseraient de se procurer l'énergie utile à leur métabolisme, ne se défendraient pas correctement, et par conséquent, périraient. Le neurologue Antonio Damasio a fait de ce processus la clé du fonctionnement du cerveau dans le corps humain, *via* les émotions et les sentiments (*feelings* en anglais).

IRM

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) permet de mesurer la forme ou structure du cerveau (IRM anatomique) mais aussi son activité au millimètre près, toutes les secondes, lorsqu'il travaille ou fonctionne (IRM fonctionnelle) pour résoudre un problème, une tâche cognitive. Les tissus du cerveau ont des propriétés magnétiques liées à l'oxygène. L'aimant incroyablement puissant de l'IRM arrive à les repérer et à les mesurer. Avec ce

procédé, on localise les groupes de neurones au moment précis où ils travaillent car ils ont besoin que le sang leur apporte du sucre et, en même temps, de l'oxygène. La machine d'IRM est reliée à un ordinateur qui enregistre et reconstruit en images 3D « le cerveau en action » de l'enfant ou de l'adulte. Les directeurs de cet ouvrage ont été les premiers en France à utiliser cette technologie pour explorer les processus d'apprentissage dans le cerveau d'enfants d'école maternelle et élémentaire, avec accord de leurs parents et validation préalable des protocoles expérimentaux par un comité d'éthique.

Lobe cérébral

L'une des grandes parties (ou territoires) du cerveau. Il y en a six dans chaque hémisphère (gauche et droit) : occipital, temporal, pariétal, frontal et, plus à l'intérieur, le lobe de l'insula et le lobe limbique. Voir les planches anatomiques en début d'ouvrage.

Matières grise et blanche

Les corps cellulaires des neurones et leurs dendrites forment ce qu'on appelle la matière grise du cerveau car c'est leur couleur réelle. Il y a aussi la matière blanche qui correspond aux axones car ils sont entourés d'une gaine blanche appelée la myéline. L'IRM anatomique (IRMa) permet de mesurer très précisément les volumes de matière grise, selon les régions du cerveau et au cours du développement ou des apprentissages chez l'enfant ou l'adulte. L'IRM de diffusion (IRMd) permet, quant à elle, de visualiser les faisceaux de matière blanche et d'observer ainsi la connectivité entre les différentes régions du cerveau.

Maturation

C'est le développement du cerveau vers son état adulte, selon un calendrier génétique préétabli. Pour cela, il passe par des vagues ou cycles d'augmentation de la matière grise, suite à la création de nouvelles synapses, puis de diminution (courbes en U inversé), suite à la sélection des seules synapses renforcées par l'environnement (à travers l'interaction individu-environnement). La matière blanche augmente aussi au cours du développement pour accélérer la vitesse de conduction de l'influx nerveux.

Myéline

Matière blanche qui entoure les axones des neurones, formant une gaine qui accélère la vitesse de conduction de l'influx nerveux.

Neurone

Unité de base du cerveau, le neurone est une cellule nerveuse composée d'un corps cellulaire, avec un noyau, et de petites antennes, les dendrites, qui permettent la communication entre les neurones. Il possède aussi un axone unique, sorte de tube long parfois de 10 centimètres, qui transmet l'information aux autres neurones. Le cerveau est constitué d'environ 86 à 100 milliards de neurones (selon les estimations) et un million de

milliards de connexions ou synapses. Soit, un réseau plus complexe qu'Internet.

Neuropédagogie-neuroéducation

La pédagogie, c'est la science des apprentissages. À l'image de la médecine, elle est un Art qui doit s'appuyer sur des connaissances scientifiques actualisées en psychologie du développement de l'enfant et en neurosciences. En apportant des indications sur les capacités et les contraintes du « cerveau qui apprend » en laboratoire, la neuropédagogie ou neuroéducation peut aider à expliquer pourquoi certaines situations d'apprentissage sont efficaces, alors que d'autres ne le sont pas. En retour, le monde de l'éducation, informé qu'il est de la pratique quotidienne – l'actualité de la pédagogie –, peut suggérer des idées originales d'expérimentation en sciences cognitives et du cerveau. C'est un processus d'aller-retour du labo à l'école. Ce livre y est dédié.

Neuropsychologie

Les neurosciences sont l'étude du cerveau en général. La neuropsychologie cognitive et clinique est l'étude plus spécifique des lésions cérébrales. Dans leur tragédie, les patients dits « cérébro-lésés » apprennent beaucoup de choses aux psychologues sur les dysfonctionnements du cerveau et, par conséquent, sur les sites (lésés ou non) de certaines fonctions cognitives. Par extension, on appelle « bilan neuropsychologique » l'évaluation fine de l'intégrité ou « bonne marche » des fonctions cognitives de l'enfant ou de l'adulte.

Neurotransmetteur

C'est une molécule chimique qui sert de messenger des informations entre les neurones, *via* les synapses.

Plasticité cérébrale

Capacité du cerveau à modifier ses réseaux de neurones pour apprendre ou s'adapter à des situations nouvelles.

Récepteurs moléculaires

Au niveau de leurs cellules cibles, les neurotransmetteurs sont reconnus par des molécules spécialisées appelées « récepteurs moléculaires ». Ces molécules ont la capacité de reconnaître sélectivement les neurotransmetteurs. L'image devenue courante est celle de la serrure qui « reconnaît » la bonne clé et pas une autre. De plus, ces récepteurs convertissent la liaison du neurotransmetteur en activité biologique : ouverture d'un canal ionique ou activation d'une réaction enzymatique. Ces « serrures moléculaires » peuvent basculer d'un état moléculaire à l'autre, « actif » ou « inactif », de façon réversible, sur le mode du « tout ou rien ». En fonction de la nature de la « clé », la réponse de certains récepteurs est excitatrice (elle favorise l'émission d'un signal électrique ou chimique) ou au contraire inhibitrice (elle bloque alors l'excitation). Le cerveau est ainsi à la fois chimique et électrique.

Réseau neuronal

Les neurones très nombreux dans le cerveau (86 à 100 milliards) se connectent entre eux, en réseaux, pour réaliser un travail particulier : lire, écrire, compter, penser-raisonner, etc. Il y a ainsi de multiples réseaux neuronaux enchevêtrés dans le cerveau, reliés à courte ou longue distance, comme sur Internet.

Sélection naturelle

Théorie issue du biologiste Charles Darwin (1809-1882) selon laquelle la sélection naturelle est le moteur de l'évolution des espèces (phylogenèse) par *variations* génétiques aléatoires dans les populations d'individus et *sélection* des plus aptes. Selon leur patrimoine biologique de départ, propice ou défavorable à un environnement qui peut se modifier, les individus plus aptes (ou adaptés) ont survécus et se sont reproduits de générations en générations. Les autres ont disparus. Le système évolutif de la nature est ainsi un immense jeu d'essais et d'erreurs. Jean-Pierre Changeux a transposé ce modèle darwinien de variation-sélection au développement plus court de l'enfant (ontogenèse) et à l'épigenèse des assemblées ou populations de neurones (épigenèse synaptique) à l'intérieur du cerveau.

Simplexité

Principe de fonctionnement du cerveau introduit en neurosciences et en pédagogie par le physiologiste Alain Berthoz. Ce n'est ni de la complexité, ni de la simplicité (caricatures ou raccourcis). La simplexité est l'ensemble des solutions trouvées par les organismes vivants pour que, malgré la complexité des processus naturels, ils puissent s'adapter vite et bien, de façon élégante. C'est aussi un enjeu pour la pédagogie et les apprentissages à l'école.

Synapse

Les contacts à l'arrivée d'un neurone, *via* ses dendrites, et au départ, c'est-à-dire au bout de son axone, se font par des petites structures chimiques appelées synapses.

TEP

La Tomographie par émission de positions (TEP) permet, comme l'IRM, de localiser les groupes de neurones du cerveau au moment précis où ils travaillent car ils ont besoin que le sang leur apporte du sucre et, en même temps, de l'oxygène. Dans le cas de la TEP, on mesure le débit sanguin cérébral dans les différentes régions du cerveau par le biais de la concentration d'une molécule d'eau radioactive injectée à l'individu qui passe l'expérience (avec une dose *très faible* de radioactivité artificielle, sans danger pour lui). Par précaution, on n'utilise toutefois pas cette technique invasive (injection) avec des enfants ou des femmes adultes enceintes ou susceptibles de l'être. Avec les enfants, c'est l'IRM, technique non invasive, qui est utilisée.

Vicariance

C'est l'une des plus belles formes de la variabilité biologique. En médecine, il s'agit de la suppléance fonctionnelle d'un organe (ou d'une partie d'un organe) par un (ou une) autre. En psychologie, c'est le fait que le cerveau puisse chez un même individu (*intra*) ou chez des individus différents (*inter*) emprunter des chemins neuronaux différents (ou stratégies) pour atteindre un même but.

Bibliographie/Sitographie

Ouvrages de référence

- Agid Y., Magistretti P.**, *L'Homme glial. Une révolution dans les sciences du cerveau*, Odile Jacob, 2018.
- Ajchenbaum-Boffety B., Léna P.**, *Éducation, sciences cognitives et neurosciences. Sous l'égide de l'Académie des sciences*, PUF, 2008.
- André C.**, *Méditer jour après jour*, L'Iconoclaste, 2011.
- André C., Jollien A., Ricard M.**, *Trois amis en quête de sagesse*, L'Iconoclaste, 2016.
- Bandura A.**, *Auto-efficacité. Le sentiment d'identité personnelle*, De Boeck supérieur, 2007.
- Battro M.** et al., *The educated brain: Essays in neuroeducation*, Cambridge University Press, 2008.
- Bear M.F., Connors B.C., Paradiso M.A.**, *Neurosciences. À la découverte du cerveau*, Predel, 2007.
- Berthier J.-L., Borst G., Desnos M., Guilleray F.**, *Les neurosciences cognitives dans la classe. Guide pratique pour expérimenter et innover*, ESF Éditeur, 2018.
- Berthoz A.**, *Le sens du mouvement*, Odile Jacob, 1997.
- Berthoz A.**, *La décision*, Odile Jacob, 2003.
- Berthoz A.**, *La simplicité*, Odile Jacob, 2009.
- Berthoz A.**, *La vicariance*, Odile Jacob, 2013.
- Berthoz A., Jorland G.**, *L'empathie*, Odile Jacob, 2004.
- Bideaud, J.**, *Logique et bricolage chez l'enfant*, PUL, 1988.
- Bideaud J., Meljac C., Fischer J.-P.**, *Les chemins du nombre*, PUL, 1991.
- Billiard M., Dauvilliers Y.** (Ed.). *Les troubles du sommeil*, Elsevier Masson, 2011.
- Blakemore S.-J., Frith U.**, *The learning brain: Lessons for education*, Blackwell, 2005.
- Blanquer J.-M.**, *L'École de la vie. Pour que chacun puisse réussir*, Odile Jacob, 2014.
- Blanquer J.-M.**, *L'École de demain. Propositions pour une éducation nationale renouvelée*, Odile Jacob, 2016.
- Boysson-Bardies B. (de)**, *Comment la parole vient aux enfants*, Odile Jacob, 1997.
- Borst G., Cachia A.**, *Les méthodes en psychologie*, PUF, 2016.

Bruner J., *Car la culture donne forme à l'esprit. De la révolution cognitive à la psychologie culturelle*, Retz, 2015.

Changeux J.-P., *L'Homme neuronal*, Fayard, 1983.

Changeux J.-P., *L'Homme de vérité*, Odile Jacob, 2002.

Changeux J.-P., *Gènes et culture*, Odile Jacob, 2003.

Changeux J.-P., *Du vrai, du beau, du bien. Une nouvelle approche neuronale*, Odile Jacob, 2008.

Changeux J.-P., *La beauté dans le cerveau*, Odile Jacob, 2016.

Changeux J.-P. et al., *L'homme neuronal, trente ans après*, Éditions Rue d'Ulm, 2016.

Damasio A., *L'erreur de Descartes. La raison des émotions*, Odile Jacob, 1995.

Damasio A., *Le sentiment même de soi. Corps, émotion, conscience*, Odile Jacob, 1999.

Damasio A., *L'Autre moi-même. Les nouvelles cartes du cerveau, de la conscience et des émotions*, Odile Jacob, 2012.

Damasio A., *L'ordre étrange des choses. La vie, les sentiments et la culture*, Odile Jacob, 2017.

David J., Plane S., *L'apprentissage de l'écriture de l'école au collège*, PUF, 1996.

Dehaene S., *La bosse des maths*, Odile Jacob, 2010.

Dehaene S., *Apprendre à lire. Des sciences cognitives à la salle de classe*, Odile Jacob, 2011.

Della Sala S., Anderson M., *Neuroscience in education: The good, the bad and the ugly*, Oxford University Press, 2011.

Dwerk C. S., *Changer d'état d'esprit. Une nouvelle psychologie de la réussite*, Mardaga, 2010.

Eustache F., *Les troubles de la mémoire : prévenir, accompagner*, Le Pommier, 2015.

Eustache F., *Pourquoi notre mémoire est-elle si fragile ?*, Le Pommier, 2015.

Eustache F., *Mémoire et émotions*, Le Pommier, 2016.

Eustache F., *Ma mémoire et les autres*, Le Pommier, 2017.

Eustache F., *La mémoire au futur*, Le Pommier, 2018.

Eustache F., Desgranges B., *Les chemins de la mémoire*, Inserm Le Pommier, 2012.

Eustache F., Faure S., Desgranges B., *Manuel de neuropsychologie*, Dunod, 2018.

Eustache F., Guillery-Girard B., *La Neuroéducation. La mémoire au cœur de l'apprentissage*, Odile Jacob, 2016.

Fayol M., *Production du langage. Traité des sciences cognitives*, Hermes & Lavoisier, 2002.

Fayol M., *L'acquisition de l'écrit*, PUF, 2017.

Fayol M., *L'acquisition du nombre*, PUF, 2018.

Fayol M., Jaffré J.-P., *Orthographier*, PUF, 2008.

Fayol M., Jaffré J.-P., *L'orthographe*, PUF, 2014.

Ferrand L., Lété B., Thevenot C., *Psychologie cognitive des apprentissages scolaires. Apprendre à lire, écrire, compter*, Dunod, 2018.

Fodor J., *La Modularité de l'esprit*, Éditions de Minuit, 1983.

Gall J.F., *Sur les fonctions du cerveau et sur celles de chacune de ses parties*, Baillière, 1822-

1825.

Glasel H., *Une école sans échec. L'enfant en difficulté et les sciences cognitives*, Odile Jacob, 2013.

Glasel H., Mazeau M., *Conduite du bilan neuropsychologique chez l'enfant*, Elsevier Masson, 2017.

Goigoux R., Cèbe S., *Apprendre à lire à l'école*, Retz, 2006.

Gopnik A., *Le bébé philosophe*, Le Pommier, 2012.

Gould S., *La Mal-Mesure de l'Homme*, Odile Jacob, 1997.

Greenland S., *Un cœur tranquille et sage*, Les Arènes, 2014.

Hauser M., *À quoi pensent les animaux ?*, Odile Jacob, 2000.

Houdé O., *Catégorisation et développement cognitif*, PUF, 1992.

Houdé O. (Ed.), *Vocabulaire de sciences cognitives*, PUF, 1998 (réédition Quadrige 2003).

Houdé O., *Le raisonnement*, PUF, 2014.

Houdé O., *Apprendre à résister. Pour l'école, contre la terreur*, Le Pommier, 2017.

Houdé O., *La psychologie de l'enfant*, PUF, 2017.

Houdé O., *L'école du cerveau. De Montessori, Freinet et Piaget aux sciences cognitives*, Mardaga, 2018.

Houdé O., Borst G., *Mon cerveau*, coll. « Questions? /Réponses! », Nathan, 2018.

Houdé O., Mazoyer B., Tzourio-Mazoyer N., *Cerveau et psychologie. Introduction à l'imagerie cérébrale anatomique et fonctionnelle*, PUF, 2002.

Huron C., *L'enfant dyspraxique*, Odile Jacob, 2011.

Inhelder B., Piaget J., *La genèse des structures logiques élémentaires*, Delachaux & Niestlé, 1959.

Kahneman D., *Les deux vitesses de la pensée*, Flammarion, 2012.

Kandel E., *À la recherche de la mémoire. Une nouvelle théorie de l'esprit*, Odile Jacob, 2006.

Klingberg T., Betteridge N., *The learning brain: Memory and brain development in children*, Oxford University Press, 2012.

Lachaux J.-P., *Le cerveau attentif. Contrôle, maîtrise et lâcher-prise*, Odile Jacob, 2013.

Lachaux J.-P., *Le cerveau funambule. Comprendre et apprivoiser son attention grâce aux neurosciences*, Odile Jacob, 2015.

Lachaux J.-P., *Les petits bulles de l'attention. Se concentrer dans un monde de distractions*, Odile Jacob, 2016.

Masson S., Borst G. (Eds.), *Les méthodes de recherche en neuroéducation*, Presses Université Québec, 2017.

Mazeau M., *L'enfant dyspraxique et les apprentissages. Coordonner les actions thérapeutiques et scolaires*, Elsevier Masson, 2016.

Montessori M., *L'éducation et la paix*, Desclée de Brouwer, 2001 (Éd. originale, 1914).

Montessori M., *L'enfant*, Desclée de Brouwer, 2018 (Éd. originale, 1936).

- Pacherie E.**, *Naturaliser l'intentionnalité*, PUF, 1993.
- Pasquinelli E.**, *Mon cerveau, ce héros. Mythes et réalité*, Le Pommier, 2015.
- Piaget J., Szeminska A.**, *La genèse du nombre chez l'enfant*, Delachaux & Niestlé, 1941.
- Piaget J., Inhelder B.**, *La psychologie de l'enfant*, PUF, 1966.
- Piaget, J.**, *Où va l'éducation ?*, Gallimard, 1972.
- Piaget J., Garcia R.**, *Vers une logique des significations*, Murionde, 1987.
- Posner M., Rothbart M.**, *Educating the human brain*, American Psychological Association, 2007.
- Posner M.L., Raichle M.E.**, *L'esprit en images*, De Boeck Supérieur, 1998.
- Prigogine I., Kondepudi D.**, *Thermodynamique*, Odile Jacob, 1999.
- Prochiantz A.**, *Qu'est-ce que le vivant ?*, Le Seuil, 2012.
- Siaud-Facchin J.**, *L'enfant surdoué. L'aider à grandir, l'aider à réussir*, Odile Jacob, 2012.
- Siaud-Facchin J.**, *Tout est là, juste là. Méditation de pleine conscience pour les enfants et les ados aussi*, Odile Jacob, 2014.
- Siegler R.**, *Intelligence et développement de l'enfant*, De Boeck, 2000.
- Siegler R.**, *Enfant et raisonnement*, De Boeck, 2001.
- Snel E.**, *Calme et attentif comme une grenouille. La méditation pour les enfants*, Les Arènes, 2012.
- Tokuhamma-Espinosa T.**, *Mind, brain, and education science*, Norton & Company, 2010.
- Viaut J.-P.**, *Un siècle d'école. Toute l'histoire de l'école, de Jules Ferry à nos jours*, Larousse, 2012.
- Vygotski L.**, *Pensée et Langage*, Messidor, 1985.
- Zesiger P.**, *Écrire*, PUF, 1995.

Pour les articles de revues scientifiques liés aux différentes thématiques abordées dans cet ouvrage, se reporter directement aux chapitres (notes de bas de page).

Sitographie

<http://www.associationneuroeducation.org/>

<https://www.cartablefantastique.fr/>

<http://cerene-education.fr/>

<https://www.cogitoz.com/fr>

<https://www.fondation-lamap.org/>

<https://www.lapsyde.com/>

<https://lea.fr/>

<http://lecerveau.mcgill.ca/>

<http://www.numeracyscreener.org/>

[Accueil - Sciences cognitives \(sciences-cognitives.fr\)](https://sciences-cognitives.fr/)
<https://toolsofthemind.org/>

Crédits

Couverture : (plat I) topvectors/Adobe Stock ; (plat IV) : DR.

Pages de garde avant : (g. bas) reineg/Adobe Stock ; (g. ht et dr.) Ilenia Pagliarini/Adobe Stock.

Int. : p. 14 ag visuell/Adobe Stock ; p. 15 reineg/Adobe Stock ; p. 29 rob3000/Adobe Stock ; p. 51 DR ; p. 55 DR ; p. 63, 99 et 125 Ilenia Pagliarini/Adobe Stock ; p. 270 (c.) Olympixel/Adobe Stock, (dr.) fotomaster/Adobe Stock.