

## Cent ans après Binet : quoi de neuf sur l'intelligence de l'enfant ?

Jacques Lautrey<sup>1</sup>

L'année 2005 est celle du centenaire de la publication de la première version de l'échelle métrique qu'Alfred Binet et Théodore Simon ont mise au point pour évaluer le développement de l'intelligence chez l'enfant (Binet, Simon, 1905). Pour célébrer ce centenaire, la Fédération Française des Psychologues et de Psychologie (FFPP), a organisé un congrès international intitulé « L'intelligence de l'enfant : cent ans après Binet » qui s'est tenu à Paris en octobre 2005<sup>2</sup> et visait à faire le point sur l'état actuel des connaissances sur l'intelligence de l'enfant.

Le propos du présent article est de tenter une synthèse<sup>3</sup> des communications présentées à ce congrès afin de dégager quelques unes des lignes de force qui sous-tendent, cent ans après Binet, l'évolution des idées sur l'intelligence de l'enfant. Le nombre et la diversité des communications présentées<sup>4</sup> suffiraient à dissuader toute tentative de synthèse exhaustive mais celle-ci est de toute façon rendue impossible par le fait que les symposia et certaines des conférences se déroulaient en parallèle. Comme chacun des participants, l'auteur de ces lignes n'a pu assister qu'à un symposium sur quatre et à une conférence semi-plénière sur deux. La synthèse qui suit est donc très partielle et forcément partielle.

Puisqu'à l'origine de ce congrès il y avait la volonté de célébrer le centenaire de la publication de l'échelle métrique de l'intelligence de Binet et Simon, commençons par ce qui s'est dit de l'histoire de cette invention. Deux points ressortent plus particulièrement de la conférence que Michel Huteau (Conservatoire National des Arts et Métiers) a consacrée à cette question, d'une part la rupture créée par les idées de Binet avec la conception de l'intelligence de l'enfant qui était dominante à l'époque, d'autre part la faiblesse de l'impact que l'échelle métrique a eu en France, par rapport à celui qu'elle a eu dans le reste de l'Europe et surtout aux États-Unis. À la fin du XIXe siècle, la théorie dominante sur le

---

<sup>1</sup> Professeur émérite à l'Université Paris 5-René Descartes, Centre Henri Piéron, 71 Avenue Edouard Vaillant, 92 774 Boulogne-Billancourt. Courriel : jacques.lautrey@psycho.univ-paris5.fr

<sup>2</sup> Ce congrès, qui a réuni 1225 participants et 85 conférenciers, s'est tenu du 6 au 8 octobre 2005 au Palais de la Mutualité sous le haut patronage du ministère de l'Éducation et de la Recherche et du ministère de la Santé, avec le soutien de la Fédération européenne des associations de psychologues et de l'Association américaine de psychologie.

<sup>3</sup> Cet article reprend la synthèse présentée dans la conférence de clôture du congrès.

<sup>4</sup> une vingtaine de conférences plénières ou semi-plénières et une cinquantaine de communications dans des symposia ou des tables rondes ont été présentées et elles ont porté sur des thèmes relevant aussi bien de la pratique de l'évaluation de l'intelligence que de la recherche fondamentale dans ce domaine.

fonctionnement de l'intelligence était l'associationnisme : la pensée était supposée procéder de l'association d'images et les images étaient supposées procéder de l'association de sensations. Wundt adhérait à cette théorie associationniste et le principe sur lequel il avait fondé la psychologie expérimentale était qu'à l'instar de la physique, la psychologie scientifique devait aborder l'étude des phénomènes psychiques complexes en les décomposant en éléments plus simples et en commençant par l'étude de ces éléments. Ceci explique que les premières tentatives de mesure de l'intelligence, celles de Galton et de Cattell, aient été focalisées sur la mesure de sensations. Si les sensations étaient les briques avec lesquelles se construisait l'intelligence, l'efficacité de cette dernière devait en somme être déterminée par la qualité des briques.

Binet, qui avait d'ailleurs lui-même adhéré à l'associationnisme auparavant, a rompu avec cette conception à la fois sur le rôle des images, et sur celui des sensations. Sur le premier point, il a contribué à montrer qu'il y a une pensée sans images et a suggéré que l'origine de la pensée était plutôt à chercher dans l'activité du sujet. Selon Michel Huteau, ce point de vue préfigurait le rôle que Piaget a plus tard donné à l'action dans la construction de la pensée logique, et il a rappelé à cette occasion que Piaget a mis en oeuvre les méthodes d'étude de l'intelligence de Binet lors de son séjour à Paris de 1919 à 1921. Sur le second point, Binet a très tôt affirmé (voir Binet, Henri, 1895) que la mesure de l'intelligence devait s'appuyer sur l'étude des différences d'efficiences observées dans les processus supérieurs plutôt que dans des processus aussi élémentaires que les sensations, comme le faisaient Galton et Cattell à cette époque. L'échelle métrique était l'application de ces idées à la mesure de l'intelligence.

Pourquoi le Binet-Simon n'a-t-il pas eu en France l'impact qu'il a eu aux États-Unis où en quelques années il a donné naissance au mouvement des tests ? Plusieurs raisons ont pu jouer et Michel Huteau en a évoqué quelques unes. Parmi celles-ci le décès prématuré de Binet bien sûr, l'année même de la publication de la troisième version de son test (Binet, 1911). L'absence de disciples aussi, qui n'était sans doute pas étranger à son caractère indépendant. Mais un des facteurs les plus décisifs a sans doute été la froideur de l'accueil fait à l'échelle métrique par les expérimentalistes. La communauté des expérimentalistes était en fait très restreinte et se concentrait dans le laboratoire de Villejuif, dirigé par Edouard Toulouse, dont les assistants étaient Henri Piéron et Nicolas Vaschide. Cette équipe travaillait aussi à la mise au point de techniques de mesure de l'intelligence mais restait encore très attachée à l'approche associationniste et élémentiste défendue par Wundt (Toulouse, Vaschide, Piéron, 1904). Même si Piéron s'est mis, lui aussi, avec certes un certain retard sur Binet, à l'évaluation des processus supérieurs, il est par contre toujours resté réticent vis-à-vis de la

notion d'intelligence globale. Il concevait les aptitudes comme multiples et indépendantes, ce qui lui a plus tard fait trouver beaucoup plus d'intérêt à la conception multi-factorielle de l'intelligence défendue par Thurstone qu'à la notion de QI ou à celle de facteur général. Or, Comme l'a rappelé Michel Huteau, c'est Piéron qui s'est trouvé par la suite en position de développer la psychologie scientifique en France. Le désaccord qui l'opposait à Binet sur les méthodes d'évaluation de l'intelligence est probablement une des raisons du manque de reconnaissance de la communauté de psychologie scientifique française envers le Binet-Simon (voir Huteau, 2001, sous presse).

Il était donc important que le centenaire de l'échelle métrique soit célébré en France et ce congrès international a été une excellente occasion de manifester à l'œuvre de Binet sur l'intelligence de l'enfant, une reconnaissance qui lui a longtemps été assez chichement mesurée dans son propre pays.

La synthèse qui suit est articulée autour de quelques évolutions majeures dans les idées sur l'intelligence qui m'ont paru se dégager des communications présentées au congrès.

## DES PROCESSUS SUPÉRIEURS AUX PROCESSUS EXÉCUTIFS

Binet a varié dans la liste des processus supérieurs qui lui paraissaient sous-tendre l'intelligence. Il a par exemple cité la mémoire, l'imagination, l'attention, la faculté de comprendre (Binet, Henri, 1895) ; le bon sens, le sens pratique, l'initiative, la faculté de s'adapter (Binet, Simon, 1905) ; la compréhension, l'invention, la direction, la censure (Binet, 1909). Il n'a par contre jamais varié dans l'idée que l'explication des différences d'efficience intellectuelle devait être recherchée à ce niveau. Cette idée est manifestement encore d'actualité, à ceci près que les processus supérieurs auxquels on s'intéresse maintenant sont les processus exécutifs, ceux qui se trouvent au sommet d'une organisation hiérarchique du fonctionnement cognitif et assurent le contrôle des autres processus cognitifs. Selon les cadres théoriques de référence, il s'agit des processus responsables de la capacité de la mémoire de travail, de la capacité attentionnelle, de la puissance mentale, ou de la métacognition. Une nette convergence s'est manifestée sur ce point au cours du congrès.

Dans le cadre de la perspective développementale, Juan Pascual-Leone (Université de Toronto) a présenté l'état actuel de sa théorie neo-piagétienne du développement de l'intelligence. Celle-ci met l'accent sur un système central de gestion attentionnelle dont les principaux opérateurs sont celui de puissance mentale, M, qui définit le nombre de schèmes pouvant être activés simultanément, celui d'inhibition, I, qui permet d'interrompre l'exécution

de schèmes non pertinents, et E, celui des schèmes exécutifs qui définissent les buts et allouent les ressources d'activation aux autres opérateurs. On retrouve cette idée de ressource centrale limitée, dont la capacité s'accroît avec le développement, dans les autres théories neo-piagetiennes qui ont été présentées par Anik de Ribaupierre (Université de Genève). Cette ressource centrale correspond à l'empan de la mémoire de travail dans la théorie de Robbie Case, ou au niveau optimal dans la théorie de Kurt Fischer. Toutes les théories neo-piagetiennes ont en commun de lier le développement cognitif à l'accroissement de cette capacité cognitive centrale. Une vue d'ensemble de ce courant de recherche peut être trouvée dans un ouvrage collectif (Demetriou, Shayer, Efklides, 1988) et dans une discussion critique de son évolution plus récente (Ribaupierre, 1997).

Dans le cadre de l'étude neuropsychologique du développement de la pensée logique, Olivier Houdé (Université Paris 5) a lui aussi mis l'accent sur le rôle central des processus exécutifs responsables de l'activation et de l'inhibition dont le siège est situé dans les aires du cortex préfrontal (Houdé, 2005). Les travaux d'imagerie cérébrale de Duncan et collaborateurs vont dans le même sens en montrant que ce sont principalement les aires du cortex préfrontal qui sont activées lorsque des sujets résolvent des tests saturés par le facteur général d'intelligence fluide (Duncan, Seitz et coll., 2000).

Dans le cadre de l'approche expérimentale et de l'approche différentielle maintenant, les travaux actuels sur la mémoire de travail présentés par Thierry Lecerf (Université de Genève) montrent que celle-ci explique une grande partie de la variance du facteur d'intelligence fluide, tel qu'il est mis en œuvre dans des épreuves comme les matrices progressives de Raven (Conway, Cowan et coll., 2002 ; Engle, Tuholski et coll., 1999). Pour ces auteurs, la mémoire de travail (MT) correspond aux éléments activés de la mémoire à long terme et son empan renseigne sur la capacité attentionnelle maximale susceptible s'être mise en œuvre pour maintenir l'activation de ces éléments.

Peut-on donc conclure que le facteur général d'intelligence fluide, qui est le plus proche du facteur général d'intelligence, correspond à la capacité de la mémoire de travail ? Oui pour une bonne part, c'est une des conclusions que l'on peut tirer des travaux présentés à ce congrès. Mais il faut aussitôt se demander si la notion de mémoire de travail n'est pas aussi globale que la notion d'intelligence. Dès que l'on commence à analyser plus avant les processus en jeu dans la mémoire de travail, on est amené à distinguer, par exemple, les processus de commutation, de mise à jour, et d'inhibition (Miyake, Friedman et coll., 2000). Or les corrélations entre ces différents processus ne sont pas très fortes. En outre, si on pousse plus loin l'analyse d'un des ces processus, par exemple celle du processus d'inhibition, il faut

alors au moins distinguer une forme d'inhibition qui correspond à la résistance à l'interférence de distracteurs et une autre qui correspond à la résistance à l'interférence proactive et, à nouveau, elles sont peu liées entre elles (Friedman, Miyake, 2004). De même faut-il faire des distinctions entre l'efficacité dans les épreuves de MT verbale, de MT spatiale, et de MT numérique (Mackintosh, Bennett, 2003).

De fait, l'analyse factorielle d'un ensemble de tâches concernant les différents processus et les différents contenus de la MT fait apparaître une structure factorielle hiérarchique très similaire à celle qu'on obtient pour l'intelligence, avec un facteur général de MT et des facteurs de groupe. Et c'est en fait le facteur général de mémoire de travail qui corrèle fortement avec le facteur général d'intelligence (Süss, Oberauer et coll., 2002). A-t-on beaucoup avancé en remplaçant un concept aussi global que celui d'intelligence par un concept aussi global que celui de mémoire de travail ? L'avenir le dira. La progression ne se confirmera que si on se montre capable de modéliser la façon dont les différents processus en jeu dans la mémoire de travail s'orchestrent pour rendre compte de la performance globale. Dans l'état actuel de l'art, on sait évaluer directement la performance globale, on sait aussi isoler les processus plus élémentaires qui interviennent dans cette performance globale, mais on ne sait pas modéliser la façon dont tous ces processus s'assemblent pour aboutir à cette performance globale. On oscille donc entre une approche globale et une approche élémentiste, sans savoir comment les relier car sans doute faudrait-il avoir d'autres modèles du fonctionnement cognitif, plus systémiques, pour pouvoir articuler ces deux vues partielles. Wechsler disait que l'intelligence est dans l'orchestration or, pour filer la métaphore, nous savons comment marche chacun des instruments considéré isolément et nous savons apprécier si le produit global du jeu de l'orchestre est plus moins harmonieux, mais nous ne comprenons pas comment se fait l'orchestration dans un système qui ne comporte pas de chef d'orchestre. Le point suivant suggère peut-être quelques pistes.

## DES MODÈLES STATIQUES AUX MODÈLES DYNAMIQUES DE L'INTELLIGENCE

Les modèles de l'intelligence ont longtemps été statiques. C'est le cas de la structure factorielle de l'intelligence. C'est aussi le cas des structures opératoires dans la théorie de Piaget. Dans ce dernier cas, c'est le modèle de l'équilibration qui avait pour fonction de rendre compte de la dynamique de la construction cognitive, mais il n'a pas paru apporter une modélisation testable des mécanismes de transition entre les différents états décrit pas les structures opératoires.

Une évolution notable dans le champ du développement cognitif est la montée en puissance d'approches qui visent à modéliser la dynamique du changement développemental et qui incluent donc la flèche du temps dans leur formalisation. C'est en particulier le cas des modèles connexionnistes et des modèles de systèmes dynamiques non linéaires. Les uns et les autres donnent une large place aux mécanismes d'auto-organisation dans l'explication du développement cognitif. Deux ouvrages ont particulièrement cristallisé et théorisé ces évolutions. Pour la modélisation connexionniste du développement, « Rethinking Innateness » (Elman, Bates, et coll., 1996) et pour l'approche des systèmes dynamiques, « A dynamic systems approach to the development of cognition and action », (Thelen, Smith, 1994). La vitalité de ces courants de recherche est attestée par la publication en 2003 d'un numéro spécial de la revue « Developmental Science » qui leur était consacré.

Plusieurs des conférences présentées à ce congrès s'inscrivaient dans ce courant, celles d'Annette Karmiloff et d'Ulman Lindenberger pour la modélisation connexionniste et celle de Paul van Geert pour la modélisation de systèmes dynamiques. Quel est l'intérêt de ces approches ?

L'un des apports est évidemment de permettre de simuler le processus de changement lui-même. Ces simulations fonctionnent par itérations : à chaque pas, l'état du système est calculé en fonction de son état au pas précédent. La flèche du temps est ainsi incluse dans le modèle. Un autre apport de ces modélisations est de démontrer que des processus d'auto-organisation assez simples ont le pouvoir de provoquer des changements qui ressemblent à certains des changements observés dans les processus d'apprentissage ou de développement. Les possibilités d'expérimentation virtuelle qu'offre la simulation sont aussi appréciables. Par exemple, ce que peut apprendre un réseau connexionniste dépend de sa structure initiale, c'est-à-dire du nombre d'unités d'entrée, du nombre d'unités de sortie, du nombre d'unités dans la couche interne, de l'architecture des connexions entre ces unités, des algorithmes de propagation de l'activation entre ces unités, etc. Les méthodes de simulation permettent de jouer sur tous ces paramètres pour en voir les conséquences sur le développement. Elles permettent ainsi d'expérimenter, par exemple, sur les conséquences de telle ou telle modification de l'état initial pour le développement ultérieur. C'est en ce sens que, pour reprendre le titre de l'ouvrage « Rethinking innateness », la simulation offre une voie intéressante pour « repenser l'innéité ».

C'est dans cet esprit qu'Annette Karmiloff (Institut de la santé de l'enfant de Londres), une des co-signataires de cet ouvrage, s'est appuyée sur la modélisation connexionniste pour repenser la modularité de l'esprit. Selon elle, il n'est pas nécessaire que des réseaux

neuronaux soient déjà spécifiques à certains domaines de connaissance à la naissance pour pouvoir expliquer l'existence de modules spécialisés à l'état adulte. Il suffit que les réseaux neuronaux aient une architecture appropriée aux caractéristiques de l'information relative à un domaine pour qu'ils l'emportent dans la compétition avec d'autres réseaux neuronaux pour prendre ce domaine en charge. Mais si le réseau neuronal le plus approprié à un domaine de connaissance n'est pas fonctionnel ou n'est pas suffisamment fonctionnel, d'autres moins appropriés peuvent y suppléer, même s'ils remplissent moins bien la même fonction. Si cette hypothèse est exacte, la dynamique développementale de ces phénomènes de suppléance doit avoir pour conséquence que les pathologies entraînées par la lésion d'un réseau neuronal chez le bébé ou chez le jeune enfant, ne sont pas de même nature que les pathologies entraînées par la même lésion chez l'adulte.

Dans sa conférence, Annette Karmiloff-Smith a étayé ce point de vue en donnant plusieurs exemples d'études dans lesquelles elle a pu montrer que chez des enfants dont certains réseaux neuronaux présentent des altérations d'origine génétique, l'information habituellement traitée par ces réseaux est prise en charge par d'autres processus. Par exemple, les enfants qui présentent le syndrome de Williams, une pathologie d'origine génétique dans laquelle le traitement du langage est relativement préservé alors que le traitement de l'information spatiale est très déficitaire, parviennent pourtant à construire – avec retard – la notion de cardinalité du nombre mais en s'appuyant pour cela sur le langage là où les autres enfants s'appuient sur un traitement visuo-spatial des objets à dénombrer (Ansari, Donlan et coll., 2003).

On reproche parfois à l'approche connexionniste du développement de ne modéliser que de petites tâches spécifiques, comme la tâche de la balance ou la conjugaison des verbes au temps passé, mais d'échouer à rendre compte de caractéristiques générales du développement qui soient transversales aux différentes tâches et domaines. La conférence d'Ulman Lindenberger (Institut Max-Planck de Berlin pour le développement humain) a apporté un contre-exemple. En collaboration avec Shu Chen Li, ce chercheur a proposé un modèle connexionniste qui simule un certain nombre de caractéristiques générales du vieillissement. On sait qu'avec le vieillissement, on observe une baisse moyenne des performances cognitives, une dédifférenciation des aptitudes et une augmentation des différences individuelles. Pour simuler le vieillissement d'un réseau de neurones, Lindenberger, Li, Brehmer, (2002) ont simplement diminué le paramètre de gain, c'est-à-dire la pente de la fonction logistique qui, pour chaque neurone du réseau, relie le niveau d'activation reçu en entrée au niveau d'activation produit en sortie. Lorsque la pente de cette fonction est élevée,

de petites différences d'activation en entrée, autour de la zone du seuil de réaction du neurone, provoquent de grandes différences d'activation en sortie, ce qui permet des discriminations nettes entre les entrées. Lorsque la pente de cette fonction est plus réduite, les petites variations en entrée sont moins bien discriminées et il y a plus de bruit dans les activations en sortie. En présentant diverses tâches d'apprentissage à deux groupes de réseaux neuronaux, l'un constitué de réseaux dits « jeunes » (paramètre de gain fixé à des valeurs hautes chez les différents individus) et l'autre de réseaux dits « vieux » (paramètre de gain fixé à des valeurs basses), Li et Lindenberger montrent la manipulation de ce seul paramètre reproduit les trois effets observés dans le vieillissement cognitif humain : baisse du niveau moyen des performances, dédifférenciation des aptitudes (c'est-à-dire augmentation des corrélations entre les performances dans les différentes tâches), et augmentation des différences individuelles. Reste bien sûr à interpréter ce paramètre, à trouver à quoi il peut correspondre dans les réseaux de neurones réels. L'hypothèse des auteurs est que cette diminution dans la pente de réaction de chacun des neurones du réseau pourrait correspondre à une baisse de la concentration en neurotransmetteurs dopaminergiques avec l'âge. Quelle que soit l'interprétation, le point intéressant dans ce type de modélisation est de montrer comment des propriétés générales du fonctionnement cognitif peuvent être distribuées sur l'ensemble du réseau.

L'approche des systèmes dynamiques est une autre manière de modéliser l'auto-organisation d'un système. Ses principes généraux et quelques exemples ont été présentés par Paul van Geert (Université de Groningen) dans le symposium sur les théories actuelles de l'intelligence. Le comportement est ici vu comme le produit d'une assemblée souple de composantes qui interagissent et forment donc un système. Par rapport aux réseaux neuronaux, les composantes sont ici plus molaires et elles incluent aussi bien des éléments de l'organisme, processus neuronaux ou parties du corps, que des éléments de l'environnement dans lequel cet organisme évolue. C'est tout cet ensemble qui constitue le système et contribue à son évolution. On a donc affaire à une conception en général plus contextualiste du fonctionnement cognitif qu'avec les réseaux neuronaux. Le temps est ici aussi une composante essentielle de la modélisation, puisque l'état de chacune des composantes au moment  $t$  est fonction de son état et de l'état de toutes les autres composantes à l'état  $t - 1$  et influence ce que sera son état et celui de toutes les autres composantes à l'état  $t + 1$ , etc. Sans entrer davantage dans les caractéristiques de ce type de modèles on peut souligner plus particulièrement deux de leurs apports à l'évolution des représentations du développement cognitif.



L'un est de contribuer à faire évoluer le statut épistémologique des variations en psychologie (van Geert, van Dijk, 2002). Celles-ci ne sont pas considérées comme des bizarreries gênantes à neutraliser, mais comme la source même de la dynamique du système. Les variations intra-individuelles, les phases d'instabilité, sont essentielles pour permettre aux composantes du système de se désassembler, de s'ajuster différemment, pour évoluer vers un nouvel attracteur et s'y stabiliser dans des assemblages différents. Les degrés de liberté qui existent dans la nature des différentes composantes susceptibles de s'assembler pour remplir une certaine fonction adaptative sont aussi à l'origine de variations interindividuelles dans les trajectoires conduisant à un même attracteur ou même dans le type d'attracteur vers lequel le système évolue.

Un autre apport important est de mettre l'accent sur la dynamique que provoquent les interactions entre les différents processus de traitement d'une part et entre ces processus de traitement et les éléments du contexte d'autre part. Pour illustrer cet aspect des modèles dynamiques, Paul van Geert a simulé sur ordinateur et montré sur écran au cours de sa conférence, les effets de la manipulation de différents paramètres de l'interaction entre composantes du système cognitif sur la courbe de développement. Par exemple la manipulation des poids respectifs de l'intelligence fluide et de l'intelligence cristallisée dans l'hypothèse d'une relation de support mutuel entre ces deux formes d'intelligence au cours du développement, ou encore la manipulation de l'écart entre le niveau de développement requis par l'enseignant et celui auquel se situe l'élève. Dans ce second exemple, les effets sur la courbe de développement faisaient clairement ressortir l'existence d'un optimum dans l'ampleur de cet écart, optimum qu'il est tentant d'assimiler à ce que Vygotski appelait la zone proximale de développement.

Une conception dynamique du développement de l'intelligence caractérisait aussi des communications qui s'appuient sur d'autres cadres théoriques que les modélisations évoquées ci-dessus. En plaçant le développement de l'intelligence à l'interface entre affectivité et cognition et en cherchant à articuler psychanalyse et psychologie cognitive pour comprendre le fonctionnement de cette interface, Bernard Golse (service de psychopathologie de l'enfant à l'hôpital Necker) a mis l'accent sur le rôle crucial joué par la dynamique des interactions entre modalités perceptives, ou entre l'enfant et son environnement. Un des exemples développés est celui du rôle de la dynamique de l'accordage affectif entre le bébé et sa mère, dynamique dont les caractéristiques (par exemple la rapidité des réactions) formeraient la base de la représentation que se fait le bébé de l'état affectif de sa mère. Un autre exemple est le rôle que

joue, dans la qualité de la co-construction des capacités d'attention, la dynamique des interactions entre le bébé et sa mère dans les situations d'attention conjointe.

## DE LA FIXITÉ À LA PLASTICITÉ DU SYSTÈME COGNITIF

Les marges de variation du système cognitif d'une personne ont longtemps été considérées comme assez rigidement déterminées par les contraintes qu'exercent les différents déterminants de l'organisation cérébrale, que ceux-ci soient d'ordre génétique, neurobiologique, ou processuel. Un des enseignements que l'on peut tirer de ce congrès est qu'on trouve à tous ces niveaux beaucoup plus de plasticité qu'on ne le pensait.

### **Au niveau génétique**

Commençons par le niveau de déterminisme qui se trouve le plus en amont du système cognitif, celui qui peut être attribué au patrimoine génétique. Un point de départ intéressant est le paradoxe apparent entre les résultats dont Michèle Carlier (Université de Provence) a fait état, à propos des pathologies de la cognition d'origine génétique, et certains de ceux que Pierre Roubertoux (CNRS, Université de la Méditerranée) a évoqués à propos de la recherche des gènes associés aux différences de QI. Michèle Carlier a donné plusieurs exemples de pathologies dans lesquelles une anomalie au niveau d'un seul gène peut affecter tout ou partie du fonctionnement cognitif, ce qui montre à l'évidence le rôle déterminant du génome dans la cognition. Par ailleurs, Pierre Roubertoux a indiqué que, jusqu'ici, on n'a pu trouver aucun gène spécifiquement associé aux différences de QI dans la marge de variation normale. Ce dernier résultat ne pouvant évidemment pas être interprété comme une absence d'implication des gènes dans la cognition, il suggère que c'est au niveau du système génétique qu'il faut chercher l'influence exercée par le patrimoine génétique sur des indicateurs aussi globaux que le QI.

Ceci est à rapprocher des informations que la génétique moléculaire a apportées sur le fonctionnement du système génétique. Deux des informations tirées de la conférence de Pierre Roubertoux sont particulièrement importantes pour comprendre le caractère systémique des mécanismes génétiques. D'une part, l'expression d'un gène dépend des interactions qu'il entretient avec les autres gènes (épistasie). D'autre part, l'expression d'un gène est aussi fonction des caractéristiques de l'environnement dans lequel il se trouve. Autrement dit, les gènes sont certes invariants, mais l'*expression* de chacun d'entre eux est fonction de l'environnement dans lequel il se trouve, le terme environnement étant ici pris au sens large et

incluant les produits des autres gènes (types de protéines) et les milieux plus ou moins distants dans lesquels ils s'expriment (Carlier, Roubertoux, 2005 ; Roubertoux, 2004).

Ces deux propriétés font que l'*expression* des gènes est le produit d'un système dont la plasticité a été sous-estimée.

### **Au niveau neurobiologique**

L'architecture neuronale est aussi plus plastique qu'on ne le pensait. Quelques exemples de cette plasticité ont été donnés dans la conférence de Scania de Schonen (CNRS, Université de Paris 5). Chez le bébé, les réseaux neuronaux qui traitent les visages sont en place dès trois mois. Bien qu'ils ne soient pas spécialisés au départ dans la reconnaissance de tel ou tel type de visage (par exemple asiatique ou caucasien), ces réseaux se spécialisent rapidement par un phénomène de restriction. Les connexions neuronales qui sont régulièrement sollicitées se maintiennent, tandis que celles qui ne le sont pas disparaissent. Ainsi, la capacité de faire des distinctions fines dans la reconnaissance d'un certain type de visage (par exemple le type de visage caucasien pour les enfants européens) s'accompagne de la disparition de la capacité de faire des distinctions équivalentes dans le type de visage auquel les enfants ne sont pas exposés (visages asiatiques dans cet exemple). Ce phénomène de restriction est déjà sensible à trois mois, mais à cet âge, il est encore réversible si l'enfant est exposé régulièrement à un autre type de visages que celui auquel il a été habitué. Par contre, après trois ans, il n'est pratiquement plus réversible. C'est du moins ce que l'on a longtemps pensé, mais on a récemment trouvé un renversement des effets chez des enfants qui avaient été adoptés après 5 ans, ce qui tend à montrer que la plasticité neuronale est plus importante qu'on ne l'avait cru.

Les cas de réorganisation des circuits neuronaux après des lésions ou du fait d'un exercice intensif vont dans le même sens. Les méthodes d'imagerie cérébrale ont permis de voir, par exemple, que les aires motrices correspondant aux doigts de la main gauche sont beaucoup plus étendues chez les violonistes professionnels que chez des violonistes amateurs (Elbert, Pantev, et coll., 1995), ou que les aires normalement dévolues à la mémoire épisodique sont recrutées par l'activité de calcul mental chez un calculateur prodige (Pesenti, Zago, et coll., 2001). On a aussi longtemps pensé que l'adulte ne formait plus de nouveaux neurones or l'existence d'une neurogenèse dans le cerveau adulte du primate a été récemment prouvée et ce phénomène a aussi été démontré chez l'homme par la culture de cellules pluripotentes prélevées dans plusieurs régions du cerveau. Bien que ces nouveaux neurones soient peu nombreux chez l'adulte et que l'on connaisse encore mal leur fonction, ils pourraient jouer un rôle dans l'apprentissage et la mémoire en contribuant à moduler les circuits existants (Gross,

2000). Ces différents exemples montrent que la plasticité de l'architecture neuronale est elle aussi plus importante qu'on ne l'avait supposé.

### **Au niveau processuel**

Une même comportement peut être obtenu en mobilisant des processus de traitement différents et donc des circuits neuronaux différents chez des sujets différents. Ces phénomènes de vicariance, de redondance, ont déjà été illustrés plus haut dans le cas de pathologies, avec l'exemple de vicariance dans la construction de la notion de cardinalité chez des enfants présentant le syndrome de Williams (Ansari, Donlan et coll., 2003). Ces phénomènes de vicariance sont également présents et jouent un rôle fondamental dans le fonctionnement cognitif normal (Lautrey, 2002, 2003 ; Reuchlin, 1978).

En résumé, la plasticité du comportement, qui est le meilleur indicateur de l'intelligence, implique la plasticité des processus cognitifs, qui elle-même implique la plasticité des réseaux neuronaux, qui elle-même implique une certaine plasticité de *l'expression* du système génétique.... L'intelligence s'accommode mal de déterminismes aussi rigides que ceux que l'on a longtemps supposé s'exercer à ces différents niveaux.

## **DE LA COGNITION FROIDE À LA COGNITION CHAUDE**

La cognition a longtemps été considérée comme suffisamment autonome pour être étudiée indépendamment d'aspects plus « chauds » du fonctionnement psychique comme l'émotion, l'affectivité, la personnalité. Le dualisme cartésien, mais sans doute aussi, plus récemment, le rôle joué par la métaphore de l'ordinateur dans les débuts de la psychologie cognitive, ont contribué à entretenir cet isolationnisme. Sur ce point aussi, les idées ont évolué et les recherches qui tentent d'intégrer le chaud et le froid dans le fonctionnement cognitif sont de plus en plus nombreuses. Plusieurs communications ont traité de la façon dont l'émotion, l'affectivité ou la personnalité interviennent dans la cognition.

Dans le domaine de la neuropsychologie, la recherche sur les relations entre émotion et cognition a connu un regain d'intérêt dans la période récente, notamment avec les travaux de Damasio (1995). On connaît mieux maintenant les aires cérébrales impliquées dans cette relation. Le cortex préfrontal ventromédian semble être le lieu privilégié de l'interface entre le système limbique, qui est le centre des émotions, et le cortex frontal dorsolatéral qui est impliqué dans les fonctions exécutives (mémoire de travail, gestion de l'attention, planification). Les études de cas de lésion du cortex préfrontal ventromédian chez l'adulte ont

montré que ces lésions affectaient la planification et la décision, surtout dans les domaines que l'on peut qualifier de personnel et de social. Le raisonnement sur des questions abstraites n'est pas touché mais la capacité à planifier son propre avenir, à se conduire en fonction des règles sociales, sont gravement affectées. Scania de Schonon (CNRS, Université de Paris 5) a fait état de deux cas d'enfants chez qui une lésion du cortex frontal ventro-médian est survenue dans les premiers mois de la vie et qui ont été suivis par Damasio. Les comportements observés quelques années après correspondaient d'assez près à ceux observés chez les adultes (impulsivité, absence d'anticipation des conséquences de ses propres actions, insensibilité aux punitions, comportements d'amasement, mais réussite scolaire normale).

En dehors de la contribution de Bernard Golse, déjà évoquée plus haut, la question des relations entre affectivité et cognition a aussi été abordée dans le symposium « Clinique et pratiques de l'examen psychologique ». Anne Andronikof (Université de Paris 10) a rapporté à ce sujet une étude dans laquelle les seules différences observées entre des groupes contrastés sur la performance scolaire avaient trait à la relation à soi (investissement de soi, capacité à se critiquer, etc.). Selon elle, le soi serait le noyau de la relation entre l'affect et la cognition. Certaines des recherches sur les relations entre cognition et personnalité, présentées par Pierre-Yves Gilles (Université de Provence) dans le symposium « Intelligence de la mesure », donnent des résultats qui semblent aller dans le même sens. C'est dans ce cas l'auto-évaluation de ses propres capacités cognitives qui semble être le maillon intermédiaire dans la relation entre certains facteurs de la personnalité et la cognition.

En résumé, le climat est manifestement au réchauffement de la cognition.

## DE L'INTELLIGENCE UNIDIMENSIONNELLE À L'INTELLIGENCE MULTIDIMENSIONNELLE

Existe-t-il une intelligence ou des intelligences ? Ce débat a commencé, il y a bien longtemps, avec la controverse qui opposait Spearman, partisan d'un facteur général d'intelligence, à Thurstone, partisan de facteurs multiples correspondant à des aptitudes primaires indépendantes. Il a fallu quelques temps avant de réaliser que ces deux modèles factoriels n'étaient pas incompatibles et pouvaient être intégrés dans un modèle hiérarchique comportant des facteurs de niveaux de généralité différents : des facteurs primaires corrélés entre eux, et des facteurs de niveau hiérarchique supérieur rendant compte de la corrélation entre les facteurs primaires. Néanmoins, la controverse a continué, car certains trouvaient trois étages et un seul facteur général (Burt et Vernon), tandis que d'autres trouvaient deux étages

et plusieurs facteurs généraux (Cattell et Horn). Un consensus a finalement été trouvé autour du modèle de Carroll, qui est un modèle hiérarchique à trois étages et un seul facteur général (Carroll, 1993 ; Grégoire, 2004 ; Huteau, Lautrey, 1999). Ce modèle de la structure de l'intelligence a été présenté par Jacques Grégoire (Université Catholique de Louvain) et a été évoqué à plusieurs reprises au cours du congrès. Pourquoi ce consensus et peut-on considérer maintenant ce problème comme réglé ?

Dans l'analyse factorielle de tests d'intelligence, les facteurs qui peuvent être extraits dépendent de l'échantillonnage des tests (par exemple, si on ne met pas de tests d'aptitude spatiale ou si on en met trop peu, il ne pourra pas y avoir de facteur spatial), mais comment être sûr que l'on a échantillonné toutes les activités intellectuelles possibles ? Le saut en hauteur en fait-il partie ? Les facteurs dépendent aussi de l'échantillonnage des sujets qui passent ces tests (par exemple, si les sujets sont de niveau général trop homogène, on ne trouvera pas de facteur général). Ils dépendent enfin de la méthode d'analyse factorielle utilisée (pour prendre un exemple caricatural, on ne trouvera pas de facteur général si on fait une rotation orthogonale des facteurs). La difficulté des psychologues à se mettre d'accord sur la structure factorielle de l'intelligence a tenu pour une bonne part au fait que les différentes études que l'on comparait portaient le plus souvent sur des échantillons de tests différents, passés par des échantillons de sujets différents et utilisaient des options différentes dans les méthodes d'analyse factorielle.

Le mérite de Carroll est d'avoir mis un peu d'homogénéité dans tout cela. Comme l'a rappelé Jacques Grégoire, Carroll a fait un véritable travail de bénédictin en réanalysant toutes les analyses factorielles de tests publiées et utilisables dans la littérature, environ 460, en leur appliquant la même méthode d'analyse factorielle : analyse de premier ordre qui extrait des facteurs primaires corrélés entre eux, puis analyses d'ordre  $n+1$  pour extraire la variance correspondant à la corrélation entre les facteurs d'ordre  $n$ . L'examen des 460 analyses a permis d'identifier une quarantaine de facteurs de premier ordre, dont chaque étude n'avait évidemment échantillonné qu'une partie. Ensuite, Carroll a refait pour chacune de ces 460 études une analyse de second ordre pour extraire, au deuxième étage du modèle, les facteurs qui rendent compte des corrélations entre les facteurs primaires. À ce niveau, huit grands facteurs, également corrélés entre eux, suffirent pour rendre compte de l'ensemble des études réanalysées. Ils correspondent en gros aux facteurs généraux qu'avaient identifiés Horn et Cattell, les plus connus étant les facteurs d'intelligence fluide, cristallisée, visuo-spatiale, mémoire, vitesse cognitive. Enfin, une analyse de troisième ordre a permis d'extraire, au troisième étage, les facteurs rendant compte de la part de variance commune aux huit

facteurs de second ordre. Aucune des 460 réanalyses n'a abouti à plus d'un facteur général et ce facteur général correspond en gros à celui qu'avait extrait Spearman. Le modèle de Carroll est donc un modèle de synthèse, capable de rendre compte de l'ensemble des études réanalysées. La structure de l'intelligence qu'il définit est multidimensionnelle : elle comporte à la fois une dimension commune à toutes les activités intellectuelles analysées et des dimensions spécifiques à des formes d'intelligence différentes.

Si ce modèle fait actuellement consensus, comme on a pu l'observer dans ce congrès, c'est simplement parce que les analyses sur lesquelles il repose font l'échantillonnage le plus large dont on dispose des tests et des sujets (puisque'il prend en compte l'ensemble des échantillons de tests et de sujets ayant jusqu'ici donné lieu à analyse factorielle) et qu'il leur applique une même méthode. Il minimise donc autant que faire se peut les trois facteurs de variation mentionnés plus haut. Le problème est-il pour autant résolu sur le fond ? Evidemment non, puisque'en l'absence de théorie unifiée sur l'intelligence, nul ne peut assurer que toutes les situations qui devraient figurer dans une batterie de tests d'intelligence ont bien été échantillonnées.

Et c'est ainsi que le débat rebondit actuellement. Plusieurs auteurs défendent l'idée que les tests actuels d'intelligence ne mesurent qu'une des formes de l'activité intellectuelle, l'intelligence académique, celle qui est valorisée par le système scolaire. On connaît la théorie des intelligences multiples de Gardner qui, à côté de l'intelligence logico-mathématique et de l'intelligence langagière, valorisées par l'école et évaluées par les tests d'intelligence, défend l'existence d'autres formes d'intelligence, par exemple musicale, kinesthésique, intra personnelle, interpersonnelle. La théorie triarchique de Sternberg, de son côté, distingue trois formes d'intelligence, l'intelligence analytique, évaluée par les tests classiques, l'intelligence créative, à laquelle était consacré le symposium organisé par Todd Lubart (Université de Paris 5), et l'intelligence pratique, que Robert Sternberg (Université de Yale) a illustrée par plusieurs exemples dans sa conférence sur l'impact des aspects culturels dans l'évaluation de l'intelligence. Aussi bien Gardner que Sternberg postulent que ces différentes formes d'intelligence sont indépendantes entre elles et indépendantes de l'intelligence évaluée par les tests psychométriques classiques. En d'autres termes, ils considèrent qu'une batterie de situations élargissant l'évaluation aux formes d'intelligence qu'ils distinguent n'admettrait pas de facteur général. Ces perspectives d'extension du concept d'intelligence sont intéressantes et stimulantes. Elles relancent le débat sur l'unicité ou la pluralité des intelligences à un moment où un relatif consensus a été trouvé concernant l'intelligence mesurée par les tests psychométriques classiques. Néanmoins, jusqu'ici, aucun résultat

empirique solide n'est venu étayer l'hypothèse d'indépendance de ces différentes formes d'intelligence.

## L'ÉVOLUTION DES INSTRUMENTS ET DES PRATIQUES D'ÉVALUATION

Il existe sur ce point un paradoxe intéressant. Depuis Binet, les idées sur l'intelligence ont beaucoup évolué. Pour ne parler que des grands mouvements d'idées, il y a eu notamment les théories factorielles, la théorie de Piaget et la psychologie cognitive, qui ont chacune renouvelé assez profondément nos représentations de l'intelligence. Pourtant, les échelles de mesure de l'intelligence ont très peu changé et, jusqu'assez récemment, elles sont restées bâties sur les mêmes principes que l'échelle métrique de Binet et Simon. Même si l'on prend en compte les modifications opérées par Wechsler, la séparation d'une sous-échelle verbale et d'une sous-échelle de performance, c'est une conception de l'évaluation de l'intelligence qui a plus d'un demi-siècle.

Pourquoi ce décalage dans les rythmes d'évolution entre les théories sur l'intelligence et les instruments d'évaluation ? Est-ce parce que ceux qui s'occupent d'évaluation de l'intelligence, les concepteurs d'instruments et les praticiens qui les utilisent, n'ont pas suivi les évolutions théoriques ? En fait, la théorie de Piaget a bel et bien inspiré la construction de tests piagétiens et la psychologie cognitive a bel et bien inspiré la construction de quelques batteries de tâches destinées à évaluer l'efficacité de processus cognitifs, mais ces tests n'ont pas supplanté les bonnes vieilles échelles d'intelligence. Pourquoi des échelles construites avec une démarche très empirique résistent-elles mieux au temps que des épreuves construites sur des fondements théoriques plus élaborés ?

Vraisemblablement, c'est précisément le caractère a-théorique des échelles de QI qui explique leur bonne résistance. En évaluant les performances des sujets dans des activités intellectuelles faisant appel aux processus supérieurs et en situant ces performances par rapport à celles observées dans leur groupe d'âge, les pionniers de ce type d'évaluation ont mis le doigt sur un moyen d'accès direct aux productions du système cognitif. Sous réserve que la personne examinée ait bien baigné dans le milieu culturel pour lequel le test a été conçu, cet accès direct aux productions du système cognitif renseigne, indirectement, sur son fonctionnement global sans qu'il soit nécessaire pour cela de comprendre comment tout cela fonctionne. Si un enfant a acquis en temps et en heure les connaissances et les habiletés qui sont d'habitude acquises par la plupart des enfants à cet âge là, c'est que son cerveau



fonctionne normalement et on peut pronostiquer que, sauf accident, il acquerra en temps et en heure les connaissances et habiletés cognitives plus complexes.

L'objectif de théories comme celle de Piaget ou celles du traitement de l'information est tout différent. Il est de comprendre comment le système cognitif fonctionne et manifestement, jusqu'ici, ces théories n'ont donné que des vues partielles de l'intelligence. Par exemple, les étapes du développement de la pensée logique pour la théorie piagétienne, ou le rôle de la vitesse d'exécution de certains processus élémentaires de traitement de l'information pour la psychologie cognitive. Les tests inspirés de ces vues partielles se sont révélés utiles pour évaluer certains aspects particuliers du fonctionnement cognitif, mais se sont révélés beaucoup moins valides pour remplir la fonction d'évaluation globale de l'efficacité du système cognitif. C'est à mon avis ce qui explique la bonne résistance des bonnes vieilles échelles d'intelligence.

Toutefois, ce décalage entre la recherche fondamentale sur l'intelligence et la pratique de son évaluation est en train de changer. C'est un des enseignements qui peuvent être tirés de ce congrès. Cette évolution est apparue nettement, par exemple, dans la présentation de la dernière révision de la WISC qu'a faite Larry Weiss, un des chercheurs qui l'ont conduite. Pour la première fois, une révision de cette échelle en a modifié assez profondément la composition pour intégrer l'évaluation de compétences dont l'intérêt a été mis en évidence par l'approche factorielle et par la psychologie cognitive. Les résultats des recherches montrant l'importance de la relation entre la mémoire de travail et l'intelligence fluide, qui ont été évoquées plus haut, ont convaincu les auteurs de la révision d'introduire une épreuve de mémoire de travail, et de dissocier l'épreuve des chiffres à rebours, qui est aussi une épreuve de mémoire de travail, de l'épreuve de simple répétition de nombres qui est plutôt une épreuve de mémoire à court terme. Ceci a permis d'introduire dans l'évaluation une nouvelle dimension de l'intelligence, l'efficacité de la mémoire de travail. Il en va de même avec l'introduction d'une nouvelle épreuve de vitesse cognitive qui, avec l'épreuve du code permet de faire apparaître une dimension correspondant au facteur de vitesse cognitive du modèle de Carroll. Les auteurs de la révision se sont par ailleurs décidés à introduire une épreuve de matrices inspirée de celle de Raven, dont on sait qu'elle est un des tests les plus fortement saturés en facteur général d'intelligence. De leur côté, les concepteurs du K-ABC avaient déjà fait cette démarche en introduisant une distinction entre processus simultanés et séquentiels inspirée des travaux de neuropsychologie, en particulier de ceux de Luria. Dans leur dernière révision de cette échelle, ils font un pas de plus pour indiquer les correspondances entre les dimensions du K-ABC et les facteurs du modèle de Carroll. Là encore, l'instrument

d'évaluation se rapproche des conceptions multidimensionnelles qui prévalent dans les théories actuelles de l'intelligence. Une des conséquences de cette évolution vers une conception multidimensionnelle de l'intelligence est de réduire l'intérêt d'un concept aussi global que celui de QI (Lautrey, 2005).

La conclusion générale que l'on peut tirer de ces différentes évolutions est que le cloisonnement qui a longtemps existé entre l'approche psychométrique de l'intelligence et la recherche fondamentale sur la cognition est peut-être en train de disparaître. Si ces deux démarches sont restées si longtemps cloisonnées, c'est que ni le behaviorisme, exclusivement centré sur l'apprentissage, ni la théorie de Piaget, exclusivement centrée sur le développement de la pensée logique et ignorant les différences individuelles, ni les premiers modèles de traitement de l'information, trop centrés sur les processus élémentaires, n'étaient capables de rendre compte d'une fonction aussi complexe que l'intelligence.

Si ce rapprochement commence enfin à se faire – et c'est la conclusion principale que je tire pour ma part des travaux de ce congrès – c'est parce que la psychologie cognitive commence à offrir des modèles de fonctionnement qui, à la fois, portent sur les processus cognitifs supérieurs (les processus exécutifs) et sont capables de rendre compte de la variabilité intra et interindividuelle des performances. C'est ce qui provoque un intérêt réciproque, des chercheurs pour les tests d'intelligence et des concepteurs de tests pour certaines avancées de la recherche fondamentale. Dans le cas de la mémoire de travail, par exemple, les premiers utilisent les tests d'intelligence fluide pour démontrer le caractère général et central de la capacité attentionnelle et les seconds intègrent dans leurs tests des tâches de mémoire de travail issues de la recherche fondamentale. Cette évolution aurait certainement plu à Binet...

## RÉFÉRENCES

- Ansari (Daniel), Donlan (Chris), Thomas (Michael), Ewing (Sandra), Peen (Tiffany), Karmiloff-Smith (Annette).– What makes counting count ? Verbal and visuo-spatial contributions to typical and atypical number development, *Journal of experimental child psychology*, 85, 2003, p 50-62.
- Binet (Alfred), Henri (Victor).– La psychologie individuelle, *L'Année psychologique*, 2, 1895, p. 415-465.
- Binet (Alfred), Simon (Théodore).– Méthodes nouvelles pour le diagnostic du niveau intellectuel des anormaux, *L'Année psychologique*, 11, 1905, p. 191-244.
- Binet (Alfred).- *Les idées modernes sur les enfants*, Paris, Flammarion, 1909.
- Binet (Alfred).– Nouvelles recherches sur la mesure du niveau intellectuel chez les enfants des écoles, *L'Année psychologique*, 17, 1911, p. 145-201.
- Carlier (Michèle), Roubertoux (Pierre).– Des gènes à la cognition, dans Lautrey (J.), Richard (J.-F.), *L'intelligence*, Paris, Hermès science publ. Lavoisier, 2005, p. 229-242.
- Carroll (John B.) – *Human cognitive abilities: A survey of factor-analytic studies*, Cambridge, Cambridge University Press, 1993.
- Conway (Andrew R. A.), Cowan (Nelson), Bunting (Michael F.), Theriault (David J.), Minkoff (Scott R. B.).– A latent variable analysis of working memory capacity, short term memory capacity, processing speed, and general fluid intelligence, *Intelligence*, 30, 2002, p. 163-183.
- Damasio (Antonio).– *L'erreur de Descartes*, Paris, Odile Jacob, 1995.
- Demetriou (Andreas), Shayer (Michael), Efklides (Anastasia).– *The Neo-Piagetian theories of cognitive development : toward an integration*, Amsterdam, Routledge, 1988.
- Duncan (John), Seitz (Rüdiger J.), Kolodny (Jonathan), Bor (Daniel), Herzog (Hans), Ahmed (Ayesha), Newell (Fiona N.), Emslie (Hazel).– A neural basis for general intelligence, *Science*, 289, 2000, p. 457-460.
- Elbert (T.), Pantev (C.), Weinbruch (C.), Rockstroh (B.), Taub (E) – Increased cortical representation of the fingers of the left hand in string players, *Science*, 270, 1995, p. 305-307.
- Elman (Jeffrey L.), Bates (Elizabeth A.), Johnson (Mark H.), Karmiloff-Smith (Annette), Parisi (Domenico), Plunkett (Kim) – *Rethinking Innateness: A connectionist perspective on development*, Cambridge, Ma, MIT Press, 1996.

- Engle (Randall W.), Tuholski (Stephen W.), Laughlin (James E.), Conway (Andrew R. A.).– Working memory, short-term memory and general fluid intelligence : a latent variable approach, *Journal of experimental psychology : General*, 128, 1999, p. 309–331.
- Friedman (Naomi), Miyake (Akira).– The relations among inhibition and interference control functions : a latent variable analysis, *Journal of experimental psychology : General*, 133, 2004, p. 101-135.
- Grégoire (Jacques).– *L'examen clinique de l'intelligence de l'adulte*, Sprimont, Mardaga, 2004.
- Gross (Charles G.).– Neurogenesis in the adult brain : death of a dogma, *Nature Reviews Neuroscience*, 1, 2000, p. 67-73.
- Houdé (Olivier).– Intelligence : psychométrie, psychologie cognitive et imagerie cérébrale, dans Lautrey (Jacques), Richard (Jean-François), *L'intelligence*, Paris, Hermès science publ. Lavoisier, 2005, p. 279-287.
- Huteau (Michel), Lautrey (Jacques).– *Évaluer l'intelligence. Psychométrie cognitive*, Paris, Presses universitaires de France, 1999.
- Huteau (Michel).– Le débat Binet-Toulouse et les débuts de la psychologie différentielle en France, dans Flieller (André) et coll., *Questions de psychologie différentielle*, Rennes, Presses universitaires de Rennes, 2001, p. 23-42.
- Huteau (Michel). – Alfred Binet et la psychologie de l'intelligence, *Journal des psychologues*, sous presse.
- Lautrey (Jacques).– A pluralistic approach to cognitive differentiation and development, dans Sternberg (Robert. J.), Lautrey (Jacques.), Lubart (Todd.), *Models of intelligence : international perspectives*, Washington, American psychological press, 2003, p. 117-131.
- Lautrey (Jacques).– Le statut de la variabilité entre les individus en psychologie cognitive, dans Lautrey (Jacques.), Mazoyer (Bernard.), van Geert (Paul.), *Invariants et variabilité*, Paris, Editions de la Maison des sciences de l'homme, 2002, p. 103-121.
- Lautrey (Jacques) – Le QI: concept mal compris ou concept dépassé?, *A.N.A.E.*, n° 83-84, 2005, p. 146-150.
- Lindenberger (Ulman), Li (Shu-Chen), Brehmer (Yvonne).– La variabilité dans le vieillissement comportemental : conséquence et agent du changement ontogénétique, dans Lautrey (Jacques), Mazoyer (Bernard), van Geert (Paul), *Invariants et variabilité*, Paris, Editions de la Maison des sciences de l'homme, 2002, 315-334.

- Mackintosh (N. J.), Bennett (E. S.).– The fractionation of working memory maps onto different components of intelligence, *Intelligence*, 31, 2003, p. 519-531.
- Miyake (Akira), Friedman (Naomi P.), Emerson (Michael J.), Witzki (Alexander H.), Howerter (Amy), Wager (Tor D.).– The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex “frontal lobe” tasks : a latent variable analysis, *Cognitive psychology*, 41, 2000, p. 49-100.
- Pesenti (Mauro), Zago (Laure), Crivello (Fabrice), Mellet (Emmanuel), Samson (Dana), Duroux (Bruno), Séron (Xavier), Mazoyer (Bernard), Tzuro-Mazoyer (Nathalie).- Mental calculation in a prodigy is sustained by right prefrontal and medial temporal areas, *Nature Neuroscience*, 4 (1), p.103-107.
- Reuchlin (Maurice).– Processus vicariants et différences individuelles, *Journal de psychologie*, 2, 1978, p. 133-145.
- Ribaupierre (Annick de).– Les modèles néo-piagétien : quoi de nouveau ?, *Psychologie française*, 42, 1997, p. 9-21.
- Roubertoux (Pierre).– *Existe-t-il des gènes du comportement ?*, Paris, Odile Jacob, 2004.
- Süss (Heinz-Martin), Oberauer (Klaus), Wittmann (Werner), Wilhelm (Oliver), Schulze (Ralf).– Working memory capacity explains reasoning ability – and a little bit more, *Intelligence*, 30, 2002, p. 261-288.
- Thelen (Esther), Smith (Linda B.) – A dynamic systems approach to the development of cognition and action, Cambridge, Ma, MIT Press, 1994.
- Toulouse (Edouard), Vaschide (Nicolas), Piéron (Henri).– *Technique de psychologie expérimentale*, Paris, Douin, 1904.
- Van Geert (Paul), van Dijk (Marijn).– Focus on variability : new tools to study intra-individual variability in developmental data, *Journal of infant behavior and development*, 25, 2002, p. 340-374.