

# L'UNITE DES ARTS ET DES SCIENCES : LA PSYCHOLOGIE DE LA PENSEE ET DE LA DECOUVERTE<sup>1</sup>



HERBERT A. SIMON

## LES DEUX CULTURES

Dans *Les deux cultures et la révolution scientifique*<sup>2</sup>, C.P. Snow avait attiré notre attention sur l'incompréhension mutuelle des artistes et des scientifiques, et sur quelques-unes des conséquences que doit subir notre société à la suite de cette attitude. Il présentait cette situation comme asymétrique: un très grand nombre de scientifiques ont accès aux arts et aux humanités, alors que seul un petit nombre de littéraires<sup>3</sup> et d'artistes sont en mesure d'accéder à la science et à la technologie.

Quelques littéraires (par exemple le critique anglais Leavis), interprétant l'essai de Snow comme une attaque contre les humanités, réagirent de façon défensive. Mais l'intention de Snow n'était pas d'attaquer; il essayait de décrire, et non pas de blâmer; l'asymétrie qu'il signalait, aussi déplorable soit-elle, est une donnée de fait. Bien des scientifiques et des ingénieurs s'épanouissent joyeusement au contact de la musique, de la littérature et de la peinture; certains d'entre eux sont même des compositeurs, des instrumentistes, des écrivains ou des peintres... du dimanche; alors que le nombre des

---

<sup>1</sup> Traduction de la "Bicentennial Address" présentée à l'American Academy of Arts and Sciences des USA lors de la célébration de son bi centenaire en mai 1981. (Focus on the social sciences)" Traduit en français par J.L. Le Moigne, publié initialement dans la revue "AFCET INTERFACES" n° 15, janvier 1984, p. 1 -16., republié dans "la Gazette des Sciences Mathématiques du Québec", Vol. IX, n° 3, Avril 1985, puis mis en ligne sur le site MCX-APC en août 2001: <http://www.mcxapc.org/docs/lesintrouvables/simon1.htm>.

<sup>2</sup> Note du traducteur. "Les deux cultures de C.P Snow fut diffusé à partir de 1959 dans les communautés anglo-saxonnes où il connut une grande audience. L'ouvrage fut traduit en français en 1968 chez l'éditeur J.J. Pauvert.

<sup>3</sup> En fonction du contexte, on traduira souvent humanité par *littéraire*, mais on conservera l'expression *les humanités*.

artistes ou des littéraires qui consomment ou produisent des connaissances scientifiques ou technologiques est bien plus faible. (Chacun de nous, bien sur, consomme les produits de la technologie, mais il s'agit d'une autre question: ce type de consommation n'entraîne pas la compréhension des processus qui soutiennent le fonctionnement des systèmes technologiques.)

Il y a au moins deux bonnes raisons pour qu'une large part de la population, même éduquée par ailleurs, soit quasi-illettrée en matière scientifique. La première vient de ce que les questions relevant des sciences de la nature ont été traditionnellement exclues du champ des connaissances exigées des personnes à qui l'on conférerait une éducation libérale<sup>4</sup>. On présume que ces personnes sont capables de se délecter au contact de livres, de peintures et de pièces musicales, capables aussi d'engager une conversation intelligente à leur sujet; elles doivent sans doute posséder quelques connaissances en histoire et peut-être en politique et en culture sociale contemporaine. Mais ces dernières même ne devraient pas être transmises par une représentation formalisée des sciences sociales

La seconde raison de cette asymétrie tient au fait qu'une grande partie de la population se déclare incapable de parvenir à maîtriser les mathématiques, ou les connaissances scientifiques dont la compréhension fait appel aux mathématiques, sans éprouver des souffrances inconcevables. Une personne intelligente, dans notre société, ne sera nullement embarrassée de devoir admettre tant son ignorance en mathématiques que sa totale incapacité à acquérir quelques compétences dans cette discipline. C'est une licence que s'arrogent bien des personnes cultivées.

## CULTURE MATHÉMATIQUE ET CULTURE POLITIQUE

Cette situation serait acceptable si les sciences et les mathématiques ne concernaient pas d'immenses domaines de notre société. Malheureusement, il n'en va pas ainsi. Chaque problème important, ou presque, qu'affronte aujourd'hui la société est complètement imprégné de considérations scientifiques et technologiques. Et si nous tenons les sciences sociales et les sciences du comportement pour des sciences à part entière - ce que nous devons faire - l'exceptionnelle importance de solides connaissances scientifiques pour assurer des politiques judicieuses, est encore plus évidente. Comme la science et la technologie sont largement reconnues comme les bases d'un vaste pouvoir dans une société industrielle comme la nôtre, bien des personnes cultivées et intelligentes se sentent exclues par-là même des cercles du pouvoir: elles pensent que les décisions cruciales concernant la société doivent être faites par l'élite technologique qui commande le complexe militaro-industriel. Ou si elles s'efforcent de s'attaquer aux questions politiques saturées de technologie, elles craignent de devenir les victimes de démagogues

---

<sup>4</sup> Suivant le contexte, il faudrait parfois traduire éducation "libérale" par éducation "littéraire", d'autres fois par éducation "épanouissante".

scientifiques – de tous les bords – dont elles ne pourront pas évaluer ni les arguments ni les démonstrations.

Cette perception d'une absence de pouvoir – qu'elle soit ou non conforme à la réalité – constitue un danger patent pour le développement à long terme des institutions démocratiques. La confiance dans la démocratie repose sur l'hypothèse que des individus raisonnables et d'intelligence normale sont capables de façon objective d'effectuer des choix politiques et de parvenir à des consensus. Le fait que la plupart des décisions politiques impliquent quelques conflits d'intérêt, constitue un argument contre la solution qui consiste à confier les décisions aux experts. Le système démocratique doit permettre de réviser et d'évaluer les jugements des experts. Si l'on croyait que de telles révisions sont impossibles faute de connaissances techniques suffisantes chez les superviseurs un des principaux arguments sur lesquels s'appuie la pratique de la démocratie disparaîtrait. Aussi est-il exceptionnellement important pour notre société, de trouver des solutions au problème des deux cultures.

### LA THESE DES DEUX HEMISPHERES: INTUITIF CONTRE ANALYTIQUE ?

Le gouffre qui sépare les sciences et les arts est en outre élargi et approfondi par des spéculations récentes issues de recherches en psychologie et en neurologie, relatives à la spécialisation des deux hémisphères cérébraux. Il est bien connu en effet que les deux hémisphères n'ont pas des fonctions identiques; la plupart des mémoires requises par l'usage du langage, par exemple, sont gérées par l'hémisphère gauche (pour les droitiers), alors que certains processus associés à la formation des images visuelles sont développés dans l'hémisphère droit.

Ces différences, encore bien peu comprises, ont été délayées par quelques uns sous une forme romanesque, celle des deux modes de la pensée humaine: la pensée "holistique" ou "intuitive" étant affectée à l'hémisphère droit, et la pensée analytique" ou "logique", à l'hémisphère gauche. Dans cette conception romanesque, c'est l'hémisphère droit qui préside à la création artistique (et peut être à toute activité créative"), alors que le gauche est responsable de l'activité scientifique et technologique à l'exception peut-être de leur part proprement créative. Si cette conception était acceptée, alors les deux cultures vivraient séparées, chacune en son ghetto, dans le cerveau de chaque homme; même avec l'aide du corps calleux, ce pont neural qui connecte les deux hémisphères les chances d'arriver à une bonne compréhension entre elles seraient bien minces!

J'appelle romanesque cette conception opposant les pensées analytiques et holistiques, parce qu'aucune preuve expérimentale n'appuie l'idée qu'une tâche cognitive complexe quelconque puisse être assurée par un seul hémisphère spécialisé; en particulier, l'hémisphère droit peut parfois être sévèrement endommagé, même chez des adultes, sans entraîner de conséquences sérieuses sur le fonctionnement de la pensée. En outre, d'un point de vue histologique, les hémisphères sont très similaires, et, dans le cas de dommages dans un jeune cerveau, l'un des hémisphères peut assurer presque sans affaiblissement, les fonctions de l'autre! Les développements~ modernes de la psychologie cognitive, en

particulier, l'essor de l'école du "traitement de l'information" (4), nous proposent une nouvelle base pour examiner le problème "des deux cultures".

La psychologie du traitement de l'information nous donne une représentation empirique théoriquement fondée des processus de la pensée humaine, y compris la pensée créatrice. Ce modèle suggère fortement l'hypothèse d'un processus de base commun à toutes les créativités dans les divers domaines où elles s'exercent; ce qui jette quelque doute sur l'hypothèse selon laquelle la spécialisation des hémisphères serait liée à deux modes distincts de pensée. La psychologie du traitement de l'information autorise aussi à poser la question (à ce jour sans réponse) de l'origine de "l'analphabétisme mathématique" chez des sujets par ailleurs intelligents: a-t-elle quelque base profonde dans les différences innées entre individus, ou est-elle d'abord une question de motivations?

L'objectif principal de cet article est de proposer un modèle des processus de la pensée humaine, de l'apprentissage et de la découverte, modèle que dégage la recherche contemporaine en psychologie; puis de commenter les implications de ce modèle quant aux relations entre les arts et les sciences, et plus généralement, quant à notre compréhension de la condition humaine.

## I. LE PARADIGME DU TRAITEMENT DE L'INFORMATION

Le dernier quart de siècle a vu la naissance d'un important paradigme nouveau (autrement dit un modèle), conceptualisant les processus de manipulation de symboles, y compris ceux qui sont impliqués dans la pensée humaine, mais sans par ailleurs s'y limiter. Plusieurs labels différents ont été appliqués à ce nouveau paradigme, qui a émergé dans différentes disciplines déjà existantes; on a parlé de psychologie du traitement de l'information, d'intelligence artificielle, de computation (5) non numérique, de traitement de l'information complexe, et ainsi de suite. Plus récemment, comme son caractère interdisciplinaire et ses implications devenaient plus évidents, les scientifiques et les professionnels utilisant ce paradigme dans les domaines de la psychologie, de la linguistique, de la computique<sup>5</sup>, de la philosophie et de l'anthropologie, ont cherché à améliorer leurs communications mutuelles sous la bannière commune d'une "science de la cognition"<sup>6</sup>. Et comme cela est inévitable lors de tels développements, on a éprouvé le besoin de fonder une *Cognitive Science Society*<sup>7</sup> qui publie une revue trimestrielle.

Pour les scientifiques qui ont rejoint la bannière de la science de la cognition, ce nouveau paradigme propose une solution claire à quelques-uns des problèmes de conceptualisation et de représentation qu'ils rencontraient. Certaines de ces recrues voient

---

<sup>5</sup> L'expression *information processing* (traitement de l'information), fréquemment utilisée par H.A. Simon pour caractériser une de ses thèses principales, prend, sous sa plume, un sens relativement spécifique que l'on ne peut réduire à la banalisation de "*l'informatique, science du traitement de l'information*".

<sup>6</sup> Computation pour non numerical computation et computique pour computer science. L'expression informatique est devenue si multiforme en français qu'il semble préférable de revenir à ces identifiants étymologiquement corrects... et de plus en plus utilisés dans les communautés scientifiques.

<sup>7</sup> *Cognitive science* peut être correctement traduit par *Science de la cognition*. Nom d'une association pour la recherche en science de la cognition.

même dans les solutions de problèmes qu'ils n'avaient pas perçus ou formulés auparavant, une nouvelle façon de regarder les choses. Est-ce par hasard ou est-ce par une conséquence du fait que nous avons appris à nous tourner vers des conceptualisations plus productives que nous avons vu se transformer les questions autant que les réponses?

## L'HYPOTHESE DU SYSTEME DE SYMBOLE PHYSIQUE

Au cœur du nouveau paradigme du traitement de l'information repose une hypothèse qu'Allen Newell et moi avons appelée l'hypothèse du système de symbole physique<sup>8</sup>. L'hypothèse peut être exprimée en ces termes: un système de symbole physique dispose des moyens nécessaires et suffisants pour exercer une action générale intelligente. Autrement dit, tout système qui manifeste une intelligence générale sera nécessairement un système de symbole physique, et tout système de symbole physique d'une taille suffisante peut être organisé de manière à manifester une intelligence générale.

Dans cette hypothèse, la formule "système de symbole physique" nécessite une définition. Un système de symbole physique consiste en un ensemble d'entités appelées symboles ou formes organisées (patterns), qui peuvent être associées, par le jeu d'une ou de plusieurs relations, en de plus grandes structures - comme les atomes peuvent être combinés en molécules - et peuvent être transformées par un petit ensemble de processus de base. Ces processus peuvent créer de nouveaux symboles (par exemple, en réponse à un stimulus externe, un processus que nous appelons lecture transformera des symboles en une réponse externe, l'écriture). Ils peuvent créer et modifier des relations entre les symboles, stocker plus ou moins indéfiniment des chaînes de symboles, ou encore comparer des symboles par identité ou par différence. Enfin, des traitements ultérieurs peuvent éventuellement affecter les résultats des comparaisons (ce sont les branchements).

Ces symboles sont "physiques" en ce qu'ils possèdent un substrat physique ou biologique; ils ont des formes organisées, réalisées par des circuits électriques ou électroniques, par des champs électriques et magnétiques dans des diodes au germanium ou sur des bandes magnétiques, par des circuits neuronaux, par des macromolécules, et par bien d'autres voies. Ce qui rend remarquables et de grande importance ces systèmes de symbole physique est que, bien qu'ils doivent avoir quelque substrat physique, la nature de ce substrat importe peu, pour autant qu'elle puisse supporter à la fois une grande diversité de formes organisées et d'agencements de ces formes, de même que les processus de bases énumérés précédemment qui assurent leurs transformations, leurs opérations et leurs modifications.

De ce fait, des systèmes de symboles fonctionnellement équivalents, bien qu'utilisant des substrats entièrement différents peuvent exister. Un ordinateur des années cinquante et un ordinateur contemporain n'ont presque aucun composant physique en commun - leurs mémoires et leurs mécanismes d'interconnexions sont basés sur des

---

<sup>8</sup> Traduction de *Symbol system hypothesis*. Les singuliers sont importants pour rendre compte de la généralité des concepts.

principes physiques complètement différents - et pourtant toute computation qui peut être effectuée sur l'un peut l'être sur l'autre (dans certaines limites de capacité et de vitesse de mémorisation). Ils sont fonctionnellement équivalents sans posséder aucune équivalence physique. Bien plus, le substrat d'un système de symbole peut être biologique, former une collection de neurones, par exemple, ou de macro molécules. Il n'y a pas de raison de principe qui interdise à un système biologique d'être fonctionnellement équivalent à un système possédant un substrat physique, ni que le premier ne puisse pas simuler le second, et vice versa.

L'hypothèse du système de symbole physique a deux importants corollaires:

Corollaire 1: Un ordinateur, programmé de façon appropriée peut engager une action générale intelligente;

Corollaire 2: Le cerveau humain est un système de symbole physique.

Le premier corollaire résulte de l'hypothèse initiale, puisque l'on peut vérifier directement que tout ordinateur numérique classique satisfait la définition d'un système de symbole physique. Le second corollaire résulte de l'observation des capacités d'action intelligente de l'être humain.

L'hypothèse du système de symbole physique et ses corollaires ne doivent pas être acceptés ou refusés a priori: il s'agit d'hypothèses empiriques susceptibles d'être vérifiées de manière expérimentale. Si le premier corollaire est vrai, comme l'implique l'hypothèse, il doit être possible de programmer des ordinateurs qui manifestent une action intelligente. Si le second corollaire est vrai, il doit être possible de démontrer que les processus qu'emploie le cerveau humain pour accomplir une action intelligente sont précisément du type des processus symboliques postulés par l'hypothèse. Ce dernier quart de siècle a vu le développement d'un vaste ensemble de recherches dont les résultats corroborent fortement ces deux hypothèses.

Notons ici que si ces recherches augmentent notre conviction de l'équivalence fonctionnelle du cerveau et de l'ordinateur, elles ne nous disent pratiquement rien des modalités selon lesquelles les symboles sont représentés physiologiquement dans le cerveau, ni sur les conditions dans lesquelles sont assurés physiologiquement les traitements d'information qui opèrent sur ces symboles. Nous rencontrons une situation tout à fait comparable à celle de la chimie au XIXe siècle, où une théorie puissante et élaborée des réactions chimiques était édiflée bien avant que ne le soient les théories des structures atomiques pouvant expliquer pourquoi certains mélanges étaient stables et d'autres pas, ou pourquoi certaines réactions se développaient et d'autres pas. Ce type d'anticipation n'est pas du tout inhabituel dans les sciences de la nature, comme l'illustre aujourd'hui l'état de la théorie des particules élémentaires. S'il n'en allait pas ainsi, tout l'édifice de la connaissance scientifique tremblerait à chaque perturbation de la théorie des quarks. Ainsi, la science de la cognition est pour le moment concernée surtout par ce type

de "chimie mentale", dont le substrat physiologique est sûrement présent, mais n'a pas encore été déchiffré.

## L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

On appelle habituellement *intelligence artificielle* la branche de la science de la cognition qui est principalement consacrée au premier corollaire de l'hypothèse du système de symbole physique. Les produits typiques des recherches en ce domaine sont les programmes informatiques qui jouent aux échecs au niveau d'expert, voire de maître, qui diagnostiquent des maladies internes (programme INTERNIST) ou microbiennes (programme MYCIN), qui découvrent les circuits de réactions assurant la production de composants organiques ou qui reconnaissent le langage parlé.

Les processus utilisés par un programme d'intelligence artificielle pour accomplir sa tâche peuvent ou non ressembler à ceux qu'utilise l'être humain pour accomplir la même tâche. Par exemple, la plupart des programmes d'échecs existants, mais pas tous, mettent en oeuvre des explorations considérables utilisant les capacités de vitesse et de mémorisation des ordinateurs modernes, explorations que les joueurs humains seraient tout à fait incapables de conduire. Dans beaucoup de programmes d'intelligence artificielle, la force brutale de l'ordinateur se substitue à l'astuce humaine. Mais il n'en va ainsi que partiellement. La plupart des programmes d'intelligence artificielle s'inspirent, pour l'intégrer, de la connaissance que nous avons des processus humains correspondants, et en particulier de ces heuristiques qui nous permettent d'être si remarquablement sélectifs dans nos explorations. De ce fait, au cours des vingt cinq dernières années, la psychologie a contribué de façon continue aux recherches en intelligence artificielle, et réciproquement, les recherches en ce domaine ont suggéré à la psychologie cognitive des hypothèses intéressantes sur les processus de la pensée humaine.

## LA PSYCHOLOGIE COGNITIVE

La branche de la science de la cognition qui se rapporte à la compréhension de la pensée humaine et aux processus de résolution de problèmes est habituellement appelée la psychologie du traitement de l'information. Les produits caractéristiques de ces recherches sont par exemple les programmes de jeu d'échecs (tels que MATER) qui inventent des combinaisons conduisant au mat et ne mettent en oeuvre que des explorations relativement modestes, ou les programmes qui lisent des problèmes dans des manuels de physique et qui les résolvent, ou les programmes qui extrapolent des séquences organisées de chiffres ou de lettres (telles que "ABM-CDM..."), ou les programmes qui résument des histoires enfantines, ou les programmes qui apprennent à résoudre des équations algébriques en analysant quelques cas usuels etc.

On distingue ces programmes de simulation cognitive des programmes d'intelligence artificielle pure, par le fait que les premiers sont conçus pour utiliser les mêmes organisations de processus que ceux que met en oeuvre l'être humain accomplissant les mêmes tâches, et parce qu'on les compare en détail avec les données

fournies par l'étude du comportement des êtres humains engagés dans une action de résolution de problème, afin de voir s'il y a bien correspondance entre les deux méthodes.

Pour donner une idée de la manière dont on peut expliquer la pensée par le traitement de l'information, considérons une tâche mathématique simple telle que la résolution d'une équation algébrique linéaire à une variable

$$4X + 7 = X + 13$$

$$4X = X + 6$$

$$3X = 6$$

$$X = 2$$

Comment parvient-on à ce résultat? Quels sont les processus mis en oeuvre? La solution de l'équation est une expression ayant une forme particulière: un "X" suivi par un signe "égal" suivi par un nombre. L'équation initiale diffère de cette forme désirée sous plusieurs aspects: la présence du 4 qui multiplie le X, le nombre 7 du côté gauche de l'équation, et le X du côté droit. Chaque étape de la résolution implique la détection de l'une de ces différences entre l'expression initiale et l'expression désirée, et oblige à extraire de la mémoire un opérateur légitimé servant à la réduction de différences de ce type, puis à appliquer cet opérateur. Un opérateur légitimé est un opérateur qui obéit aux règles de l'algèbre en n'altérant pas la solution de l'équation. Par exemple, les transformations qui consistent à ajouter une même quantité des deux côtés de l'équation ou à regrouper les termes de même nature sont exécutées par des opérateurs légitimés.

Les étapes de la solution sont habituellement représentées par des ensembles de "productions" dont chacune est un processus constitué d'une "condition" et d'une "action" que l'on peut écrire sous la forme:

C > A

Dès lors que le système reconnaît que la condition C est satisfaite, il réalise l'action A correspondante. Lorsque les conditions de plusieurs productions sont satisfaites simultanément, entrent en jeu des règles de priorité que l'on n'examinera pas ici et qui déterminent laquelle parmi les actions possibles doit être exécutée. Dans le cas que nous examinons présentement, les conditions s'expriment par la reconnaissance des différences entre l'équation existante et l'équation désirée. Les actions sont des applications de règles algébriques appropriées. Ainsi le système de productions permettant de résoudre ce problème, et d'autres qui lui sont similaires, peut être décrit comme suit:

Si l'équation a la forme "X = N" Stop

Si "Nombre" est à gauche soustraire "Nombre"



Si "aX" est à droite soustraire "aX".

Si "aX" est à gauche et si a différent de 1, diviser par a.

Ce système de productions possède deux propriétés qui caractérisent la plupart des activités humaines de résolution de problèmes telles qu'on peut les étudier en laboratoire. D'abord il emploie une heuristique très générale, celle de l'analyse moyens-fins. L'analyse moyens-fins est mise en oeuvre par le cycle "trouver la différence-appliquer l'opérateur" que l'on a décrit plus haut. Ensuite la résolution s'accomplit principalement par reconnaissance ou **re-cognition**<sup>9</sup>. Autrement dit, les formes particulières de l'état du problème, après re-cognition, rappellent au sujet les actions appropriées susceptibles d'être entreprises.

Or toutes les fois que l'on aboutit à une description satisfaisante des systèmes de productions qui gouvernent la résolution effective de problèmes dans divers domaines, on découvre presque toujours qu'ils incluent des méthodes d'analyse moyens-fins et de résolution par re-cognition. Dans les problèmes difficiles, la solution peut n'être pas trouvée directement; elle nécessite alors une troisième procédure: la méthode de recherche sélective par essai et erreur.

L'analyse moyens-fins et la recherche sélective sont parfois tenues pour des méthodes faibles, car, bien qu'elles soient largement applicables à presque tous les types de problèmes, elles ne sont pas toujours très efficaces tant qu'elles ne sont pas combinées à de nombreuses connaissances spécifiques associées au domaine dont relève le problème. C'est précisément la tâche des systèmes de productions et des mécanismes de re-cognition qu'ils mettent en oeuvre que d'apporter au processus de résolution les connaissances spécifiques du domaine qui les rendent efficaces et puissants.

## LES EXPERTS ET L'INTUITION

Nous disposons aujourd'hui des connaissances requises pour aborder efficacement - donc en expert - les problèmes relevant des domaines professionnels usuels. On a montré par exemple qu'un maître ou un grand-maître aux échecs doit pouvoir stocker dans sa mémoire plus de 50 000 schémas de dispositions des pièces qu'il peut reconnaître chaque fois qu'elles lui apparaissent sur un échiquier. A chacun de ces schémas, il doit associer la connaissance des actions requises par l'occurrence de l'une d'entre elles. Ainsi lorsqu'un maître repère sur l'échiquier le schéma connu sous le nom de "colonne ouverte", il considère immédiatement la possibilité de déplacer une tour sur cette colonne. Dans tel cas précis, cela peut ne pas être un mouvement correct, mais c'est toujours un mouvement qu'il faut considérer lorsque apparaît un tel schéma. Le fait que les maîtres aux échecs sont capables de jouer des parties rapides (dix secondes par coup) ou des parties

---

<sup>9</sup> On proposera par la suite de traduire *recognition* par *re-cognition* plutôt que par reconnaissance, puisque cognition semble désormais accepté et que reconnaissance a, en français, trop de significations différentes.

simultanées contre cinquante joueurs, peut s'expliquer à l'aide de ces capacités de re-cognition. Leur système de productions stocke des connaissances sur les échecs telles que la re-cognition d'une configuration sur l'échiquier suscite la re-cognition d'un processus qui, dans la plupart des cas, suggère un coup fort acceptable, même s'il n'est pas nécessairement le meilleur.

Le signe distinctif de l'expert dans un domaine est son intuition, sa capacité à résoudre rapidement les problèmes, souvent sans même pouvoir expliquer comment cette solution lui est venue à l'esprit: c'est exactement ce que nous attendons habituellement d'un expert, étant donné les connaissances organisées en système de productions qu'il possède. La résolution intuitive des problèmes, ou, ce qui revient au même, la résolution par re-cognition, est un phénomène compréhensible de façon parfaitement naturelle. Il n'y a aucun mystère dans le processus que nous utilisons pour bénéficier d'un accès rapide au contenu d'une encyclopédie, en utilisant l'index. A la vérité, les deux processus sont essentiellement les mêmes.

L'argument selon lequel il y a des modes de pensée fondamentalement différents, le mode "holistique" et le mode "analytique", repose sur le contraste entre les cas où les solutions sont trouvées presque immédiatement et sans recherches conscientes, et les cas qui requièrent des analyses et des recherches conscientes prolongées. Mais si le modèle présenté ici est correct, les processus holistiques - autrement dit les actes de re-cognition - sont un composant majeur de toutes les résolutions de problèmes, aussi analytiques et réfléchies qu'elles soient. La fonction de l'analyse - autrement dit la recherche sélective - est de relier de façon ordonnée des séquences entières de productions, chacune d'entre elles étant activée par une action de re-cognition. Ces liaisons peuvent parfois constituer un algorithme rapide et puissant, comme dans l'exemple algébrique ci-dessus. Pourtant, sauf peut-être dans le cas des problèmes les plus simples, il s'agit de recherches sélectives par heuristiques et par d'autres méthodes "faibles", y compris les essais suivis d'erreurs et de recommencements.

Les notions holistiques sont associées en particulier à la capacité de visualisation globale. On assure parfois, par exemple, qu'un maître aux échecs peut saisir "d'un seul coup d'œil" la structure complète des relations entre les pièces sur un échiquier. Des études faites sur les mouvements des yeux des maîtres, pendant qu'ils jouent, montrent pourtant qu'un simple système de productions déplace l'attention d'une zone à l'autre de l'échiquier, au fur et à mesure de la reconnaissance de dispositions familières des pièces. On ne possède pas d'observations prouvant avec certitude que les êtres humains peuvent d'un seul coup d'œil saisir de façon globale des systèmes de relations complexes. En revanche, il semble évident qu'ils peuvent reconnaître des schémas qui leur sont devenus familiers lors d'expériences antérieures et auxquels ils peuvent accéder au sein de collections d'informations qu'ils ont stockées en mémoire.

Le résultat habituel de l'exécution d'une "production" est de placer quelque nouvelle information dans la mémoire à court terme, ce qui la rend accessible à la conscience. Les étapes intermédiaires durant le processus de re-cognition ne sont pas elles-

mêmes ouvertes à l'attention consciente. Nous pouvons dire que nous avons reconnu un ami, mais nous ne pouvons généralement pas dire par quel processus nous l'avons reconnu. C'est là sans doute que repose notre impression subjective que la résolution de type holistique – la résolution par re-cognition – est qualitativement différente de la résolution de type analytique, pendant laquelle nous sommes attentifs aux étapes intermédiaires, grâce aux informations que l'exécution d'une séquence complète de productions nous a présentée. Je ne vois aucune raison de croire que la distinction entre ces deux modes de pensée présente des caractéristiques plus fondamentales que celle-là. Ceci ne veut pas dire que, dans certains domaines, et pour certaines personnes, la résolution par re-cognition ne soit pas plus familière qu'elle ne l'est dans d'autres domaines et pour d'autres personnes.

En particulier, on peut penser que la pensée holistique est plus manifeste dans les domaines où la reconnaissance de l'appartenance d'un problème à un certain type, constitue une large part du processus même de résolution, comme par exemple dans la plupart des diagnostics médicaux simples. C'est d'ailleurs plus fréquemment le cas pour les personnes expérimentées dans le domaine que pour les débutants, et pour les problèmes simples plus que pour les complexes. Mais dans d'autres cas, comme ceux des problèmes pour lesquels des interactions avec un grand nombre de faits doivent être examinées, que les algorithmes permettant de les manipuler soient disponibles ou non, le processus aura un caractère plus analytique; autrement dit, il semblera plus délibéré et planifié.

## II. LA COMPREHENSION DU LANGAGE

Les deux exemples de domaines de résolution de problèmes que l'on a discutés jusqu'ici, l'algèbre et les échecs, sont habituellement considérés comme apparentés à la culture scientifique et technique plutôt qu'à la culture littéraire. Une des raisons pour lesquelles ces deux exemples nous semblent de nature technique vient de ce que ni l'un ni l'autre ne semble faire un usage essentiel du langage ordinaire. Bien qu'une grande part de l'activité scientifique soit non-mathématique, nous tendons à associer le langage mathématique à celui de la science. Le cas des échecs est sans doute plus problématique, mais son caractère formel et analytique lui confère d'une certaine manière l'allure d'un jeu technique.

Ces frontières s'avèrent souvent perfides. Ni la musique, ni la peinture ne sont mathématiques au sens littéral du mot. Mais elles n'utilisent pas dans leur ~expression propre le langage naturel, et la musique peut être discutée et décrite de façon très analytique et formalisée. D'un point de vue sociologique pourtant, les deux appartiennent clairement au monde des "humanités". Une discussion critique dans l'un et l'autre domaines est conduite pour l'essentiel au moyen des langues naturelles, complétées seulement par l'addition d'un vocabulaire spécialisé dont la forme n'est pas exagérément technique.

Si nous regardons les territoires préférés des humanités, la littérature, l'histoire, la philosophie, nous notons le rôle très particulier qu'y joue le langage. Pour comprendre les

relations entre les deux cultures, nous devons nous demander s'il y a quelque chose de spécifique dans le langage ordinaire; en particulier, si la pensée exprimée dans ce langage diffère, de quelque façon qualitative, de la pensée exprimée par les formalismes des mathématiques, ou encore de la pensée soumise aux règles formelles d'un jeu comme les échecs.

Dans l'état actuel de nos connaissances sur les processus de la pensée humaine, je ne crois pas que l'on puisse donner une réponse définitive à cette question; néanmoins, un bon nombre d'observations convergentes se sont accumulées depuis vingt-cinq ans. En particulier, nous disposons désormais d'une masse appréciable de connaissances sur les traitements d'informations requis pour extraire les significations de textes écrits dans les langues naturelles.

### LE LANGAGE EST-IL DIFFÉRENT ?

On a parfois proclamé - en particulier le linguiste Noam Chomsky - que le langage est une donnée interne spécifique de la compétence humaine, présente dès la naissance. Une façon de tester cette hypothèse est d'essayer de simuler les processus que les êtres humains utilisent, pour comprendre le langage: si l'on y parvient, on peut alors comparer ces processus avec ceux mis en oeuvre dans la pensée et la résolution de problèmes, dans les cas où le langage n'est pas impliqué. Cette stratégie a conduit à de multiples observations qui appuient la thèse de l'unicité de la langue.

Un grand nombre de programmes ont été écrits qui sont capables de procéder à l'analyse grammaticale de diverses fractions de phrases, brèves et longues, en anglais et dans quelques autres langues. Ces programmes traitent, à l'entrée des chaînes linéaires de caractères ou de phonèmes, et produisent, à la sortie, une phrase analysée grammaticalement: un réseau habituellement arborescent qui révèle les relations entre les mots constitutifs. Les premiers programmes de traduction étaient basés sur de telles analyses grammaticales; ils tentaient de remplacer la phrase analysée dans le langage source par une phrase synonyme dans le langage d'arrivée. Ces programmes ont été uniformément désappointant quant à la qualité des traductions qu'ils produisaient. Les expériences qu'ils ont permis de réaliser ont montré qu'une traduction ne dépend pas simplement de relations lexicales et syntaxiques, mais aussi d'une compréhension des significations.

Plusieurs systèmes spécialisés ont depuis été élaborés pour "comprendre" la signification des phrases qu'ils lisent. Un des programmes de ce type parmi les plus connus est celui de Terry Winograd, le SHRDLU, qui peut comprendre et exécuter des ordres, donnés en anglais, visant à réarranger des blocs dans un imaginaire "monde de blocs" auquel SHRDLU a accès. Par exemple, le système peut comprendre l'ordre: "Mettez le cône bleu sur le cube rouge", puis élaborer et exécuter un plan qui obéisse à cet ordre, en déplaçant au besoin d'autres blocs qui seraient sur son chemin. De même, Gordon Novak a écrit un programme, ISAAC, qui comprend assez l'anglais pour s'attaquer aux problèmes que l'on trouve à la fin du chapitre sur la statique dans un manuel scolaire de physique.

John Hayes et moi-même avons écrit un programme, UNDERSTAND, qui peut interpréter les instructions de problèmes du type "puzzle", comme le problème des missionnaires et des cannibales, ou celui de la Tour de Hanoi. Cette interprétation est suffisante pour permettre une représentation interne qui, pour parvenir à une solution, sera transformée par un programme de résolution de problèmes.

Dans tous ces programmes, le langage à traiter est, en un certain sens, un langage technique; il n'est certainement pas un langage littéraire. Le produit de cette "compréhension" est un certain type de structure relativement abstraite, sur laquelle des raisonnements ultérieurs peuvent être appliqués. Il existe maintenant plusieurs programmes, plus adéquats encore à la culture littéraire, comme ceux qui peuvent extraire d'un conte de fée pour enfants un résumé de l'intrigue et un compte rendu des motivations des divers héros. Je ne sais si cela a déjà été fait, mais il n'y a aucune raison pour que des programmes de ce type ne puissent pas commenter les émotions des héros (colère, peur, amour, etc.).

La compréhension des actions humaines et les motivations et les émotions associées à ces actions constituent des centres d'intérêt très proches de ceux que cultivent habituellement les humanités. Il devient intéressant, dès lors, de se demander si les programmes informatiques qui manipulent des objets comme ceux-ci sont très différents des programmes qui comprennent le langage des problèmes de physique ou celui des puzzles. La réponse est que les uns et les autres sont très similaires dans leurs structures de base.

Quelle est la portée de la similarité perçue entre les processus de compréhension des histoires et les processus de compréhension des problèmes de physique? Cela veut dire, d'abord, que dans les deux cas, l'information peut être représentée par des réseaux de symboles et de structures de symboles, ce qu'en computation nous appelons des *structures de listes*. Par exemple, pour comprendre un problème de physique, il peut être nécessaire de comprendre ce qu'est un levier: cette information sera stockée dans un schéma, c'est à dire une structure de symboles qui décrit le levier prototype.

De même, pour comprendre un conte de fée, il peut être nécessaire de comprendre ce qu'est une "histoire". Cette information, elle aussi, peut être stockée sous la forme d'une structure de liste qui décrit l'histoire prototype. La compréhension d'un problème de physique implique la création en mémoire d'une nouvelle structure de symboles qui décrit la situation particulière dont relève ce problème. Les composants de ce schéma du problème sont des occurrences des schémas prototypes correspondant aux types des concepts qui sont utilisés dans les problèmes de physique, comme le levier par exemple.

De la même façon, la compréhension d'une histoire implique la création en mémoire d'une nouvelle structure de symboles, de forme arborescente, qui remplacera la chaîne linéaire des symboles constituant cette histoire par une autre forme révélant la "grammaire du récit". Les types de connaissances nécessaires pour comprendre une histoire sont bien sûr assez différents de ceux qui sont nécessaires pour comprendre un problème

de physique; mais l'organisation abstraite de cette connaissance en mémoire, et les caractéristiques des processus qui la transforment, peuvent être fort similaires dans les deux cas. La conclusion que je tire de cette comparaison des programmes qui manipulent le langage et de ceux qui résolvent les problèmes, est que ce qu'ils ont en commun l'emporte sur les particularités qui les différencient.

Qu'il s'agisse de compréhension du langage ou de résolution de problèmes, les deux types de programme opèrent, pour l'essentiel, sémantiquement sur les représentations internes de la situation. Ces représentations internes sont des structures de listes complexes, qui ne sont ni spécifiquement linguistiques, mathématiques ou picturales, et qui pourtant constituent une sorte de langue commune, dans laquelle toutes les significations de tous les types particuliers de langages peuvent être exprimés.

### LORSQUE LE LANGAGE ET LES MATHÉMATIQUES INTERAGISSENT

Une tâche qui nécessiterait des compétences à la fois en langue naturelle et en mathématiques semblerait bien adaptée à cette mise en valeur des relations entre les deux cultures. On a déjà discuté d'une tâche de ce type: celle de la compréhension des problèmes de physique. Dans ce cas, nous partons d'un problème formulé dans une langue naturelle, l'anglais ou le français par exemple, et nous terminons par quelques équations mathématiques à résoudre. De manière plus générale, on peut dire que tous les problèmes présentés sous une forme littéraire, ou sous la forme d'un récit, problèmes que l'on peut traiter en algèbre ou en arithmétique, associent de la même façon les deux types de langages.

Si l'on retient l'incapacité - ou la répugnance - à faire des mathématiques comme un des signes de la séparation entre les deux cultures, nous pouvons nous demander comment apparaît et se développe cette répugnance. Il ne semble pas - si l'on se réfère à nombre d'observations anecdotiques - que l'antipathie à l'égard des mathématiques apparaisse habituellement lorsque les étudiants apprennent les activités de base de la manipulation des symboles arithmétiques pour additionner, soustraire, multiplier ou diviser. Elle semble plutôt se manifester le jour où le concept d'énoncé d'un "problème" est introduit pour la première fois. "Jean avait sept pommes, il en donna trois à Joë. Combien lui en reste-t-il?". Ou: "Il y a trois ans, Marie était trois fois plus âgée que Stève. Aujourd'hui, elle est deux fois plus âgée que lui. Quel âge ont Marie et Stève?".

En supposant que ces anecdotes soient exactes, il y a quelque chose de curieux dans cette situation: la culture littéraire s'éloigne de la scientifique juste au moment où le langage s'associe aux abstractions des mathématiques; alors qu'il s'agit de l'aspect des mathématiques dont on présume qu'il devrait être le plus agréable aux esprits portés vers les humanités.

## METTRE EN EQUATION SANS RESOUDRE

Quelques expériences que Jeffrey Paige et moi avons faites il y a une dizaine d'années éclairent un peu cette curieuse difficulté. Nous donnions à différents sujets une série de problèmes présentés sous leur forme littérale, en leur demandant de les mettre en équation, mais pas de les résoudre. Un de ces problèmes était le suivant: un homme découpe une planche en deux parties. La longueur de la première est égale aux deux tiers de la longueur de la planche. La seconde partie a quatre pieds de plus que la première. Quelle était la longueur de la planche? S'il considère le problème de l'écriture des équations comme un problème d'analyse grammaticale de phrases énoncées en langue naturelle, suivi d'une traduction dans le langage algébrique, le sujet peut procéder comme suit:

Soit  $X$  la longueur de la planche. La longueur de la première partie est  $(2/3)X$ ; celle de la seconde est  $(2/3)X + 4$ . Donc l'équation est  $X = (2/3)X + (2/3)X + 4$ .

Cette équation est une traduction syntaxique correcte des phrases constituant le problème. Si vous la résolvez, vous découvrirez pourtant que la longueur de la planche est -12 pieds ... longueur quelque peu curieuse pour une planche.

Tous les sujets que nous avons sollicités pour ces expériences dans notre laboratoire avaient une formation en algèbre du niveau du baccalauréat; quelques-uns d'entre eux étaient étudiants en science et en ingénierie. Ils répondirent à la question de trois façons différentes. Certains produisirent l'équation donnée ci-dessus. D'autres produisirent une "mauvaise" équation:  $X = (2/3)X + (2/3)X - 4$ , qui avait pourtant l'avantage de conduire à une valeur positive de la longueur de la planche (soit 12 pieds, donc en valeur absolue comme précédemment). Le troisième groupe de sujets, avant d'écrire une équation, se posa la question: "N'y a-t-il pas une contradiction?" Certes il n'y a pas de véritable contradiction dans l'énoncé même du problème. Mais il se peut qu'il y ait une contradiction entre cet énoncé et la connaissance qu'un étudiant possède des planches du monde réel.

Notre interprétation de ces résultats fut la suivante: le premier groupe de sujets, celui qui produisait l'équation "impossible", traitait l'énoncé du problème de façon presque entièrement syntaxique. Le deuxième groupe, celui qui interprétait incorrectement les phrases de l'énoncé, mais qui produisait une réponse conduisant à une planche physiquement possible, traitait l'énoncé du problème de façon sémantique. On créait une sorte de représentation interne de la planche et de ses deux parties, et on se servait de cette représentation pour guider la traduction de l'énoncé du problème. Le troisième groupe de sujets produisait à la fois une représentation sémantique et une traduction syntaxique, découvrant ainsi l'incompatibilité entre ces deux éléments.

## COMPRENDRE UN PROBLEME ET UN CONTE DE FEE

Par la suite, à partir de cette expérience et de quelques autres qui sont en cours, il est apparu qu'il devait y avoir une corrélation entre le mode de traitement des énoncés des problèmes et la capacité à les traiter. Les étudiants de type "syntaxique" ont généralement les plus grandes difficultés face à de tels problèmes, alors que les étudiants de type "sémantique" en ont beaucoup moins; enfin, les étudiants qui mettent en oeuvre à la fois les deux processus sont ceux qui réussissent le mieux.

Admettons un moment que ces observations soient confirmées lors d'expérimentations ultérieures et examinons leurs implications. On est conduit à présumer que la compétence spécifique nécessaire pour réussir à traiter les problèmes donnés sous forme d'énoncés, est la capacité de créer une représentation "physique" à partir de l'énoncé en langue naturelle, puis celle d'utiliser cette représentation pour guider la traduction du langage naturel en équations. Il est essentiel que le sujet puisse aller et venir entre les énoncés linguistiques et leurs significations sémantiques, et entre ces significations et leur représentation abstraite sous forme d'équations. La difficulté, dans de tels problèmes, réside plus dans la manipulation de leur sémantique que dans la traduction formelle de leur syntaxe.

Si cette interprétation s'avère exacte, elle permet de comprendre pourquoi il n'y a pas de différence notable entre l'activité de compréhension de l'énoncé d'un problème d'algèbre et l'activité de compréhension d'un conte de fée. Dans les deux cas, la clef réside dans la capacité à extraire la signification sémantique enchâssée dans le langage. Certes des connaissances spécifiques différentes sont nécessaires dans les deux cas, mais on ne voit pas de différence fondamentale dans le processus de compréhension. Nous avons dès lors le droit d'espérer, au minimum, que l'incompétence dans cet aspect des mathématiques - un des plus centraux - n'est pas incurable pour quiconque dispose d'une intelligence générale correcte et d'une culture littéraire de base.

### III. LA RÉOLUTION DE PROBLÈME ET LA CRÉATIVITÉ

Le scepticisme le plus intense quant aux similitudes entre la pensée scientifique et la pensée littéraire se manifeste lorsqu'on discute de la pensée "créative". Que savons-nous des processus de la pensée créative dans l'un et l'autre domaine?

Pour répondre, nous avons d'abord besoin d'une définition de la créativité. Généralement, nous attribuons la créativité à toute production de la pensée qui présente quelque nouveauté de valeur; dit valeur dit créativité. On reconnaît deux types de nouveautés: la nouveauté aux yeux du monde et la nouveauté aux yeux du créateur. L'invention indépendante de ce qui est déjà connu ne suscite pas d'habitude de grandes récompenses. Le prix est décerné au premier inventeur, et quelles que soient les satisfactions personnelles que le réinventeur indépendant et tardif puisse trouver dans sa création, il ne reçoit généralement pas de grande reconnaissance en récompense de la société.



Pourtant, il n'y a pas de raison de supposer que les processus psychologiques utilisés par le réinventeur étourdi soient très différents de ceux du premier inventeur. D'ailleurs, la réussite dans la réinvention de quelque chose peut constituer la preuve d'une exceptionnelle capacité d'invention potentielle. Lorsque le jeune Gauss réinventa la formule de la somme des  $N$  premiers entiers, ses maîtres eurent raison de lui prédire une brillante carrière créatrice, bien que la formule fût déjà fort connue à l'époque où Gauss la redécouvrit.

Pour qui a étudié l'algèbre, la résolution d'une équation algébrique peut rarement être tenue pour "créative"; et même dans les parties entre grands-maîtres, seuls quelques coups occasionnels sont considérés comme créatifs ou "brillants". Si l'on examine les quelques domaines d'activité où l'adjectif *créatif* est utilisé le plus volontiers, on peut se demander si l'on doit formuler des hypothèses très différentes de celle dont nous avons déjà discuté pour décrire ces processus de créativité. Comme la créativité apparaît à la fois en art et en science, et puisque nous nous intéressons plus particulièrement aux similitudes et aux différences entre ces deux formes de créativité, considérons des exemples empruntés à l'un et l'autre domaine. Nous utiliserons la même méthode d'examen que celle que nous avons appliquée précédemment. Nous considérerons à la fois des observations empiriques du processus créatif chez les êtres humains, et des observations résultant de tentatives de simulations de ces processus à l'aide de programmes informatiques.

## LA CREATIVITE DANS LES ARTS

Il y a quelques années, Walter Reitman enregistra les pensées à voix haute (et le jeu commenté à voix haute) d'un sujet qui composait une fugue. Comme ce sujet était un compositeur professionnel, qui envisageait de publier la fugue qu'il produisait, nous pouvons tenir cette activité comme créative. L'analyse du protocole de composition révèle des processus de résolution de problèmes qui nous sont devenus familiers dans les recherches sur des activités plus structurées: l'analyse moyens-fins, la recherche sélective, l'extraction d'information par re-cognition. Il n'est pas nécessaire de postuler quelque autre processus créatif spécial pour rendre compte de son activité. Le résultat est créatif, parce qu'il représente une structure nouvelle et intéressante constituée de matériaux familiers: les tonalités, les formes rythmiques, les échelles classiques diachroniques et chromatiques, etc.

## LA FUGUE EST-ELLE UN PROBLEME?

Avant de nous satisfaire de ce résultat, quelques points importants doivent pourtant être discutés. Tout d'abord, peut-être tenir l'activité de composition d'une fugue comme un "problème"? Cette activité n'a pas a priori de résultat aussi bien défini que celle de la résolution d'une équation. Comment le compositeur sait-il que sa tâche est finie? On peut dire qu'une activité est bien structurée lorsque les critères d'exécution sont simples et bien définis. Et l'on peut dire qu'elle est faiblement structurée lorsque ces critères sont relativement vagues et complexes. Pourtant, lorsqu'un compositeur professionnel est

confronté avec un morceau de musique, il n'a aucune difficulté à reconnaître s'il s'agit ou non d'une fugue, et il lui est seulement un peu plus difficile de l'évaluer en tant que morceau de musique. Sans doute aura-t-il quelque mal à justifier complètement ses critères, surtout pour la dernière évaluation, mais son jugement sera cependant sûr et définitif. Aussi, lorsqu'il compose lui-même une fugue, est-il capable de juger s'il a atteint les objectifs soumis à des contraintes qu'il s'était personnellement fixés.

Quelques-uns des critères qu'il utilise sont pourtant des critères esthétiques; ils peuvent dépendre des émotions que la musique provoque chez un auditeur humain. Si donc nous voulons regarder la composition d'une musique comme un exercice de résolution de problèmes, nous devons disposer d'une théorie de l'esthétique appropriée. C'est pourquoi j'évoquerais à ce propos la théorie, déjà publiée, de Léonard Meyer, qui me semble tout à fait recevable.

Selon Meyer, la musique gouverne l'attention parce qu'elle contient des formes organisées qui peuvent être détectées et reconnues par l'auditeur. Si ces formes sont d'une complexité appropriée, (le niveau de complexité dépendant de l'expérience musicale de l'auditeur, par exemple, et de son aptitude à les reconnaître), elles retiendront l'attention. Elles susciteront aussi des espoirs, qui seront ensuite satisfaits ou frustrés, éveillant ainsi l'émotion. L'expérience musicale est donc tout à la fois une expérience intellectuelle (une reconnaissance de formes) et une expérience émotionnelle; et la qualité d'un morceau de musique dépend sans doute de sa richesse dans l'exploration de ces deux dimensions. On trouvera bon nombre d'arguments appuyant les théories de l'esthétique de Meyer aussi bien dans la documentation portant sur la musique (p.ex. Hindemith à propos de la composition) que sur la psychologie (p.ex. Berlyne sur l'attention).

## COMPOSER, EST-CE TRAITER DE L'INFORMATION?

Au moins en première approximation, donc, nous considérerons que le problème de la composition peut être formulé en terme de traitement de l'information.

On a rapporté récemment de nouveaux types d'observations sur ces questions, et en particulier sur leurs aspects cognitifs. Il s'agit d'abord de programmes informatiques qui sont capables de découvrir des formes organisées dans des morceaux de musique. Certains de ces programmes sont basés sur des modèles extraits de la linguistique moderne: autrement dit, ils "analysent grammaticalement" le flux de notes musicales selon une structure hiérarchisée de mouvements, de sections, de motifs, de phrases, d'accords, etc. Vues de façon descendante ("top-down"), les structures résultantes ressemblent beaucoup à celles qui sont postulées par le musicologue et théoricien de la musique, Schenker.

Un programme d'analyse musicale développé il y a quelques années par Sumner et moi, est directement fondé sur la théorie de la résolution de problèmes et de l'induction des formes organisées. En particulier, les processus que nous postulons pour l'analyse de la musique sont ceux que Kotovsky et moi avons découverts précédemment, alors que nous avons entrepris d'expliquer et de simuler les processus cognitifs impliqués par certaines

questions rencontrées dans des tests d'intelligence: les "*Thurstone Series Completion Tasks*". Tous ces travaux montrent que le contenu cognitif (mais pas le contenu émotionnel) de la musique peut être représenté par les mêmes types de structures de liste que celles que l'on a utilisées pour représenter les textes en langage naturel et les énoncés de problèmes<sup>10</sup>.

L'autre source d'information sur la nature des processus cognitifs mis en oeuvre dans les arts est celle fournie par les programmes informatiques qui composent de la musique ou qui dessinent automatiquement. La première expérimentation de ce type en musique, due à Hiller et Isaacson, produisit la *Suite ILLIAC*, vers 1956, puis la *Computer Cantata*. L'architecture de ce programme, comme celle des autres programmes de composition musicale, ressemble beaucoup aux architectures des autres programmes d'intelligence artificielle que l'on a déjà évoqués. Au coeur de tous ces programmes, on trouve toujours une capacité à générer des formes organisées basées sur une connaissance des formes des constituants sous jacents (échelles, accords, etc.). Ni moi, ni les auteurs de ces programmes ne souhaitons devoir vanter les grands mérites artistiques de ces productions. Mais, pour paraphraser le Dr Johnson, la merveille n'est pas que le chien danse bien, mais qu'il réussisse effectivement à danser!

On peut faire des commentaires analogues au sujet des programmes informatiques qui produisent des formes visuelles, encore que, à mon avis, certains d'entre eux aient atteint un niveau de qualité proprement artistique bien supérieur à celui des compositions musicales construites par des programmes informatiques. En particulier, Duane Palyka a écrit plusieurs programmes dont les produits sont vraiment intéressants. L'un d'eux est accroché dans ma demeure depuis plus de dix ans, sans avoir jamais cessé de me plaire.

Ces productions informatiques picturales sont certes non figuratives, comme la musique est de type "absolu". Les programmes automatiques ne se sont pas encore attaqués à la peinture figurative ou aux poèmes symphoniques. Leur production nécessiterait que soient au préalable résolus les mêmes problèmes que ceux qui devraient l'être pour que l'on puisse produire automatiquement des oeuvres littéraires, et ceci n'a pas été encore sérieusement tenté. Néanmoins, ce que l'on vient de voir à propos de l'analyse grammaticale des écrits indique quelques unes des directions selon lesquelles on pourrait avancer.

---

<sup>10</sup> Note de l'auteur. Bien que quelques observations suggèrent que l'hémisphère droit soit impliqué dans le traitement des tonalités musicales pures, on doit peut-être mentionner ici que le traitement des structures musicales (harmonie et contrepoint) semble être d'abord une fonction de l'hémisphère gauche. Ceci - et beaucoup d'autres raisons - confirmerait le fait que la musique emprunte plus à "l'analytique" qu'à "l'holistique". Mais j'ai déjà suffisamment argumenté contre les interprétations habituelles de cette distinction.

## LA CREATIVITE SCIENTIFIQUE

Johann Kepler, alors qu'il examinait les chiffres donnant les distances des planètes au Soleil et les périodes de leurs orbites, découvrit que cette période variait selon la puissance  $3/2$  de cette distance. Ohm, en insérant des résistances de différente longueur dans un circuit et en mesurant les intensités, découvrit que l'intensité variait en raison inverse de la longueur du fil.

Un programme informatique, BACON, écrit initialement par Patrick LANGLEY, et développé ultérieurement par Langley, Bradshaw et moi, peut reproduire ce type de découvertes faites par Kepler ou Ohm. Autrement dit, en utilisant les mêmes données que celles dont disposaient les premiers inventeurs, BACON arrive aux mêmes lois. BACON ne (re)découvre pas seulement la troisième loi de KEPLER ou la loi d'OHM, mais aussi la loi des gaz parfaits:  $PV/T = R$ .

Pour découvrir une relation invariante entre des paires d'objets (par exemple, la constance du rapport des accélérations d'une paire d'objets donnée), il postule une propriété invariante de chacun de ces objets pour rendre compte de cette invariance. De cette façon, BACON a réinventé le concept de masse inertielle, d'index de réfraction ou de chaleur spécifique. Il serait donc difficile de contester la créativité de BACON. Certes, cette affirmation serait plus convaincante encore si BACON trouvait quelque chose de complètement nouveau ' qui n'ait jamais été découvert encore, au lieu de redécouvrir des lois, aussi significatives soient-elles, qui furent découvertes pour la première fois il y a plusieurs centaines d'années.

Cependant, je pense qu'une inspection soigneuse du programme BACON vérifierait que ses réponses ne se sont pas faufilées accidentellement, mais sont bien de véritables inventions. Il n'y a pourtant rien de très complexe dans le programme BACON. Son organisation générale est typique des programmes capables de conduire une exploration sélective, l'exploration étant guidée dans ce cas par un petit nombre d'heuristiques qui déterminent les directions d'explorations les plus prometteuses. Il représente l'information qui lui est ainsi donnée et il l'accumule dans des structures de listes du type de celles que nous avons déjà commentées dans le contexte d'autres types de problèmes.

C'est ce caractère très ordinaire qui constitue l'importance de ce programme. BACON démontre que l'organisation des processus nécessaires pour faire des découvertes scientifiques est essentiellement la même que celle qui est requise dans la plupart des systèmes de résolution de problèmes. Certes, BACON ne fait qu'un seul type de découvertes et toutes sont induites à partir de données (*data-driven*). BACON est véritablement un pur système d'induction "baconienne". Bien des découvertes - mais certainement pas toutes - sont faites de cette façon, c'est-à-dire induites à partir des données, la plupart des autres étant obtenues par dérivations de théories. On note d'ailleurs que les lois découvertes par BACON ont beaucoup plus l'allure de lois descriptives que de lois explicatives.

Ces limitations de la généralité de *BACON* sont partiellement compensées par d'autres systèmes de découvertes que l'on a construits depuis. En particulier, Lenat a conçu le système *AM*, qui est davantage piloté par les concepts que par les données; autrement dit, en partant d'un stock initial de concepts, *AM* recherche de nouveaux concepts qu'il peut définir à partir des premiers. Il possède non seulement des heuristiques pour générer de nouveaux concepts, mais aussi des critères pour évaluer l'"intérêt" d'un concept, ce qui lui permet de guider sa recherche en direction des concepts offrant le plus d'intérêt.

Les comparaisons de ces programmes qui manifestent des qualités au moins rudimentaires de créativité scientifique avec les programmes qui créent de la musique ou des oeuvres picturales ne révèlent entre eux aucune différence qualitative. En particulier, les heuristiques d'exploration sélectives constituent bien leur principe organisateur central, et les structures de listes constituent bien les moyens essentiels mis en oeuvre dans le stockage organisé de l'information.

#### IV. LES ETAPES VERS L'UNITÉ

Si les recherches en psychologie du traitement de l'information continuent à mettre en valeur ces bases communes des processus de la pensée humaine dans tous les domaines où se manifestent intelligence et créativité, on peut présumer que des solutions au moins partielles au problème des deux cultures pourront être développées selon deux voies distinctes. D'une part, nous pouvons chercher à améliorer les méthodes d'enseignement qui faciliteront l'accès à des niveaux satisfaisants de culture scientifique et mathématique à des fractions beaucoup plus importantes de la population adulte. D'autre part, aussi diverses que soient les disciplines, et aussi spécialisées que soient les connaissances nécessaires pour se sentir à l'aise dans l'une d'elles, les modes de pensée que toutes partagent doivent devenir un centre d'intérêt dominant pour chacun des spécialistes. Si nous ne parvenons pas à partager la substance de nos spécialités, nous pouvons néanmoins partager la compréhension des moyens par lesquels nous pensons et créons. Par l'une ou l'autre de ces deux routes, la communication peut être rouverte entre les arts et les sciences. J'aimerais commenter succinctement chacune de ces possibilités.

#### L'ALPHABETISATION MATHÉMATIQUE

Si ces travaux de comparaison des processus de pensée mis en oeuvre dans les cultures scientifiques et littéraires mettent en valeur des points communs, nous ne devons pas oublier pour autant ces faits entêtés que soulignait initialement la question des deux cultures. Un grand nombre d'adultes intelligents persistent dans un état de quasi-analphabétisme mathématique et scientifique. En outre, ils trouvent l'étude des mathématiques désagréable, et nombreux sont ceux qui tiennent pour excessivement difficile l'acquisition de nouvelles compétences dans ce domaine. Une des interprétations possibles de ces faits consiste bien sûr à convenir qu'il existe vraiment, entre les individus, des différences fondamentales quant à leurs aptitudes en mathématiques (tenues pour distinctes de leurs aptitudes intellectuelles générales), et que nous avons tout simplement échoué jusqu'ici dans nos recherches pour identifier la nature de ces différences.

Je ne pense pas que nous puissions désormais soutenir cette thèse. Si de telles différences existaient, nous devrions tenir pour vraisemblable le fait qu'elles aient quelque chose à voir avec le processus de construction de représentations physiques non ambiguës exprimant la signification des énoncés verbaux. C'était, on s'en souvient, la première étape pour traduire par des équations l'énoncé d'un problème de physique ou d'algèbre. Puisque d'importantes recherches sont en cours pour élucider ces processus, peut être disposerons nous dans la prochaine décennie d'une connaissance plus assurée de l'existence ou de la non existence de telles différences. Je crois qu'il n'y a pas d'objectif plus important aujourd'hui, pour la psychologie de l'éducation, que la conquête d'une compréhension profonde de ces questions.

Que l'on découvre ou non de telles différences, nous devons toujours tenter d'y remédier en rendant accessibles les mathématiques et les sciences au plus grand nombre possible de gens. Nous devons trouver ce qui manque, tant au plan cognitif qu'au plan émotionnel dans nos systèmes d'enseignement actuels. Et s'il apparaît de grandes différences entre les aptitudes des individus, nous devons découvrir celles de ces capacités qui peuvent être corrigées et celles qui ne le peuvent pas.

## LE FOND COMMUN

Si le propre de toute étude est finalement d'acquérir une meilleure connaissance de l'être humain, sans doute ne paraîtra-t-il pas surprenant de proposer comme but essentiel d'une éducation épanouissante une compréhension approfondie des processus de la pensée humaine. La psychologie joue dès lors un rôle très particulier dans les communautés scientifiques, en proposant un des principaux itinéraires par lesquels nous pouvons enrichir notre compréhension de nous mêmes. Cette compréhension des processus de la pensée humaine fournira une des clefs vers la conception d'institutions qui, dans une société démocratique imprégnée de technologie, prennent et exécutent les décisions d'intérêt public. Toute discussion des institutions politiques repose sur l'hypothèse que les citoyens peuvent espérer comprendre leur fonctionnement, et sur la façon dont cette compréhension est affectée par les modalités de la communication sociale et politique.

La permanence et la réussite de la démocratie contemporaine impliquent que les représentants du pouvoir législatif soient capables à la fois de contrôler les experts et d'utiliser effectivement leurs connaissances. Pour y parvenir, nous disposons de quelques méthodes désormais consacrées par la tradition: l'élection publique, l'audition parlementaire, la sagesse de l'expert devant les tribunaux, l'autorité hiérarchique dans l'administration. Une part du malaise contemporain et de la perte de confiance dans les puissantes composantes techniques de nos sociétés tient à nos doutes quant à l'adéquation de ces méthodes traditionnelles aux conditions contemporaines de la vie en société. Seule une compréhension approfondie de la façon dont l'esprit humain travaille peut nous aider trouver quelques moyens pour les améliorer.

## BIBLIOGRAPHIE PARTIELLE DE L'ŒUVRE DE H.A. SIMON

- 1939 En collaboration avec C.E. RIDLEY, "Measuring Municipal Activities", Chicago International City Manager's Association., 2e édition, 1943.
- 1947 (2e Ed. 1937). "Administrative behavior. A study of the decision making processes in administrative organization", N.Y., The Macmillan Pub. Co., 260 pages. (3e édition avec additions, 1976).
- 1950 En collaboration avec D.W. SMITHBURN et W.A. THOMPSON, "Public Administration", N.Y., Alfred A. Knopf Pub. Co.
- 1954 En collaboration avec G. KOZMETSKY, H. GUETZKOW et O. TYNDALL, "Centralization versus Decentralization in organizing the controller's department", N.Y., Financial Executives Research Foundation.
- 1957 "Models of man, social and rational. Mathematical essays on rational human behavior in a social setting", N.Y., J. Wiley and Sons.
- 1958 En collaboration avec J. MARCH. "Organizations", N.Y., J. Wiley and Sons. (Plusieurs éditions ultérieures sans modifications, semble-t-il).
- 1960 En collaboration avec C.C. HOMER, F. MODIGLIANI, F. MUTH, "Planning production, inventories and work force", Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall.
- 1960 "The new science of management decision", revised ed. 1977, N.Y., Harper and Row, 50 pages.
- 1969 "The Science of the artificial", Cambridge, MASS., The MIT Press, 123 pages. Traduction française: "La Science des systèmes, science de l'artificiel", L'EPI, 1974
- 1972 En collaboration avec Allen NEWELL, "Human problem solving", Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall, 920 pages.
- 1972 En collaboration avec Laurent SIKLOSSY, "Representation and meaning experiments with information processing systems", Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall, 440 pages.
- 1977 En collaboration avec Yuji IJIRI, "Skew distributions and the size of business firms", N.Y., North Holland Pub.
- 1977 "Models of discovery, and other topics in the methods of sciences", D. Reidel Pub. Co., 456 pages.
- 1979 "Models of thought", New Haven, Yale University Press, 524 pages.
- 1981 "The Science of the artificial", Second Edition, Cambridge, Mass., The MIT Press, 246 pages.
- 1982 "Model of bounded rationality", deux tomes, Cambridge, Masson, The MIT Press.
- 1983 "Reason in human affairs", Stanford, CA, Stanford University Press, 115 pages.
- *Protocol analysis: Verbal reports as data*, (avec Ericsson, K.A.), (1984), Cambridge, MA: MIT Press.
- 1985 "Human Nature in Politics : the Dialogue of Psychology with Political Science", *The American Political Science Review*, Vol.79, N°2 (June), pp.293-304.
- 1987 "*Scientific discovery*" (avec Langley, P., Bradshaw, G. L., & Zytkow, J. M.), Cambridge, MA: MIT Press.
- 1989 "*Models of thought*" (vol II), New Haven, CT: Yale University Press.
- 1991 "*Models of my life*", (1991a), New York: Basic Books/Rationality in Political Behavior, Février 1991b, Carnegie Mellon University./Organizations and Markets, *Journal Of Economic Perspectives*, vol 5, n°2, printemps 1991c, pp.25-44.
- 1995 "Technology is not the Problem", in Baumgartner Peter et Payr Sabine, *Speaking Minds: Interviews with twenty Eminent Cognitive Scientists*, Princeton University Press, pp.231-248.
- 1997 "*Models of bounded rationality: Empirically grounded economic reason*" (Vol. 3), Cambridge, MA: The MIT Press.

## ICONOGRAPHIE

- Photography of Herbert Simon, Circa 2000, unknown author. Wikimedia Source. Work in the public domain following the US code of copyrights.