

Le courrier du CNRS 79

Auteur(s) : CNRS

Les folios

En passant la souris sur une vignette, le titre de l'image apparaît.

124 Fichier(s)

Les relations du document

Ce document n'a pas de relation indiquée avec un autre document du projet.□

Citer cette page

CNRS, Le courrier du CNRS 79, 1992-10

Valérie Burgos, Comité pour l'histoire du CNRS & Projet EMAN (UMR Thalim, CNRS-Sorbonne Nouvelle-ENS)

Consulté le 16/10/2025 sur la plate-forme EMAN :

<https://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/169>

Présentation

Date(s)1992-10

Mentions légalesFiche : Comité pour l'histoire du CNRS ; projet EMAN Thalim (CNRS-ENS-Sorbonne nouvelle). Licence Creative Commons Attribution - Partage à l'Identique 3.0 (CC BY-SA 3.0 FR).

Editeur de la ficheValérie Burgos, Comité pour l'histoire du CNRS & Projet EMAN (UMR Thalim, CNRS-Sorbonne Nouvelle-ENS)

Information générales

LangueFrançais

CollationA4

Informations éditoriales

N° ISSN0153-985x

Description & Analyse

Nombre de pages25

Notice créée par [Valérie Burgos](#) Notice créée le 05/10/2023 Dernière modification le 13/12/2024

LE COURRIER DU CNRS

DOSSIERS SCIENTIFIQUES

**SCIENCES
COGNITIVES**

Etudes théoriques et recherches
expérimentales joignent leurs efforts
pour comprendre le fonctionnement
du cerveau et de l'esprit et concevoir
des moyens artificiels pour amplifier
les pouvoirs de l'intelligence.

N° 79 - 50F - OCTOBRE 1992



CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

CNRS
Dépôt des archives
de la Délégation Paris Michel-Ange
Bâtiment 19
1, avenue de la Terrasse
91198 GIF-sur-Yvette



COUVERTURE

R. Magritte, *La voix du sang* (1948), coll. part. (© ADAGP Paris 1992, Photothèque René Magritte-Giraudon).

En 4^e de couverture

R. Hausmann, *L'esprit de notre temps*, (1919), (© Musée national d'art moderne, Paris, Centre Georges Pompidou, DR).

LE COURRIER DU CNRS

DOSSIERS SCIENTIFIQUES

Directeur de la publication :
François Kourilsky

RÉALISATION :

CNRS-Atelier de l'Écrit
Groupement des Unités de la
Communication du CNRS
1, place Aristide-Briand
92195 Meudon Cedex

Rédaction en chef : Sylvie Langlois

Rédaction : Pierrette Massonnet,
Christine Girard

Secrétariat : Muriel Hourlier

COMITÉ SCIENTIFIQUE :

Daniel Andler
Robert Azencott
Josiane Bertoncini
Vincent Bloch
Mario Buitello
Michel Denis
Jean-Michel Hoc
Pierre Jacob
Jean-Sylvain Liénard
Serge Moscovici
Jean-Luc Nespoulous
Guy Politzer
Jean-Yves Pollock
Joël Quinqueton
Bernard Renauld
Jean Requin
Scania de Schonen
Juan Segui

COMITÉ DE LECTURE :

Georges Chapouthier
Bernard Dorny
Jean-Louis Lavallard

Ce numéro du *Courrier du CNRS*
a été préparé sous la direction
d'André Holley, directeur
du PIR *Cognisciences* du CNRS,
et coordonné par Dominique Rajon.

Prix : 50 francs.

Vente au numéro : CNRS - Editions,
20-22, rue Saint-Amand,
75015 Paris - tél : (1) 45 33 16 00.

Le Courrier du CNRS remercie
les auteurs et les organismes
qui ont participé à ce dossier.

Les textes peuvent être reproduits
sous réserve de l'autorisation
du directeur de la publication.

Fabrication

Direction artistique : Gréa Bleu - tél : (1) 43 45 98 00
Photogravure : SRO - tél : (1) 43 45 98 00
Impression : Roto-France-Imprimerie
tél : (1) 60 06 60 00
Commission paritaire : AD 303
ISSN : 0153-985X. ISDN : 2-222-44764-1.

© Centre National de la Recherche Scientifique

Ce numéro thématique du *Courrier du CNRS* présente un aperçu des travaux réalisés en France dans ce domaine scientifique nouveau que l'on appelle sciences cognitives ou sciences de la cognition. Depuis quelques années, les instances responsables de la recherche, au Ministère de la Recherche et de l'Espace, au Ministère de l'Éducation Nationale et au CNRS ont reconnu l'importance des enjeux scientifiques, culturels et socio-économiques des travaux sur la cognition et ont agi pour promouvoir leur développement. Une action concertée "Sciences de la Cognition" animée par le professeur Jean-Pierre Changeux achèvera sa première phase à la fin de 1992, tandis que le Programme "Cognisciences" du CNRS abordera bientôt sa quatrième année. Il était opportun de présenter ce domaine à un large public.

Que sont donc les sciences cognitives ? Le lecteur constatera que les questions abordées ont trait de quelque manière aux processus de codage, de traitement, de conservation ou de transfert d'informations tels qu'ils sont réalisés par le cerveau ou par l'ordinateur. Tous les auteurs ne se font pourtant pas la même idée de la cognition, de l'intelligence, de la connaissance et des meilleures voies pour explorer ces notions. Chacun aborde son thème cognitif avec un point de vue dominant, celui de la discipline dans laquelle il a été formé. On ne trouvera donc pas dans les pages qui suivent l'image d'une science arrivée à maturité, avec ses méthodes propres, des concepts strictement définis et des réalisations achevées. Sur chacun des grands domaines de la cognition, sur le langage, le raisonnement, la perception, l'action, l'apprentissage, la mémoire..., plusieurs discours se côtoient et parfois se chevauchent. Ils conservent la marque de leur insertion dans les neurosciences, l'informatique, la psychologie ou la linguistique. L'objectif des sciences cognitives et leur condition d'existence est que ces perspectives actuellement diverses et quelque peu cloisonnées s'ouvrent davantage, qu'elles échangent toujours plus de méthodes et de concepts, et qu'un langage commun se construise.

Parler, raisonner, percevoir, agir, se souvenir sont des activités qui ont depuis longtemps suscité recherches et réflexions. Des intuitions pénétrantes sur la pensée, l'esprit, la connaissance ont été exprimées au cours des siècles et se sont affrontées; des faits empiriques ont été recueillis en abondance. Mais les savoirs partiels ainsi constitués ont été élaborés à partir de points de vue hétérogènes et sont donc fragmentés. Les sciences cognitives qui se trouvent en position d'héritières de ce riche passé ne prétendent ni le prolonger, ni en rajouter l'image. Elles ne sont pas davantage une étiquette commode pour regrouper une nébuleuse de travaux dispersés. Leur projet est plus ambitieux. Il est de faire prévaloir une démarche unificatrice : de rechercher dans la variété apparemment considérable des nombreuses manifestations de la cognition naturelle et de ses formes artificielles, la marque de processus relativement généraux quand on les considère à un niveau d'abstraction convenable ; de créer des langages qui puissent décrire



André Holley
Directeur du Programme
interdisciplinaire de recherche Cognisciences

avec une pertinence comparable le fonctionnement du cerveau, les opérations mentales et celles réalisées par des machines construites par l'Homme. Des travaux formels en logique, en mathématiques et en informatique ouvrent désormais la possibilité de structurer des connaissances acquises en abondance sur le langage et les autres activités mentales, ainsi que de modéliser le fonctionnement du cerveau que les neurosciences dévoilent avec force détails.

On conviendra que l'entreprise des sciences cognitives est d'une difficulté redoutable. Elle l'est d'abord en raison de l'extrême complexité des phénomènes étudiés. Elle l'est aussi parce que le domaine dans lequel la connaissance scientifique a l'ambition de pénétrer se confond avec ce que l'Homme considère comme la manifestation par excellence de son humanité. La distanciation propice à l'objectivité devient

problématique. Chaque discipline a dû, pour se constituer, rompre avec les mythes et autres représentations collectives que les cultures ont produits pour interpréter le monde physique et la vie. Pour s'instituer comme sciences véritables, les sciences cognitives doivent, elles aussi, rompre avec des conceptions solidement établies. Elles se donnent de l'esprit - au sens du *mind* anglais - une conception implicitement ou explicitement "naturaliste" que beaucoup trouveront réductrice. Certains acceptent déjà bien mal que des machines accomplissent des activités qui seraient qualifiées d'intelligentes si elles étaient réalisées par des humains. D'autres doutent que la connaissance du cerveau rejoigne jamais celle des activités mentales appréhendée par la psychologie. Ces débats ne sont pas tous extérieurs aux chercheurs eux-mêmes. On peut en trouver la trace dans les pages de ce numéro.

Il serait pourtant imprudent d'assigner une limite a priori à l'application des méthodes de la connaissance objective à ses propres fondements. Si limites il y a, elles sont encore très loin de notre portée. Le champ d'exercice des sciences cognitives s'étend bien au-delà du territoire qui commence à être exploré. Quant aux prolongements technologiques des connaissances fondamentales, ils ne sont qu'ébauchés. Ceux dont on crédite habituellement les sciences cognitives sont pour l'essentiel issus de quelques-unes des disciplines entrant dans leur mouvance, au premier rang desquelles se trouvent l'informatique et l'intelligence artificielle. On pressent qu'un savoir intégré sur la cognition apportera de profonds changements dans tous les domaines socio-économiques où l'enjeu est de mettre en valeur l'intelligence humaine, de l'assister et d'en amplifier les pouvoirs.

Cet enjeu est, n'en doutons pas, un moteur puissant de l'impulsion donnée aux sciences cognitives. La signification profonde de la démarche s'étend pourtant bien au-delà. En tentant d'appréhender la cognition dans des termes qui soient compatibles avec ceux qui rendent compte des phénomènes physiques et biologiques, les chercheurs participent à cet effort d'universalité et aussi de lucidité qui fonde la recherche scientifique. Souhaitons que cette démarche soit aussi, pour l'Homme, la source d'un meilleur empire sur soi-même.

SOMMAIRE

EDITORIAL

André Holley

AVANT-PROPOS

L'émergence des sciences cognitives 6
The emergence of cognitive science
Daniel Andler

Cerveau et cognition 7
Brain and cognition
Marc Jeannerod

LANGAGE

Introduction

Juan Seguí
Jean-Yves Pollock
Jean-Luc Nespoulous

La segmentation de la parole 10
Speech segmentation
Emmanuel Dupoux
Jacques Mehler

La reconnaissance automatique de la parole 11
Automatic speech recognition
Jean-Marie Pierrrel
Noëlle Carbonell

La syntaxe de la structure sonore 12
Syntax of sound structure
Jean Lowenstamm

Point de vue linguistique sur les mots construits 12
Linguistic aspects of word production
Danielle Corbin

La modélisation de l'identification des mots écrits 14
Modelling visual word recognition
Jonathan Grainger
Arthur M. Jacobs

Langage et lecture 15
Perception and representation of language in reading
Cécile Beauvillain

Regard et lecture 16
Eye motion and reading
Kevin O'Regan
Joël Pynte

L'organisation syntaxique de la phrase 17
The syntactic organization of the sentence
Andrée Borillo

La compréhension du langage 18
Language comprehension
Jean-François Le Ny

Le traitement automatique des langues 19
Automatic processing of language
Gérard Sabah

Effets de sens 20
Making sense
Benoît de Cornulier

La pragmatique linguistique 21
Linguistic pragmatics
François Récanati

Les comparaisons interlangues 22
Cross-linguistic studies
Michèle Kail

Théorie linguistique et acquisition du langage 23
Linguistic theory and language acquisition
Celia Jakubowicz

Le langage et les lésions cérébrales 24
Language and brain lesions
Jean-François Démonet
Jean-Luc Nespoulous
Dominique Cardebat
Michèle Puel

La modélisation des mécanismes de la lecture 25
The modelling of reading mechanisms
Serge Carbonnel

Les mécanismes de production du langage oral 26
The mechanisms of speech production
Sylviane Valdois

RAISONNEMENT

Introduction 27
Mario Borillo
Guy Politzer

Prédicats graduels et modalités nuancées 29
Gradual predicates and graded modalities
Didier Dubois
Henri Prade

Le calcul d'événements : entre logique et langage 30
Calculation of events: between logics and language
Mario Borillo
Bruno Gauvre

Le raisonnement par abduction 31
Reasoning by abduction
Robert Denoelombe
Luis Fariñas del Cerro

Le raisonnement inductif 32
Inductive reasoning
Jacques Dubucs

Le raisonnement analogique 33
Analogical reasoning
Louis Hourreily
Eugène Chouraqui

L'analogie dans l'apprentissage des dispositifs de commande 34
Analogy in learning how to handle control devices
Anh Nguyen Xuan

Raisonnement pour planifier 35
Reasoning for planning
Claude Barroul
Véronique Royer

Raisonnement et résolution de problèmes 36
Reasoning and problem-solving
Jean-François Richard
Daniel Kayser

L'acquisition des connaissances 37
Knowledge acquisition
Jean-Paul Krivine

Le décalage entre logique et connaissances 38
The gap between logic and knowledge
Claude Bartien

Raisonnement et conceptualisation 39
Reasoning and conceptualization
Gérard Vergnaud

DE LA PERCEPTION À L'ACTION

Introduction 40
Jean Requin

La dynamique du traitement visuel 42
Visual processing dynamics
Simon Thorpe
Michel Imbert

L'audition organisatrice 43
The organization of hearing
Laurent Demany
Stephen McAdams

Traitement et stockage de l'information olfactive 44
Processing and storing olfactory data
André Holley

A la recherche du sixième sens 45
The quest for the sixth sense
Jean-Pierre Roll

Du stimulus au mouvement <i>From stimulus to motion</i> Alexis Riehle John Seal	46	Les apprentissages non-conscients <i>Unconscious learning</i> Pierre Perruchet	60	COGNITION ET DÉVELOPPEMENT	
L'intelligence visuo-motrice <i>Smart visuomotor control</i> Nicolas Franceschini	47	Le médicament, un outil d'investigation des fonctions cognitives <i>Drugs as tools for the study of cognition</i> Jean-Marie Danion François Sella	61	Introduction <i>Scania de Schonen</i> Josiane Bertoncini	72
Perception du mouvement et représentation de l'espace <i>Motion perception and spatial representation</i> Alain Berthoz Isabelle Israël Sidney Wiener	48	Modèles de plasticité synaptique dans le système visuel <i>Synaptic and functional plasticity in visual system</i> Yves Frégnac	62	Cognition foetale ? <i>Fetal cognition?</i> Jean-Pierre Lecanuet Benoist Schaal Carilyn Granier-Deferre	74
La représentation corticale de l'espace 3D <i>Cortical spatial representation</i> Yves Trotter Yves Burnod	49	Les supports neurobiologiques de la mémoire <i>Neurobiological bases for memory</i> Bernard Soumireu-Mourat François Roman	63	L'acquisition de la parole <i>Language acquisition</i> Josiane Bertoncini Bénédicte de Boysson-Bardies	75
Le système fronto-striatal et le raisonnement spatial <i>The fronto-striatal system and the spatial reasoning</i> Jean-Paul Joseph	50	Cerveau et activation des représentations mnésiques <i>Brain and activation of memory representations</i> Vincent Bloch	64	La reconnaissance des visages chez le nourrisson <i>Infant face recognition</i> Scania de Schonen Yves Burnod Christine Deruelle	76
L'algorithmique du mouvement <i>Algorithmic motion planning</i> Jean-Paul Laumond	51	De l'espace perçu à l'espace représenté <i>From space perception to space representation</i> Catherine Thinus-Blanc Bruno Poucet	65	Les débuts de la connaissance des objets <i>The beginnings of knowledge</i> Arlette Streri Roger Lécuyer	77
Les bases neurales du contrôle oculomoteur <i>Neural basis of eye-motion control</i> Jacques Droulez Alexej Gruntya Pierre-Paul Vidal	52	Image et description <i>Image and description</i> Michel Denis	66	La reconnaissance de soi <i>Self-recognition</i> Pierre-Marie Baudonnière Jean-Claude Lepecq François Jouen	78
Le contrôle du mouvement humain <i>Human motion control</i> Yves Guillard Jean Palluaux	53	Les représentations cognitives dans l'analyse des langues <i>Cognitive representations in the analysis of languages</i> Jean-Pierre Desclés	67	La corticogénèse du primate <i>Primate corticogenesis</i> Henry Kennedy Colette Dehay	79
Des rétines en silicium pour une vision des robots <i>Silicon retina for robot eyesight</i> Bertrand Zavidovique	54	Représentations catégorielles, prototypes et typicalité <i>Representations of categories, prototypes and typicality</i> Danièle Dubois	68	Génétique et cognition <i>Genetics and cognition</i> Pierre Roubertoux Wim E. Crusia	80
MÉMOIRE ET REPRÉSENTATION		Modélisation informatique des processus didactiques <i>Computational modelling of didactic processes</i> Nicolas Balacheff Jean-Marie Laborde	69	Latéralisation cérébrale et représentation mentale <i>Cerebral lateralization and mental representation</i> Jacques Vauclair Joël Fagot	81
Introduction Michel Denis Joël Quinquignon	56	Concevoir des agents rationnels <i>Designing rational agents</i> Jean Sallartin	70	MODÉLISATIONS, SIMULATIONS ET IMAGERIE CÉRÉBRALE	
La mémoire, forme de la cognition <i>Memory, a form of cognition</i> Guy Tiberghien	58	L'apprentissage par généralisation <i>Learning by generalization</i> Jean-Gabriel Gnanassia	71	Introduction Daniel Andler Robert Azencott Bernard Renault	82
L'attention sélective <i>Selective attention</i> Eric Sieroff	59			La cartographie des fonctions cognitives <i>Cognitive function mapping</i> Bernard Mazoyer	84

SOMMAIRE

La mesure de la perfusion cérébrale par IRM <i>MRI brain perfusion measurement</i> <i>Anne Leroy-Willig</i>	85	LA COGNITION EN SITUATION		Mécanismes cognitifs spontanés et étude scientifique de l'homme <i>Spontaneous cognitive mechanisms and the scientific study of man</i> <i>Jean-Pierre Decanchy</i>	110
Activité électromagnétique cérébrale et processus cognitifs <i>Electromagnetic brain activity and cognitive processes</i> <i>Bernard Renault</i> <i>Marie-Hélène Giard</i>	86	Introduction <i>Jean-Michel Hoc</i> <i>Jean-Sylvain Liénard</i>	98	Cognition et communication <i>Cognition and communication</i> <i>Ewa Drozda-Senkowska</i>	111
Identification des générateurs de l'activité électrique cérébrale <i>Brain electrical activity generator identification</i> <i>Jacques Pernier</i> <i>François Perrin</i> <i>Olivier Bertrand</i>	88	Simulation cognitive et psychologie ergonomique <i>Cognitive simulation and ergonomic psychology</i> <i>René Amalberti</i> <i>Claude Valot</i>	100	Rationalité située et savoir collectif <i>Situated rationality and collective knowledge</i> <i>Jean-Pierre Dupuy</i> <i>Pierre Lèves</i>	112
Modèles morphodynamiques de catégorisation phonétique <i>Morphodynamic models of phonetic categorization</i> <i>Jean Petitot</i>	90	Cognition et systèmes experts médicaux <i>Cognition and medical expert-systems</i> <i>Régis Beuscart</i> <i>Marius Fieschi</i>	101	La formalisation des croyances en économie <i>Belief formalization in economics</i> <i>Philippe Mongin</i> <i>Bernard Walliser</i>	113
Approches formelles de l'apprentissage <i>Formal approaches to learning</i> <i>Daniel Andler</i> <i>Stéphane Boucheron</i> <i>Eric Martin</i>	91	Vers des partenaires cognitifs <i>Looking forward to new cognitive associates</i> <i>Pierre Falzon</i>	102	De l'attribution d'intention à la communication <i>From attribution of intentions to communication</i> <i>Dan Sperber</i>	114
Neurones formels et physique statistique <i>Formal neurons and statistical physics</i> <i>Jean-Pierre Nadal</i>	92	L'EIAO, un domaine d'activités pour les cognoscences <i>ICAL, a field for cognitive sciences</i> <i>Martial Vivet</i>	103		
Machines de Boltzmann synchrones et vision artificielle <i>Synchronous Boltzmann machines and artificial vision</i> <i>Robert Azencott</i> <i>Jérôme Lacaille</i> <i>Laurent Younis</i>	93	La modélisation du langage et du dialogue pour le contrôle aérien <i>Dialogue modelling for air traffic control</i> <i>Françoise Néel</i> <i>Karim Maturuf</i>	104	LE TOURNANT COGNITIF EN PHILOSOPHIE	
Auto-organisation du système visuel des mammifères <i>Visual organization in mammals</i> <i>Claire Devouge</i> <i>Mathilde Maugeot</i>	93	Les facteurs humains dans les interfaces utilisateurs <i>Human factors in user interfaces</i> <i>Michel Beaulieu-Lafon</i>	105	Introduction <i>Pierre Jacob</i>	115
Modélisation du système olfactif des insectes <i>Modelling the insect olfactory system</i> <i>Gérard Dreyfus</i>	95			Le mécanisme et la thèse de Church-Turing <i>Mechanism and Church-Turing's thesis</i> <i>Jacques Dubucs</i> <i>Jean Monconi</i>	116
Analyse de l'intégration synaptique <i>Synaptic integration analysis</i> <i>Jacques Demangeot</i> <i>Jean-Louis Martiel</i>	96	COGNITION ET SOCIÉTÉ		Information et représentation <i>Information and representation</i> <i>Pierre Jacob</i>	117
Contrôle de systèmes dynamiques par réseaux de neurones <i>Dynamics control and neural networks</i> <i>Nicolas Seube</i>	97	Introduction <i>Serge Moscovici</i>	106	Téléosémantique <i>Teleosemantics</i> <i>Pascal Engel</i> <i>Joëlle Proust</i>	118
		La formalisation des raisonnements dans les sciences de l'homme <i>Formalization and reasoning in human sciences</i> <i>Jean-Claude Gardin</i>	107	Evolution biologique et cognition <i>Biological evolution and cognition</i> <i>Jean Gayon</i>	119
		Le traitement cognitif des "objets" sociaux <i>Cognitive processing of social "objects"</i> <i>Michel Piolot</i>	108	Epistémologie de la vigilance <i>Epistemology of wakefulness</i> <i>Claude Debru</i>	120
		Les représentations sociales <i>Social representations</i> <i>Denise Jodelet</i>	109	Index des auteurs	121

LE PROGRAMME COGNISCIENCES DU CNRS

Ses objectifs

- Stimuler, amplifier l'activité de recherche en sciences cognitives.
- Accroître la collaboration entre les disciplines concernées.
- Préparer le transfert de la recherche fondamentale aux technologies cognitives.

Son champ scientifique

Les sciences cognitives sont comprises comme un nouveau champ de recherches pluridisciplinaires, lieu des interactions entre les travaux sur le fonctionnement du cerveau, les propriétés du psychisme, les modèles physiques et formels de ces propriétés et les recherches théoriques et techniques sur l'intelligence.

Ses actions

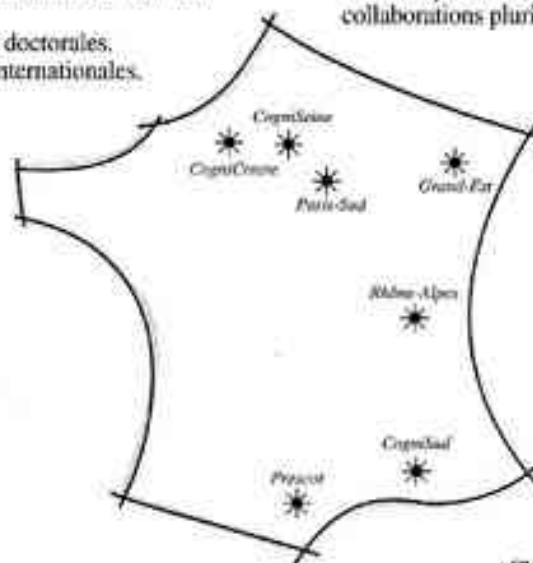
L'action thématique et incitative sur programmes et équipes

(ATIFE COGNISCIENCES)

- Création de nouvelles équipes pour susciter de nouvelles orientations de recherche dans des laboratoires du CNRS intéressés par des thèmes de sciences cognitives.
- Attribution de bourses de formation complémentaire à de jeunes post-doctorants désirant faire un stage de un à deux ans dans un laboratoire étranger pour se familiariser avec des méthodes et concepts nouveaux.
- Affichage de postes de chercheurs.

Les réseaux régionaux cognisciences

- Elaborer et réaliser des projets de recherche.
- Animer la recherche.
- Favoriser l'évolution des laboratoires vers les sciences cognitives.
- Lier recherche et formations doctorales.
- Stimuler les collaborations internationales.
- Les réseaux régionaux regroupent des équipes et de laboratoires reconnus par le Comité Scientifique du Réseau, qui s'engagent dans des collaborations pluridisciplinaires.



PROGRAMME COGNISCIENCES
CNRS - Délégation Régionale Rhône-Alpes

2, avenue Albert-Einstein - BP 1335 - 69609 Villeurbanne Cedex
Tél : 72 44 56 40 - Fax : 72 44 92 26 - Mail : bulley@cognisciences.univ-lyon1.fr

L'ÉMERGENCE DES SCIENCES COGNITIVES

■ Daniel Andler

Les sciences cognitives ont eu plusieurs naissances. Conceptuellement, elles se sont progressivement dessinées à partir des années 1940, pour prendre leur forme actuelle vers la fin des années 1960. Institutionnellement, leur première apparition se situe au début de ces années soixante mais leur installation dans le paysage scientifique mondial ne remonte qu'aux années 1980. La locution qui les désigne désormais, quant à elle, se répand avec un retard supplémentaire d'une dizaine d'années.

Le rappel de ces quelques données chronologiques peut nous aider à éviter certaines méprises quant à l'importance et à la nouveauté des recherches qui se réclament des sciences cognitives. Les décalages inévitables dans la prise de conscience, à l'extérieur et même à l'intérieur des disciplines concernées et dans l'adoption d'une terminologie adaptée ne doivent masquer ni l'originalité ni les racines d'un mouvement scientifique et plus largement intellectuel qui a beau évoquer (à juste titre) des antécédents aussi divers que Hobbes ou Descartes, Helmholtz ou Wundt, Broca ou Ramon y Cajal, Babbage ou Piaget... n'en est pas moins fondé sur un répertoire articulé d'acquis conceptuels, expérimentaux et techniques qui faisait défaut à tous ses prédécesseurs.

Ce répertoire ne s'organise pas autour d'une découverte fondamentale, ou de quelque autre point d'appui central. Ce qui lui donne son unité est davantage une ambition : édifier de front une théorie de l'esprit et une théorie du cerveau qui soient solidaires sans être confondues, ce qui nécessite, non moins qu'un rejet de tout dualisme, la mise au jour d'un fondement matériel adéquat pour la première. L'histoire des sciences cognitives se ramène pour l'essentiel à l'émergence des conditions intellectuelles propres à donner corps à cette ambition.

Ces conditions ont mûri en trois lieux principaux : la neurobiologie, la psychologie expérimentale, la logique prolongée par l'informatique.

Les neurosciences, y compris la neuropsychologie, ont complètement transformé notre compréhension du système

nerveux central. La biologie moléculaire, la neurochimie, l'imagerie cérébrale, les sondes et d'autres techniques d'investigation ont fait passer d'utopique à réaliste le projet d'une élucidation des mécanismes cérébraux, accréditant du même coup l'entreprise naissante. Leurs progrès, en s'accroissant depuis quelques années, donnent aux sciences cognitives un nouveau visage.

La psychologie cognitive d'aujourd'hui est née d'une convergence. Elle a rejeté le tabou behavioriste et rétabli le *mens*, l'esprit, au cœur de sa problématique. En définissant un niveau de description fondamental, celui du traitement de l'information, elle s'assigne une tâche claire, qui ne se confond pas avec celle des neurosciences, et se soumet néanmoins à des impératifs méthodologiques de même nature que ceux des autres sciences. Enfin, elle dispose d'une instrumentation qui lui permet d'étudier les processus mentaux – ceux du moins qui relèvent de ses compétences actuelles – avec une précision spatio-temporelle inconcevable jusqu'à récemment et d'en faire varier expérimentalement les conditions avec toute la souplesse dont disposent les (autres) sciences de la nature.

Quant à la logique, elle a donné naissance à trois concepts cardinaux : langage formel, calcul ou opération effective, information. Les deux premiers sont complètement et rigoureusement définis ; mieux encore, ils le sont exhaustivement. Le troisième, au contraire, ne se dégage que graduellement à partir des années 1940, à l'interface de la logique, des mathématiques appliquées, des sciences de l'ingénieur et de la physique. Investissant très vite la biologie moléculaire, il prend pied en psychologie dès les années 1950 et s'installe au cœur des sciences cognitives. Son élaboration théorique, décisive pour leurs fondements, fait aujourd'hui partie du programme de recherche de la logique au sens large.

La dernière pièce du dispositif est l'ordinateur. Il incorpore littéralement les trois concepts dont il vient d'être question (rappelons à cet égard qu'il est issu en droite ligne des recherches logiques¹) : c'est un calculateur universel opérant sur un langage formel interne et susceptible d'opérer sur un langage formel quelconque, donc d'être considéré comme un système de traitement de l'information. Dès lors que la psychologie choisit de son

côté de considérer le cerveau comme un système de traitement de l'information, les tâches dont celui-ci s'acquitte peuvent être vues, sous l'angle approprié et moyennant certaines idéalizations, comme identiques à celles que, dans des conditions similaires d'interprétation, on peut attribuer à l'ordinateur. S'ouvre ainsi la perspective, dont se nourrit l'intelligence artificielle, d'une reproduction ou simulation des capacités cognitives par l'ordinateur. L'ordinateur est donc bien plus qu'une métaphore, et n'est pas qu'un outil. Pour autant, il n'est pris comme image ni du cerveau ni de l'esprit. Cela précisé, il faut distinguer, au sein des sciences cognitives, ceux qui placent le rapprochement fonctionnel du cerveau et de l'ordinateur au centre de leur conception de la cognition, et en tirent argument pour un découplage entre sciences de l'esprit et sciences du cerveau, de ceux qui n'accordent à ce point de vue qu'une importance relative².

A cette énumération des principaux éléments du répertoire des sciences cognitives manquent non seulement plusieurs pièces d'importance apportées notamment par la linguistique ou la philosophie, mais encore et surtout les liens qui en assurent la cohérence et la fécondité. Cette articulation varie cependant d'un programme de recherche à l'autre, et d'une phase à la suivante. En retracer l'évolution reviendrait à faire la chronique de ce nouveau domaine, un travail qui reste à entreprendre.

1. Le logicien anglais Alan Turing en expose le principe dans un article paru en 1937 et consacré à la résolution d'un problème central pour la métamathématique. L'article est une influence directe et indirecte sur la conception des premiers ordinateurs durant la Deuxième Guerre mondiale, tant par l'équipe américaine dirigée par J. von Neumann que par l'équipe anglaise dont Turing lui-même était l'âme.

2. Les premiers défendent la conception dite parfois "classique" ou "cognitiviste" ou "symbolique" : les seconds se rattachent au connexionnisme (réseaux de neurones) ou d'autres formes de "neuroréflexologie".

■ Daniel Andler, professeur à l'Université Lille III, directeur-adjoint du Centre de recherche en épistémologie appliquée (URA 1259 CNRS).

CERVEAU ET COGNITION

■ Marc Jeannerod

Je prononce le mot "cerveau". Cette action est l'aboutissement audible d'un processus complexe qui inclut l'image mentale que j'ai de l'objet cerveau, la recherche du mot correspondant dans mon lexique, l'utilisation de règles phonologiques et la mise en jeu des muscles de mon tractus vocal pour produire les phonèmes qui le constituent. Enlevons par l'imagination tous les mécanismes nerveux qui ont permis le déroulement de ces opérations et qui font que le mot a finalement été prononcé. Que reste-t-il ? En d'autres termes, qu'est-ce qu'une activité cognitive sans le cerveau qui, en définitive, la fabrique ?

Ces questions montrent bien l'intimité des relations qui unissent activité cérébrale et cognition. Paradoxalement, pourtant, la connaissance que nous avons du fonctionnement nerveux après un bon siècle de recherches ne nous éclaire encore que très peu sur la nature de ces relations. Quel cadre donner à ces recherches ? Les conceptions extrêmes héritées de la philosophie classique (dualisme "cartésien" ou monisme matérialiste) apparaissent sans valeur scientifique, tandis que les conceptions intermédiaires, fruits de la récente Neurophilosophie (interactionisme, fonctionnalisme), ne sont le plus souvent que des non-prises de position idéologiquement neutres.

Le programme des neurosciences est de décrire les éléments constitutifs du réseau nerveux et d'en abstraire les règles de fonctionnement. Dès les étapes élémentaires du traitement de l'information nerveuse, celles de la transmission synaptique, nous sommes confrontés à une énorme complexité numérique et organisationnelle. Quel rôle attribuer à la multitude de synapses contactant chaque élément du réseau ? La modélisation constitue certes un complément indispensable pour gérer cette complexité, même s'il faut pour l'instant se satisfaire de l'analogie avec des réseaux où chaque élément est connecté avec tous les autres

et où l'information circule selon des lois de perméabilité synaptique d'abord imposées par l'expérimentateur. Par la suite, on peut penser que la circulation même de l'information façonne le réseau en ouvrant ou fermant des passages, en sélectionnant des voies.

La forme du cerveau n'est cependant pas que le résultat d'une interaction avec l'environnement ou le fruit d'une auto-adaptation. Il n'est pas fait "à l'importe comment" et ne peut acquérir ni traiter n'importe quelle information. Sa construction obéit à des règles précises, reflet de

récemment, grâce aux techniques de visualisation de l'activité métabolique cérébrale, que des régions différentes sont activées lors de l'énoncé des mots, lors de la lecture, ou lors de l'audition de ces mêmes mots. Ces régions correspondent étroitement à celles dont la lésion produit les déficits spécialisés de la fonction langagière (aphasies, alexie, etc.) observés en clinique. C'est là où l'indique la neuropsychologie chez le malade que sont représentées les sous-fonctions du langage chez le sujet normal. La correspondance point par point entre des

zones cérébrales délimitées et des unités psychiques a longtemps été rejetée au nom de l'idée que le psychisme est un et ne peut se fragmenter. Aujourd'hui, la conception qui prévaut est au contraire celle d'un partage du travail entre différentes régions cérébrales, d'un fonctionnement par canaux parallèles et donc d'une segmentation des opérations cognitives en modules distincts. Pour la psychologie cognitive, qui se qualifie parfois de néophrénologique, ces notions de parallélisme ou de modularité sont des notions courantes. La perception des objets, la compréhension du langage sont des opérations analytiques avant d'aboutir au percept ou au concept. De la confrontation entre neuro-règles et cogito-règles sortira peut-être la solution de ce difficile *binding problem*, le problème de l'unité de l'expérience subjective. Comment les attributs analysés par les canaux spécifiques de traitement

de la couleur, du mouvement, de l'orientation, de la forme sont-ils rapportés à un même objet ? Comment le sens peut-il émerger d'une séquence de phénomènes ? La réponse à ces questions requiert l'emploi d'une méthodologie spécifique qui reste à définir, nourrie de la recherche en neurosciences et en sciences cognitives, et qui permettra d'aborder d'autres domaines encore obscurs du fonctionnement mental, comme ceux de l'accès à la conscience ou du contenu des représentations mentales.

■ Marc Jeannerod, professeur des universités, directeur de l'Unité Vision et motricité (Unité 94 INSERM).

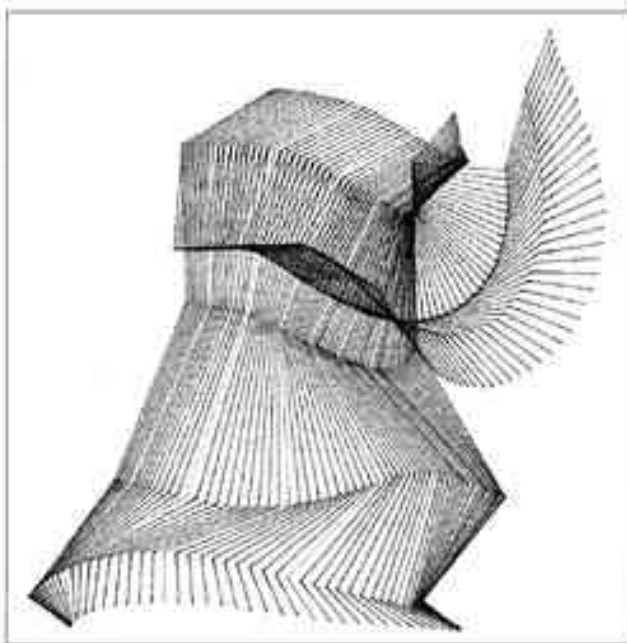


Image d'élite de la décomposition du mouvement lors d'un lancer de ballon (ICGDR 1004 CNRS).

l'encodage génétique de mécanismes d'établissement de connexions. Dans quelle mesure ces "neuro-règles", dans la mesure où elles contraignent l'encadrement des connaissances et l'expression des fonctions cognitives, peuvent-elles se transformer en "cogito-règles" ? Jusqu'à quel point la grammaire innée qui permet les premières acquisitions et la construction progressive de l'appareil cognitif adulte dépend-elle de la mise en place des connexions nerveuses au cours de l'embryogénèse ?

Pour illustrer ce problème des relations entre cerveau et cognition, prenons l'exemple offert par la neuropsychologie du langage. On s'est aperçu

Langage



S. Dalí. *Galatea de las esferas*, (1932), Figueras, Musée Dalí (D. DEMART PRO ARTE R.V./ADAGP Paris 1992, Oronoz - Artphoto).

Parmi les capacités cognitives des êtres humains, celle du langage constitue sans aucun doute la plus remarquable et la plus étudiée en tant qu'activité et en tant que produit de cette activité. Toutefois, si l'intérêt pour l'étude du langage existe depuis les temps les plus reculés, son abord scientifique et intégré est relativement récent. En effet, c'est essentiellement à partir des années soixante, notamment avec le développement de la Grammaire Générative, qu'un lien étroit fut établi entre des disciplines qui, jusqu'alors, abordaient le langage d'une manière relativement indépendante. Dans cette nouvelle perspective, le but de la linguistique est de caracté-

ser ce que les sujets connaissent à propos de leur langue par le biais de descriptions aussi précises que possible de la structure formelle des différentes composantes de la grammaire (phonologie, syntaxe, morphologie, etc.). La grammaire d'une langue est donc censée refléter le savoir linguistique partagé par les locuteurs de cette langue. La psycholinguistique va rendre compte à son tour de l'acqui-

sition et de l'utilisation effective de ce savoir dans le cadre d'une modélisation de type traitement de l'information. La production, la perception et la compréhension du langage sont envisagées dans ce cadre théorique comme des opérations portant sur des représentations mentales. Autrement dit, les

traitements psycholinguistiques sont conçus comme des processus de transformation conduisant d'une forme de représentation mentale à une autre forme de représentation mentale. Ce type de modélisation est utilisée par la neuropsychologie cognitive afin de rendre compte des troubles de la production et de la compréhension du langage oral ou écrit. Ceux-ci sont interprétés par référence au

dysfonctionnement total ou partiel de différentes composantes du système "normal" de traitement. En retour, les observations issues de la neuropsychologie constituent des données empiriques majeures pour juger de la pertinence des modèles psycholinguistiques ainsi que de celle des caractérisations structurales – souvent différentes, voire antagonistes – avancées par les théories linguistiques.

La perspective cognitiviste du langage que nous venons d'esquisser ci-dessus est complétée par deux volets additionnels correspondant aux apports respectifs des neurosciences et de l'intelligence artificielle.

Les neurosciences s'intéressent, par l'intermédiaire de la biologie du langage, aux structures neuronales impliquées dans l'acquisition et l'utilisation du langage, tandis que l'intelligence artificielle vise à appréhender l'essentiel des aptitudes langagières des humains via la construction de systèmes artificiels susceptibles de simuler différents aspects des performances de perception, de production, ou encore de compréhension.

Cette approche pluridisciplinaire du langage constitue sans aucun doute un programme majeur et fédérateur en sciences cognitives.

Les articles qui composent cette rubrique doivent être envisagés comme des illustrations partielles de ce programme. Ils intègrent les contributions respectives de la linguistique, de la psycholinguistique, de l'intelligence artificielle et de la neuropsychologie à la compréhension de l'objet abordé.

Les trois premiers portent sur la forme sonore du langage et sa perception. Ils montrent la richesse et la complexité de l'organisation phonologique de la langue, ainsi que celle des procédures naturelles ou artificielles mises en œuvre pour le traitement des sons de parole.

La reconnaissance des mots constitue une étape décisive de la compréhension du langage et représente à l'heure actuelle un domaine majeur de la psychologie. L'impact de l'approche connexionniste dans ce domaine est illustré dans l'un des articles de cette section où figurent également deux textes consacrés respectivement à la description morphologique de la structure interne des mots et au rôle que cette organisation joue, en interaction complexe avec d'autres facteurs, dans la lecture.

La compréhension d'une phrase exige, entre autres choses, la mise en relation des informations issues du lexique avec celles provenant de la syntaxe (ordre des mots, catégories syntaxiques, hiérarchie structurale, etc.). La nature et le rôle de ces différentes informations sont explorés dans deux articles de linguistique et de psycholinguistique de la lecture.

Les articles consacrés à la compréhension du langage mettent en évidence la nécessité – et la difficulté – d'utiliser de multiples sources d'information, dont celles strictement linguistiques ne constituent qu'un aspect important mais partiel, et de les intégrer en temps réel. Ce point est traité dans des articles consacrés à la compréhension naturelle et artificielle. Deux textes portant respectivement sur la sémantique et la

pragmatique abordent le problème du sens des expressions linguistiques dans les situations de communication.

Compte tenu de l'extraordinaire complexité du savoir linguistique et de son utilisation, la question de la caractérisation de l'acquisition de ce savoir constitue un défi majeur, aussi bien pour la linguistique que pour la psychologie. Deux articles sur ce thème illustrent la nécessité d'une approche comparative dans ce domaine. Enfin, sur les trois articles se situant dans le champ de la neuropsycholinguistique, le premier, prenant appui sur les méthodes modernes d'imagerie fonctionnelle cérébrale, démontre l'ampleur des répercussions fonctionnelles d'une lésion cérébrale focale et l'organisation en réseaux complexes des structures neuronales impliquées dans les fonctions linguistiques. Les deux autres, profondément enracinés dans le courant cognitiviste actuellement dominant en neuropsychologie, révèlent tout l'intérêt qu'il peut y avoir, pour l'étude de la pathologie du langage, à recourir tout à la fois aux modèles psycholinguistiques qui s'assignent pour objectif de spécifier "l'architecture fonctionnelle" du langage et aux modèles linguistiques qui tentent de caractériser "l'architecture structurale" des langues naturelles en particulier, et du langage en général.

 Juan Segal, directeur de recherche au CNRS.

 Jean-Yves Pollock, professeur à l'Université de Rennes II.

 Jean-Luc Neypoulou, professeur à l'Université de Toulouse Le Mirail.

LA SEGMENTATION DE LA PAROLE

Le signal de parole n'est pas perçu comme une simple suite linéaire d'éléments phonémiques. Des unités de taille importante comme la syllabe apparaissent fondamentales pour structurer la perception du langage parlé.

Emmanuel Dupoux,
Jacques Mehler

Traditionnellement, la parole est représentée comme une suite de sons élémentaires ou phonèmes. Par exemple, le mot *chien* est représenté par une suite de trois phonèmes [ch] [j] [in]. Dans cette optique, percevoir la parole consiste donc à extraire une suite de phonèmes du flot acoustique, puis à rechercher dans un dictionnaire ou lexique les mots qui correspondent à ces suites de phonèmes.

Pourtant la validité d'une telle notion est actuellement remise en cause par des études perceptives utilisant la chronométrie mentale. Ces méthodes consistent à présenter à des sujets un matériel sonore et à mesurer le temps mis pour décider si une cible spécifiée à l'avance est présente ou non.

Une organisation en blocs

Par exemple, on a pu montrer que les sujets sont plus rapides pour détecter la suite "pa" dans le mot *pa-lace* que dans le mot *palmier*. Inversement pour la suite "pal". Ceci suggère que de façon spontanée, les sujets perçoivent la parole comme organisée en blocs ou paquets syllabiques ; ils sont alors plus rapides si la cible correspond à un tel paquet que si elle n'y correspond pas. Un tel résultat a été reproduit dans un grand nombre de langues (espagnol, catalan, hollandais, portugais). Il a été également trouvé chez des adultes illettrés, ce qui indique que la sensibilité aux syllabes est bien présente de façon spontanée et ne résulte pas d'un apprentissage d'un code écrit.

Ces données sont confirmées par des techniques qui emploient la détection d'un seul événement phonémique. Si la parole était réellement perçue phonème par phonème, une telle tâche devrait être relativement aisée. En fait, elle est très difficile pour les enfants ou les adultes illettrés. Même chez les adultes ayant appris un code orthographique, l'exécution de cette tâche donne généralement des temps de réaction plus lents que pour la tâche décrite ci-dessus (détection de plusieurs phonèmes), mais surtout les réponses sont

fortement influencées par les phonèmes adjacents et la structure de la syllabe.

La syllabe, atome de la perception?

Ainsi, détecter /p/ dans [pa] donnera sous certaines conditions des temps plus rapides que /p/ dans [pal] ou [pla], le plus lent étant /p/ dans [plak]. Plus la syllabe est complexe, plus le temps de détection du premier phonème est élevé. De même, la détection de phonème à l'intérieur des mots est facilitée si la cible apparaît de façon prédominante dans une position syllabique fixe ; par exemple à la fin de la première syllabe, comme le /p/ dans *cap-ri*. Les sujets vont accélérer leurs temps de réponse pour toutes les cibles apparaissant dans une position similaire ; ils seront ralentis si on les teste dans une autre position (/p/ dans le mot *caprice*). Encore une fois, la structure syllabique influence fortement l'extraction des phonèmes individuels. Ce type de résultat a été trouvé en français mais aussi dans d'autres langues comme le catalan et l'espagnol.

En bref, la syllabe semble jouer un rôle primordial dans la représentation mentale de l'onde parlée. Est-ce à dire que la syllabe est l'atome de la perception dans toutes les langues ?

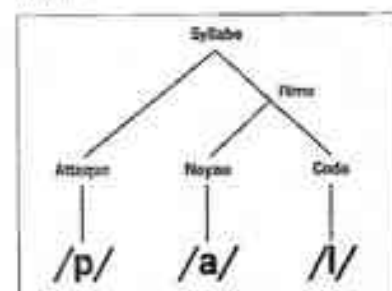
Des unités variables selon les langues

Plusieurs données viennent modérer une telle hypothèse. Tout d'abord l'appellation "atome" n'est probablement pas appropriée ; "molécule" conviendrait mieux. De nombreuses expériences montrent en effet que la syllabe n'est pas insécable et que les sujets peuvent utiliser des informations concernant une fraction de syllabe seulement. Par ailleurs, la syllabe n'est pas une unité universelle. Une même séquence de phonèmes sera syllabifiée différemment en fonction des caractéristiques phonologiques de la langue. De plus, d'autres unités que la syllabe peuvent parfois intervenir. En anglais par exemple, les locuteurs natifs ont du mal à déterminer la frontière entre les syllabes d'un mot comme *balance*. En revanche, ils n'ont aucun mal à compter le nombre de pieds (l'alternance entre une syllabe forte et une syllabe faible). Les locuteurs

SPEECH SEGMENTATION - Contrary to traditional assumptions, recent experiments conducted in French indicate that syllables rather than phonemes constitute the basic units in speech processing. However, the nature of segmentation routines can be language-specific and adapted to the phonological features of each language.

du japonais, quant à eux, ont du mal à comprendre la notion de syllabe. Ils sont nettement plus à l'aise pour compter les "moras" c'est-à-dire des unités légèrement plus petites que les syllabes. Ainsi un mot comme *honda* qui est perçu comme bi-syllabique par des locuteurs français sera perçu comme tri-moraïque par des Japonais (*ho-n-da*). Les résultats expérimentaux obtenus avec les méthodes présentées ci-dessus vont dans le même sens, à savoir que la mora joue un rôle important dans la perception du japonais et que la différence entre syllabe forte et faible est plus importante que la frontière entre syllabes pour les locuteurs anglais.

Il s'ouvre donc tout un domaine, une "phonologie expérimentale", dont le but est de déterminer la nature des représentations mentales des sons de parole en fonction de la langue, leur utilisation dans la perception, et leur acquisition par le jeune enfant.



Représentation de la structure interne de la syllabe "pal".

Emmanuel Dupoux, ingénieur au corps des Télécommunications, enseignant-chercheur à l'École nationale supérieure des télécommunications, chercheur au Laboratoire de science cognitive et psycholinguistique (URA 1198 CNRS).

Jacques Mehler, directeur de recherche au CNRS, directeur du Laboratoire de science cognitive et psycholinguistique (URA 1198 CNRS), Maison des sciences de l'homme, 54, boulevard Raspail, 75270 Paris Cedex 06.

LA RECONNAISSANCE AUTOMATIQUE DE LA PAROLE

Pour que la communication orale homme-machine devienne une réalité, il est indispensable de progresser dans la connaissance des processus cognitifs humains d'interprétation de la parole.

■ Jean-Marie Pierrel,
Noëlle Carbonell

Si l'on veut offrir aux utilisateurs d'un système interactif la possibilité d'utiliser la parole comme moyen de communication homme-machine, il est nécessaire de faire intervenir, lors de l'analyse des énoncés des usagers, les connaissances dont on dispose actuellement sur certaines fonctions humaines : perception et compréhension orale, notamment.

Le recours aux connaissances acquises sur la perception de la parole s'est traduit par une amélioration significative des performances des systèmes de reconnaissance, en permettant la prise en compte des multiples variations du signal de parole.

On observe, en effet, des différences importantes, au niveau acoustique, entre les réalisations d'un même énoncé prononcé par des locuteurs différents (variations inter-locuteurs) ou entre diverses réalisations d'un énoncé produites par un même locuteur, mais à des instants différents (variations intra-locuteur). En outre, la forme acoustique d'un son élémentaire d'une langue (ou phone) varie considérablement avec le contexte immédiat, en raison des phénomènes de coarticulation. La figure illustre les problèmes posés par la variabilité inter-locuteurs.

D'autre part, l'utilisation de connaissances lexicales, syntaxiques et sémantiques permet de corriger certaines erreurs ou imprécisions du décodage acoustico-phonétique (ou interprétation du signal de parole en termes d'unités phonétiques).

Décodage phonétique et perception

Si pendant longtemps on a pu espérer réduire la reconnaissance de la parole à l'identification de formes acoustiques, les difficultés soulevées par la prise en compte de la variabilité inter-locuteurs et par l'interprétation d'énoncés complexes

prononcés naturellement (sans pause après chaque mot) ont conduit à définir des méthodes d'analyse du signal qui s'appuient sur notre connaissance du système auditif humain.

Par exemple, le développement de "modèles d'oreille" (ou cochlées artificielles) fondés sur l'analyse du système auditif périphérique humain, a permis des progrès décisifs en décodage acoustico-phonétique.

Modèles cognitifs d'interprétation phonétique

Parallèlement aux techniques classiques de reconnaissance (programmation dynamique et modèles markoviens, notamment), se sont développées des approches visant à reproduire des fonctions cognitives humaines. Deux d'entre elles présentent un intérêt particulier.

Les modèles neuromimétiques mettent en œuvre des connaissances neurophysiologiques et simulent les fonctions humaines d'identification phonétique à l'aide d'un réseau d'automates cellulaires plus ou moins complexes, neurones formels ou colonnes corticales. Un tel réseau acquiert ses capacités de discrimination phonétique par auto-apprentissage à partir d'un corpus de parole. Cette approche semble très prometteuse actuellement.

Les systèmes experts de reconnaissance de la parole tentent de modéliser l'activité cognitive d'experts phonéticiens, capables d'interpréter en termes d'unités phonétiques une représentation spectrale du signal acoustique correspondant à un énoncé. A noter que les systèmes actuels obtiennent des taux de reconnaissance nettement inférieurs à ceux des experts.

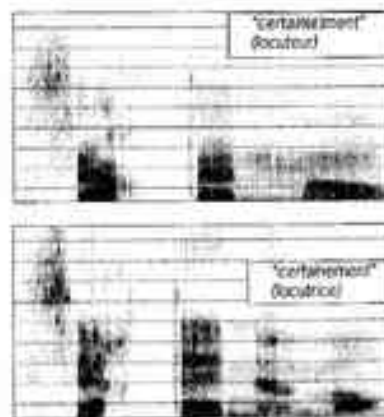
Les interactions entre perception et compréhension

Certaines recherches empiriques, en psycholinguistique comme en neuropsychologie, ont mis en évidence le rôle que pouvaient jouer les connaissances lexi-

AUTOMATIC SPEECH RECOGNITION -
The integration of speech into man-machine interfaces will become possible on condition that knowledge of human speech perception and comprehension be integrated into automatic speech processing systems.

cales, syntaxiques et sémantiques dans la correction des erreurs de perception, que ces erreurs soient dues aux conditions d'écoute (bruit ambiant par exemple) ou à un déficit perceptif (cas de certaines aphasies).

Les performances des systèmes de reconnaissance automatique de la parole se sont nettement améliorées lorsqu'on a implanté dans ces systèmes des interactions analogues à celles que l'on observe, en compréhension orale, entre des processus ascendants d'interprétation phonétique du signal acoustique et des processus descendants d'émission d'hypothèses (ou prédictions), mettant en jeu des connaissances et des informations de nature syntaxique, sémantique et pragmatique.



Un exemple de variabilité inter-locuteurs : la prononciation du mot certainement par deux locuteurs différents.

■ Jean-Marie Pierrel, professeur à l'Université Nancy 1, directeur adjoint du Centre de recherche en informatique de Nancy (URA 262 CNRS).

■ Noëlle Carbonell, professeur à l'Université Nancy 1, co-responsable du réseau Cognisciences Grand-Est, Centre de recherche en informatique de Nancy (URA 262 CNRS), Campus scientifique, BP 239, 54306 Vandœuvre-les-Nancy Cedex.

LA SYNTAXE DE LA STRUCTURE SONORE

La phonologie et la syntaxe ont développé des appareils conceptuels distincts. Toutefois, certains phénomènes suggèrent que la machinerie syntaxique doit pouvoir être intégrée avec profit dans l'analyse phonologique.

Jean Lowenstamm

Toutes les théories fondamentales du langage ont reconnu plusieurs sous-domaines d'investigation (phonologie, syntaxe, sémantique, etc.) au sein desquels on suppose que les problèmes se posent de manière spécifique. Ainsi on sait qu'en syntaxe, un élément déplacé, par exemple à l'occasion de la formation d'une question, peut devoir être mis en rapport avec une position indéfiniment distante de lui ("Qui Pierre croit-il que Jacques pense que [Marie prétend que...] Jean a tué X"). En revanche, le domaine des opérations phonologiques qui spécifient des modifications de la forme sonore d'une unité est généralement définissable en termes d'objets de longueur finie : le mot, le mot composé, etc. En conséquence, la syntaxe et la phonologie ont développé, de façon indépendante, des appareils conceptuel et notational distincts.

Imaginons, cependant, que le véritable problème posé par une phrase du type ci-dessus n'est pas le caractère indéfini de la distance qui peut séparer Qui de la position co-indexée X, mais bien le déplacement lui-même d'un objet direct d'une marge à l'autre d'un domaine. Il existe, en effet, une définition possible de la position "normale" d'un complément d'objet direct, disons "à droite du verbe", pour le français. Comment se fait-il qu'un complément d'objet direct puisse apparaître dans une position autre que sa position "normale" ? De ce point de vue, la tâche d'une syntaxe peut être définie comme la construction d'une théorie des paradoxes de position. Le succès d'une

telle théorie s'évaluera en fonction de l'ensemble des paradoxes qu'elle parvient à réduire : ce dernier doit correspondre exactement à l'ensemble des phrases grammaticales. Une telle définition est indépendante de toute mention d'un domaine grammatical particulier comme la phrase ou le mot.

Construire une syntaxe des expressions phonologiques

La question doit alors se poser de savoir si de tels paradoxes de position peuvent être identifiés au sein d'objets grammaticaux de longueur typiquement finie comme le morphème, le mot ou le mot composé. Si tel est le cas, il est possible qu'une partie du programme de recherche de la phonologie doive être conçue comme la construction d'une syntaxe des expressions phonologiques.

La réponse est positive. Considérons le cas des formes régulières suivantes de l'arabe classique, dérivées de la racine trilitère de type $C_1C_2C_3$, $\sqrt{ktb}$: $katab+u$ "il a écrit", $ya+ktub+u$ "il écrit". Alors qu'à l'accompli (action terminée) chaque consonne radicale est suivie d'une voyelle, l'inaccompli (action en cours d'accomplissement) se caractérise par l'absence d'une voyelle après C_1 , $ya+ktub+u$. Considérons, à présent, les formes équivalentes dérivées d'une racine de type $C_1C_2C_3$, $\sqrt{rdd}$: $radd+u$ "il a renvoyé", $ya+rudd+u$ "il renvoie". Cette fois, l'identité des deux dernières consonnes radicales interdit la présence d'une voyelle intermédiaire : $radd+u$ et non pas $radada$ comme on s'y attendait, et surtout, à l'imperfectif $ya+rudud+u$, et non pas $ya+rudud+u$, comme on aurait pu

SYNTAX OF SOUND STRUCTURE - Phonology and syntax are usually construed as requiring their own specific conceptual apparatus. However, certain phenomena suggest that syntactic machinery can be usefully incorporated into phonological analysis. The import of one such phenomenon "Classical Arabic Metathesis" is discussed.

s'y attendre au vu de $ya+ktub+u$. $ya+rudud+u$ est donc doublement "paradoxal" de par l'absence d'une voyelle après C_2 , et de par la présence après C_1 de la voyelle qu'on s'attendait à trouver après C_2 .

Afin d'avoir une idée plus complète des ingrédients de ce paradoxe, comparons $ya+ktub+u$ "elles écrivent" avec la forme correspondante issue de la racine $\sqrt{rld}$, $ya+rdud+u$. Lorsque le suffixe commence en une consonne, les deux formes ont la même allure. Il est donc possible d'identifier le facteur responsable des aspects déviants de $ya+rudd+u$: la présence d'une voyelle, à la marge de droite de la représentation, le $+u$ suffixal dans le cas discuté, ici. Ainsi une configuration marginale particulière est responsable d'une série de paradoxes positionnels, observables jusqu'à l'autre marge de la représentation. Les exemples de ce type d'effets peuvent être multipliés. Ils suggèrent fortement que la structure sonore, tout comme celle du syntagme, est parcourue d'un réseau de solidarités latérales. L'appareil conceptuel de la "syntaxe de phrase" est-il d'une utilité quelconque pour la réduction des paradoxes de position phonologiques ? La question est de nature empirique : le succès d'un tel programme de recherche se mesurera à ses résultats. Il ne saurait faire l'objet d'une objection de principe.

Jean Lowenstamm, professeur à l'université Paris VII, Département de Linguistique, 2, place Jussieu, 75005 Paris.

POINT DE VUE LINGUISTIQUE SUR LES MOTS CONSTRUITS

Une grammaire des mots construits doit contenir toutes les informations nécessaires à la production et la compréhension de ces mots.

Danielle Corbin

Un mot construit lexicalement se différencie d'un mot non construit en ce que sa forme et

son sens sont prédictibles l'un(e) à partir de l'autre. Si l'on veut donner un nom au commerce des crayons, la langue française offre le moyen de construire *crayonnerie* : le fait que ce mot ne fasse

pas partie du lexique mémorisé par un locuteur francophone (il n'est attesté dans aucun dictionnaire français contemporain) montre que la possibilité de le construire et de l'interpréter ressortit à des règles de construction de mots (RCM), c'est-à-dire à une grammaire des mots construits, que le linguiste se donne pour tâche de formaliser.

Dans cette grammaire doivent être enregistrées les réponses aux quatre questions exposées maintenant.

La construction des mots

De quelle façon une langue construit-elle lexicalement des mots ? Il existe en français quatre types différents de structures de mots construits par des RCM :

- les mots construits par suffixation (ajout d'un opérateur de construction de mot à droite de la base, par ex. *arrêter*_N, *ludique*_A);
- les mots construits par préfixation (ajout d'un opérateur de construction de mot à gauche de la base, par ex. *pré-salarié*_N, *anti-grippe*_N, *an-onyme*_A);
- les mots construits par conversion (changement de catégorie lexicale et de sens sans ajout de matériel morphologique, par ex. *rose*_N → *rose*_A, *vide*_A → *vid(er)*_N);
- les mots construits par composition (combinaison de deux unités lexicales susceptibles d'autonomie sémantique, par ex. *vide-poche*_N, *chou-fleur*_N, *anthropophage*_A).

À chacune de ces structures de mots correspondent des RCM, définies par leur capacité à construire une structure et un sens générique associés : environ 25 règles de suffixation regroupant quelque 150 suffixes différents, une quarantaine de règles de préfixation utilisant quelque 120 préfixes, une dizaine de règles de conversion, une dizaine de règles de composition.

Les propriétés des procédés de construction

Quelles propriétés sont associées à chacun des procédés de construction de mots ? À l'intérieur d'une même RCM, les opérateurs de construction de mots ont des propriétés spécifiques. Par exemple, les suffixes *-ier* et *-eur* sont tous deux associés à la RCM qui construit sur des bases nominales des adjectifs introduisant une relation entre ce que désigne la base et ce que désigne le nom avec lequel l'adjectif est susceptible de se combiner dans une phrase (nom recteur). Le suffixe *-ier* détermine des relations de type fonctionnel, utilitaire, le suffixe *-eur* exprime que ce que désigne la base est produit naturellement et perçu comme occupant l'espace délimité par ce que désigne le nom recteur. C'est pourquoi, à partir d'une même forme *bouton*, *-ier* sélectionne le sens "objet utilitaire servant à la décoration ou à la fermeture des vêtements", et *-eur* le sens "extroissance apparaissant sur la peau" : l'adjectif *boutonnier* s'emploie avec des noms comme *industrie*, *ouvrier*, et sert à délimiter une sous-classe à l'intérieur de la classe désignée par le nom recteur, et *bouton-*

neur avec des noms comme *enfant*, *peau*, et sert à qualifier la catégorie désignée. Ces différences sémantiques ont des conséquences syntaxiques, par exemple le fait que l'adjectif *boutonnier* est graduable et peut être employé comme prédicat, au contraire de *boutonnier* (*une peau très boutonnière*, *cette peau est boutonnière* vs **une industrie très boutonnière*, **cette industrie est boutonnière*).

En plus des propriétés sémantiques spécifiques dont sont dotés les opérateurs de construction de mots, leur combinaison avec des bases est régie par des contraintes diverses : contraintes phonologiques (par exemple, le suffixe *-if* demande une dentale finale : sur *arbruste* est construit *arbrustif*, mais on ne peut pas construire **arb(o)rif* sur *arbre*); contraintes morphologiques (parmi les verbes terminés par *-is(er)*, le suffixe *-ation* ne peut s'appliquer qu'à ceux dans lesquels *-is(er)* représente un suffixe, et non une finale sans statut de morphème : *conjugualisation* vs **brisation*); contraintes étymologiques (parmi les suffixes formateurs de noms désignant un ensemble d'entités nombrables, *-ain* ne peut s'appliquer qu'à des bases françaises, *-ade* qu'à des bases empruntées au grec : *quatorzain* vs **quatorzade*, *tétrade* vs **tétrain*); contraintes de disponibilité (pour construire un nom abstrait sur l'adjectif *rubicond*, on peut avoir recours aux suffixes *-erie* et *-ité* (*rubiconderie*, *rubicondité*), mais pas, par exemple, à *-eur* (*blancheur* vs **rubicondeur*)); etc.

Les distorsions entre formes prédictible et apparente...

Quelles sont les distorsions autorisées entre la forme prédictible d'un mot construit et sa forme apparente ? Pour des raisons diverses, la forme apparente d'un mot construit ne coïncide pas toujours avec la forme attendue à partir de la combinaison de ses constituants. Ainsi, l'ajout du suffixe *-if* au nom *intuition* a produit la forme *intuitif* et non **intuition-nif*. Dans certaines conditions, deux segments semblables de part et d'autre d'une frontière morphologique se réduisent à un seul, ce qui rend l'analyse morphématique du mot impossible à pratiquer sur la forme apparente : de même que la science des minéraux s'appelle *minéralogie* (et non **minéral-o-logie*), la science spécialisée dans l'étude des symboles s'appelle *symbolologie* (et non **symbol-o-logie*). Seules les distorsions formelles régies par des principes réguliers, qu'il incombe au linguiste de mettre au jour de façon explicite, peuvent figurer dans la grammaire des mots construits.

... et entre sens prédictible et lexicalisé

Quelles sont les distorsions autorisées entre le sens prédictible d'un mot

LINGUISTIC ASPECTS OF WORD PRODUCTION - The task of the linguist is to write a formalized grammar of constructed words containing information about the various processes whereby words are constructed (suffixation, prefixation, composition and conversion) as well as their properties (specifically of a semantic character), about constraints on their application, and about the formal changes and semantic derivations that go with these processes.

construit et son sens lexicalisé ? Le sens lexicalisé des mots construits résulte de l'action conjuguée de facteurs hétérogènes : le rôle de constructeurs de sens joué par les RCM et les opérateurs de construction de mots ; le rôle joué par les règles sémantiques qui régissent la polysémie ; l'interface entre les possibilités linguistiques qu'offre le lexique d'une langue et la volonté ou nécessité de construire un mot associé à une représentation conceptuelle. Par exemple, le fait que *lunette* puisse servir à dénommer, entre autres, la vitre arrière d'une automobile peut être expliqué par la combinaison des facteurs suivants (dont la description est ici simplifiée) : 1°) la focalisation initiale sur des propriétés de la Lune vue par les humains (notamment le fait qu'elle soit vue comme ronde, et comme découpée dans le ciel), aboutissant à la possibilité de dénommer métaphoriquement *lune* des objets variés de forme ronde constituant des ouvertures ; 2°) le travail sémantique effectué par le suffixe *-ette*, qui sert à construire, à partir de la classe désignée par le nom de base, une sous-classe caractérisée comme petite : peuvent alors être dénommés *lunette* des objets variés constituant des ouvertures de forme ronde et dont la taille est évaluée comme petite ; 3°) la propriété physique des voitures d'avoir des vitres arrière, rondes à l'origine, et donc dénommables *lunette* ; 4°) la possibilité qu'offre la langue de conserver leur dénomination originelle à des objets différents fonctionnellement identiques : on continue donc de dénommer *lunette* une classe d'objets qui ne sont plus ronds. La dérivation de *lunette* par rapport au sens issu de la combinaison de celui de ses constituants ("petite lune") est donc explicable par des mécanismes devant figurer dans une grammaire du lexique.

■ Danielle Carblin, professeur à l'Université de Lille III, directeur du Laboratoire syntaxe, interprétation, lexique (URA 382 CNRS), Université de Lille III, Domaine universitaire littéraire et juridique, BP 149, 59653 Villeneuve d'Ascq Cedex.

LA MODÉLISATION DE L'IDENTIFICATION DES MOTS ÉCRITS

Présentation d'un modèle connexionniste de l'identification des mots écrits, capable de simuler des résultats expérimentaux récents.

Jonathan Grainger,
Arthur M. Jacobs

Reconnaître un mot pendant la lecture implique une mise en correspondance entre la forme physique (visuelle) de ce mot imprimé sur la page et une représentation abstraite de cette forme en mémoire à long terme. Pour ce faire, le système perceptif humain dégage dans un premier temps un certain nombre d'informations élémentaires qui vont servir à alimenter les algorithmes du traitement cognitif. Ce sont ces algorithmes de traitement et les représentations mentales impliquées dans l'identification des mots écrits que la psychologie cognitive cherche à décrire.

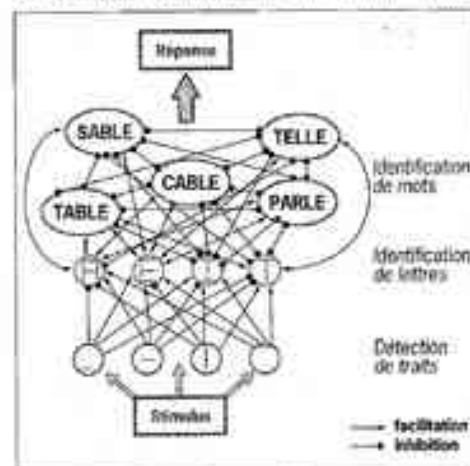
Deux perspectives principales sous-tendent les descriptions proposées par les psychologues. La nature même de ces perspectives illustre les relations qu'entretiennent la psychologie cognitive avec l'intelligence artificielle d'un côté, et la neurobiologie de l'autre. La métaphore générale qui met en rapport le fonctionnement cognitif et celui d'un ordinateur sériel, métaphore qui représente un des éléments fondateurs de la psychologie cognitive, sert de base pour les modèles de type "recherche séquentielle". La métaphore qui met en rapport le fonctionnement cognitif et son support neuronal, métaphore qui a eu un essor plus récent avec le développement du connexionnisme, est à la base des modèles de type "activation interactive". Un certain nombre de résultats expérimentaux récents nous permettent de penser que ce dernier type de modèle semble le mieux adapté pour rendre compte des effets observés en expérimentation.

L'interaction entre mémoire et perception

Le flux d'information dans un modèle d'activation interactive pour l'identification des mots est continu et bi-directionnel : l'activation (des valeurs entre 0 et 1) au niveau des détecteurs de traits, produite par un stimulus visuel, est continuellement transmise à l'alphabet mental qui la

transmet, à son tour, au lexique mental. Ce dernier renvoie de l'activation au niveau de l'alphabet mental. C'est cette combinaison entre activation ascendante et descendante au niveau de l'alphabet mental qui représente, dans le modèle, l'interaction entre les processus mnésiques (en l'occurrence les connaissances lexicales stockées dans la mémoire à long terme) et les processus perceptifs (voir figure).

Le modèle ainsi décrit rend compte d'un ensemble de phénomènes de base observés en expérimentation et notamment, grâce à son interactivité, il explique la meilleure reconnaissance de lettres



MODELLING VISUAL WORD RECOGNITION
- An interactive activation model of visual word recognition is described. It successfully accounts for a number of phenomena reported in experimental literature. The densely interconnected structure of the model means it can capture the subtle influences of orthographic similarity on visual word recognition performance in human subjects.

Le succès initial de ce type de modèle nous amène à réfléchir sur son développement et sur son application à d'autres domaines de recherche (modélisation expérimentale de la dyslexie visuelle et attentionnelle; simulation des effets de médicaments amnésiques sur la reconnaissance et la mémorisation de mots).

D'après le modèle d'activation interactive le plus simple, le processus de reconnaissance d'un mot implique trois étapes de traitement d'information qui opèrent entièrement et parallèlement, et dont chacune concerne un certain nombre de neurones formels : 1) la détection des traits visuels distinctifs (signes horizontaux, verticaux et diagonaux); 2) l'identification des lettres par une structure dite alphabet mental; 3) l'identification des mots par le lexique mental. Tous ces neurones communiquent entre eux à travers des connexions qui peuvent être facilitatrices ou inhibitrices. Le graphique ne montre qu'une petite partie du réseau neuronal original avec quelques voisins du neurone symbolisant le mot "table". (D'après McClelland et Rumelhart, 1981; et Jacobs et Grainger, 1992).

lorsque celles-ci sont placées dans le contexte d'un mot (effet de supériorité du mot). Par ailleurs, grâce à sa structure hautement interconnectée, le modèle est capable de simuler des effets très subtils de l'influence de la similarité orthographique sur les temps d'identification des mots, résultats qui sont moins facilement expliqués par d'autres types de modèles. Nous avons observé que les temps d'identification d'un mot sont influencés par la nature des mots qui lui sont proches orthographiquement (son voisinage orthographique). Dans le cadre d'un modèle d'activation interactive, ce sont ces voisins orthographiques qui seront les plus fortement activés pendant le traitement du mot-stimulus et donc qui seront les plus susceptibles d'influencer ce traitement.

Nous savons, par exemple, que le traitement prélexical d'un mot écrit implique non seulement des informations orthographiques, mais également des informations de nature phonologique. L'implémentation dans le modèle d'unités correspondant aux sons élémentaires de la langue pourrait être un moyen d'interpréter ces effets phonologiques.

Jonathan Grainger, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de psychologie expérimentale (URA 316 CNRS), Université René Descartes, Centre Henri Poincaré, 28, rue Serpente, 75006 Paris.

Arthur M. Jacobs, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de neurosciences cognitives (UPR 9012 CNRS), 31, chemin Joseph Aiguier, 13402 Marseille Cedex 9.

LANGAGE ET LECTURE

Des aspects importants du processus de reconnaissance des mots lors de la lecture sont déterminés par les propriétés structurales du lexique et du langage.

□ Cécile Beauvillain

La compréhension du langage lors de la lecture n'est possible que parce que le lecteur intègre les informations visuelles issues des capteurs sensoriels pour construire une représentation du stimulus compatible avec les représentations abstraites du lexique mental.

Le problème abordé dans les recherches sur la lecture dépasse le seul cadre de la vision et de l'oculo-motricité puisqu'il conditionne les traitements syntaxiques et interprétatifs mis en œuvre dans la compréhension du langage.

Deux exemples illustreront les observations à partir desquelles une théorie de la perception et de la compréhension du langage lors de la lecture ne peut être élaborée qu'en prenant en compte l'organisation interne du stimulus linguistique.

Accéder à la représentation lexicale

Il est maintenant établi que pour appréhender un stimulus à une représentation mentale du lexique, le lecteur n'utilise pas les informations de façon continue. Le mot est structuré en unités discrètes récupérées par le système de traitement avant l'accès à une représentation lexicale. Ainsi, nous avons montré que la racine des mots morphologiquement complexes est une unité pertinente de structuration perceptive dans le mot (ex : mortel). Ceci signifie que l'intégration de l'information linguistique s'effectue de façon discontinue à partir d'unités de segmentation de nature morphémique.

Toutefois, l'organisation linéaire des éléments morphémiques en : racine + suffixe et : préfixe + racine détermine le mode d'exploitation de cette information morphologique. Située en début des mots suffixés, la racine affecte très précocement les procédures d'accès aux représentations lexicales en déterminant un accès préalable à un ensemble de candidats correspondant à la famille morphologique. Il y a ensuite sélection de la forme lexicale correspondant à la forme globale du mot sur un appariement gauche-droite de l'information. Pour les mots préfixés, la racine située en fin de mot retarde le processus de reconnaissance.

L'existence d'une telle directionnalité gauche-droite n'est pas observée dans le traitement de mots simples bisyllabiques de même longueur (cinq ou six lettres).

Cette directionnalité gauche-droite est donc attribuable à la présence d'unités de segmentation de nature morphémique et à l'organisation de représentations lexicales qui imposent un coût dans le traitement à tout stimulus qui contacte le lexique par la fin du mot.

Cette façon de poser le problème de la compréhension du langage dans la lecture conduit à formuler des hypothèses claires et testables sur le rôle fonctionnel joué par les différents indices linguistiques de nature orthographique ou morphémique caractérisant la structure interne des mots.

Représentation du langage et exploration oculaire

Une autre façon d'aborder ce problème de la représentation du langage est de chercher quelles sont les règles qui sous-tendent le contrôle du mouvement des yeux pendant la lecture.

L'étude du mouvement des yeux lors de la lecture permet d'élucider et de tester des hypothèses précises sur le traitement en temps réel de l'information linguistique dans le mot en relation avec les paramètres oculo-moteurs relatifs à l'amplitude des saccades et à la durée des fixations. On sait maintenant que, durant la

lecture, l'information linguistique présente en vision parafovéale est exploitée par les mécanismes responsables du guidage du mouvement des yeux. L'intégration de cette information dans le système visuel définit le centre de gravité de la configuration qui correspond au point de visée de l'œil dans le mot. Si le calcul est préalablement déterminé par les paramètres physiques de la configuration (longueur, taille, intensité lumineuse des lettres), le système accorde plus de poids aux éléments plus proches de la fovéa qui seraient en quelque sorte "sur-représentés" au niveau cortical. Une expérience récente a montré que l'information lexicale délivrée par les premières lettres du mot parafovéal était intégrée par le système responsable du calcul des coordonnées du point de visée de l'œil dans le mot.

Lorsque le mot est placé en vision fovéale, l'exploration oculaire dans le mot peut se trouver également modifiée par la construction de la représentation lexicale. Ainsi, la durée totale de l'exploration oculaire dans le mot est affectée par l'information lexicale initialement traitée. La probabilité d'effectuer une seconde fixation dans le mot dépend de l'importance de l'information lexicale délivrée par le début du mot. Un contrôle s'exerce donc depuis les centres qui construisent la représentation lexicale sur ceux qui commandent la position de la saccade. Ce contrôle quasi simultané modifie le calcul du point de visée de la saccade effectué au préalable sur des paramètres physiques tels que la longueur du mot.

PERCEPTION AND REPRESENTATION OF LANGUAGE IN READING - The importance of the structure of words and language in reading is demonstrated. Examples show that the pattern of eye movements in reading is a lexically mediated process.

□ Cécile Beauvillain, chargée de recherche au CNRS, Laboratoire de psychologie expérimentale (URA 316 CNRS), Université Paris V, Centre Henri Poincaré, 28, rue Serpente, 75006 Paris.



REGARD ET LECTURE

Les mouvements des yeux donnent des renseignements sur la manière dont un lecteur reconnaît les mots et comprend les phrases lorsqu'il lit.

Kevin O'Regan
Joël Pynte

La rétine n'échantillonne pas le champ visuel de manière homogène : au centre du champ la densité des photorécepteurs est élevée, mais cette densité chute désastreusement de part et d'autre du centre.

Position optimale de regard dans les mots

A cause de cette non-homogénéité et pour qu'un mot bénéficie d'un taux d'échantillonnage maximal, l'œil est obligé de se poser près du milieu du mot.

Effectivement, en couplant un dispositif simple de mesure des mouvements oculaires (voir figure) avec un ordinateur qui commande l'affichage sur un écran, on peut faire apparaître un mot à différentes positions sous le regard d'un observateur, mais faire disparaître le mot dès l'instant que l'observateur tente de bouger les yeux pour quitter la position initialement fixée. On observe que, dans ces circonstances, les mots, même courts, ne sont pas toujours reconnaissables. Il y a une "position optimale de regard", proche du centre, où la probabilité de reconnaître le mot est au maximum. De part et d'autre de cette position, la probabilité de reconnaître le mot chute fortement. On observe un phénomène analogue quand les yeux sont libres de bouger : si le lecteur ne pose pas son regard sur la position optimale d'un mot, alors la probabilité est grande qu'il fera d'autres fixations dans le mot. Le temps total nécessaire pour reconnaître un mot augmente également quand le regard fixe ailleurs que la position optimale.

Mais ce qui rend particulièrement intéressant le phénomène de "position optimale" est le fait qu'il ne dépend pas uniquement de l'acuité : la reconnaissance des mots de haute fréquence d'apparition dans la langue est meilleure que celle des mots de basse fréquence. D'autre part, pour les mots longs, la position optimale n'est plus au centre du mot, mais décalée vers la gauche. Ces faits ne peuvent pas s'expliquer purement en termes d'acuité, et doivent refléter des particularités des processus cognitifs de reconnaissance. En particulier ils suggèrent que les mots de haute fréquence sont plus facilement activables que les mots de basse fréquence. D'autre part ils montrent que, tandis que

pour les mots courts l'analyse du mot semble se faire en parallèle, pour les mots longs une procédure sérielle de décodage gauche-droite serait mise en œuvre. Ceci expliquerait le décalage à gauche de la position optimale pour les mots longs.

Les contraintes du lexique sont un autre facteur qui semble influencer le phénomène de position optimale : un mot dont l'information critique pour l'identification se trouve à son début va avoir sa position optimale plutôt au début, tandis qu'un mot qui a son information à la fin aura sa position optimale décalée vers la fin. La structure morphologique d'un mot est un autre facteur qui influence la manière dont il sera identifié, et des travaux sont en cours qui utilisent le phénomène de position optimale pour déterminer si oui ou non le système de reconnaissance accède au sens d'un mot en le décomposant d'abord en ses morphèmes de base.

Stratégies d'exploration dans la lecture

Qu'en est-il de la lecture continue ? On s'attendrait à une perte de temps notable si l'œil ne parvient pas à fixer systématiquement la position optimale dans les mots à chaque fois qu'il se déplace. Malheu-



Monture de lunettes utilisée pour enregistrer les mouvements oculaires lors de la lecture. Elle est munie d'une source éclairante et de deux capteurs photosensibles que l'on peut positionner face à l'un des yeux du sujet.

reusement, la position optimale varie selon les mots, et le lecteur ne sait pas à l'avance où elle va se trouver. D'où l'idée selon laquelle le lecteur pourrait opter pour une stratégie globale consistant à viser chaque fois le milieu du mot suivant, quitte à utiliser une tactique d'ajustement au cas où l'œil arriverait au mauvais endroit. Des recherches menées actuellement tentent de distinguer cette idée de

Eye motion and reading - Eye behaviour during reading is a most valuable tool to understand how the brain analyses written language.

théories concurrentes qui supposent que le regard est commandé d'instant en instant par les processus d'analyse linguistique en cours.

Il est toutefois un aspect de l'exploration oculaire clairement lié aux caractéristiques linguistiques du texte lu. Il s'agit des saccades régressives. Ces mouvements, qui ramènent les yeux sur des mots déjà inspectés, sont d'un intérêt tout particulier dans la mesure où ils pourraient témoigner d'un échec des activités mentales menées sur un syntagme ou une phrase. Nous avons ainsi pu montrer que le contexte sémantique et pragmatique semble intervenir après qu'un analyseur syntaxique hypothétique ait permis d'envisager différentes structures possibles pour l'énoncé. Considérons par exemple les phrases suivantes :

- (a) Le diplomate reconduit à la frontière un espion international.
- (b) Le diplomate reconduit à la frontière est un espion international.
- (c) Le diplomate raccompagne à la frontière un espion international.
- (d) Le diplomate raccompagné à la frontière est un espion international.

Une saccade régressive ramenant le regard sur le verbe sera typiquement observée en (b) dès la levée de l'ambiguïté. Ceci s'explique par la nécessité de construire un syntagme nominal sujet complexe incluant le premier verbe lorsque le regard arrive sur "est". A noter que la phrase (d) présente la même difficulté que (b), à la différence qu'en (d) l'ambiguïté est levée immédiatement (présence d'un accent sur le "e" final de "raccompagné"). On observe, dans ce cas, une régression à l'intérieur du verbe, ce qui suggère que certains choix syntaxiques sont opérés avant que le regard ait quitté le verbe. Ce type d'études alimente un débat actuel concernant le caractère plus ou moins modulaire du système cognitif responsable de la compréhension du langage.

Kevin O'Regan, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de psychologie expérimentale (URA 316 CNRS), groupe "Regard", Université Paris V, 28, rue Serpente, 75006 Paris.

Joël Pynte, directeur de recherche au CNRS, Centre de recherche en psychologie cognitive (URA 382 CNRS), 29, avenue Robert Schuman, 13621 Aix-en-Provence.

L'ORGANISATION SYNTAXIQUE DE LA PHRASE

Au-delà des variations manifestées par l'évolution des théories linguistiques, un certain nombre de facteurs essentiels sous-tendent la diversité des principes et des règles qui fondent une grammaire de la langue.

■ Andrée Borillo

Linéarité et hiérarchie, ce double facteur d'organisation apparaît dès la première étape de l'analyse de la phrase, lors de l'établissement des catégories syntaxiques. Chacune des entités dégagées est affectée simultanément d'une identité catégorielle - définie sur la base de sa distribution et de sa composition - et d'un rang qui fixe sa place dans la hiérarchie des niveaux, assurant l'intégration des constituants jusqu'à la limite supérieure, la phrase. Ainsi *maison* et *la maison aux volets bleus*, respectivement Nom (N) et Groupe Nominal (GN), unis par des relations d'inclusion et d'enchaînement, forment deux catégories de rang différent.

Mais l'identification de ces catégories linéairement et hiérarchiquement organisées ne suffit pas à définir leur rôle syntaxique. Celui-ci repose sur les relations de dépendance structurale que ces catégories entretiennent entre elles, relations qui s'expriment en termes de positions. Même si celles-ci ont une réalisation spatiale - la position d'objet direct apparaît en français à droite de la catégorie Verbe (V) - les relations qui fixent les positions sont essentiellement de type hiérarchique et s'expriment en termes de domination : la catégorie dominante crée un domaine pour les catégories qui dépendent d'elle. Il ne faut donc pas confondre position et place. Dans : *Il a fait boire du vin à Paul* et *Il a fait livrer du vin à Paul*, à *Paul* occupe la même place dans la séquence mais pas la même position. Le GN dépend de *faire* dans le 1^{er} cas, de *livrer* dans le second.

Données observables et théorisation

Alors que la place des termes est directement perceptible, l'organisation syntaxique de la phrase ne peut s'établir sur les seules combinaisons observables des

catégories attestées. S'il existe une position remplie par le complément d'objet direct, définie à partir du verbe, ce complément peut apparaître, non pas dans la position attendue mais, par exemple, dans une position à fonction non spécifique (ex. complémentateur) ou dans la position généralement réservée à la fonction de sujet : *Je supporte mal ce climat*, *Ce climat que je supporte mal*, *Ce climat est dur à supporter*.

Il faut donc un dispositif capable de relier deux types différents de structures : celle définie par les configurations que doivent assurer normalement les catégories concernées, et celle dont la représentation nous est suggérée par les données observables (celle-ci pouvant être très substantiellement différente de celle-là et sur des points difficilement explicables). Ce dispositif doit mettre en œuvre deux appareils de production syntaxique : l'un élaborant une structure de base conçue comme une représentation configurationnelle de positions, l'autre mettant en œuvre des systèmes de règles contraintes et contrôlées capables de produire une structure de surface dont les données observables s'interprètent et s'expliquent à la lumière même des opérations proposées.

Homogénéité et hétérogénéité

La thèse structuraliste, fondée sur l'articulation des deux relations de distribution et d'intégration, a contribué à donner de la structure syntaxique de la phrase l'image d'une organisation en niveaux stratifiés, chacun pouvant être projeté sur le suivant.

L'idée d'un principe unitaire régissant l'ensemble de l'organisation syntaxique de la phrase est maintenant largement abandonnée. Une première forme d'hétérogénéité est apparue précisément avec l'introduction du modèle transformationnel proposant pour la grammaire un double dispositif dans lequel sont mis en œuvre des systèmes différents fonctionnant comme des composantes distinctes et bien séparées. A l'heure actuelle, même si les théories se sont profondément modifiées, ce point reste essentiel dans la conception des divers principes qui sont proposés et des procédures réglées qui en sont la traduction. La bonne formation des représentations

syntactiques est assurée par la mise en place et le fonctionnement de composantes autonomes, possédant leurs règles et leurs mécanismes propres. On raisonne en termes de modules, chacun fonctionnant comme un système cohérent autour d'un principe, mais aucun ne pouvant traiter jusqu'au bout et résoudre une classe donnée de phénomènes.

Syntaxe et lexique

La combinaison des unités lexicales dans la phrase s'opère essentiellement à partir de structures argumentales prédéfinies dans le lexique (une catégorie majeure - verbe, nom, préposition, adjectif - «électionne un ou plusieurs arguments par rapport auxquels elle fonctionne comme un opérateur»). Les dépendances sémantiques créées par ces structures argumentales ne manquent pas d'avoir un effet direct sur la réalisation syntaxique de la phrase, surtout si l'on suppose qu'une correspondance terme à terme existe entre positions définies dans la structure et rôles thématiques attribués aux arguments dans le lexique.

Il n'en reste pas moins que certains aspects syntaxiques de la phrase peuvent difficilement dépendre des propriétés lexicales des unités particulières qui y sont introduites. Ainsi, le caractère obligatoire de certaines positions - celle de sujet en français - conduit à une représentation structurale qui ne reflète pas directement les relations de dépendance lexicale et thématique caractéristiques de telle ou telle structure argumentale. Par exemple, un verbe de mouvement dit «ergatif» (*arriver, passer, venir...*), défini comme n'ayant qu'un argument réalisé dans la position objet du groupe verbal, trouve néanmoins sa place dans une phrase dont la position de sujet doit être remplie : *Il est arrivé de nombreuses lettres*, *De nombreuses lettres sont arrivées*. Dans le deuxième cas, l'élément correspondant à la position objet occupe effectivement la position sujet, tout en gardant son rôle thématique attribué par le lexique.

La nature de cette articulation entre positions syntaxiques des catégories et structure argumentale et thématique des éléments lexicaux pose concrètement le problème de la relation entre syntaxe et lexique et d'une certaine façon, met en question leur autonomie respective.

■ Andrée Borillo, professeur à l'Université Toulouse-Le Mirail, responsable de l'Equipe de recherches en syntaxe et sémantique (URA 1033 CNRS), S. Alides Antonio Machado, 31058 Toulouse.

LA COMPRÉHENSION DU LANGAGE

Les recherches en sciences cognitives permettent de cerner progressivement les équivalences et les différences entre compréhension humaine et traitement du langage par ordinateur.

Jean-François Le Ny

Les sciences cognitives permettent d'aborder dans un même cadre général la compréhension du langage chez l'homme et son traitement par ordinateur, en faisant naturellement abstraction de plusieurs propriétés de la compréhension qui n'appartiennent qu'à l'esprit humain. Dans ce schéma commun, le message est d'abord perçu ou saisi (c'est la phase de "reconnaissance de la parole"), puis un certain nombre de traitements, c'est-à-dire de transformations, soit mentales soit informatiques, sont appliquées pour conduire à une structure finale, la représentation sémantique. Le critère de ressemblance est alors que celle-ci puisse ensuite être "utilisée cognitivement" pour diverses tâches intelligentes, dialogue, raisonnement, résumé, résolution de problèmes, action sur le monde, etc. Dans cette optique, la comparaison détaillée entre compréhension humaine et traitement par ordinateur est extrêmement éclairante. L'une et l'autre consistent en fait à analyser l'information d'entrée, et à lui "incorporer", de façon pertinente, une quantité très considérable d'informations antérieurement stockées en mémoire à long terme. On peut dire, par métaphore, que chacun de nous a dans sa tête une grammaire implicite et un vaste dictionnaire, et même une encyclopédie, faute de quoi la compréhension est impossible ou défaillante.

Mesurer des temps de réponse

La psychologie cognitive a pour objectif propre, ici aussi, de découvrir le détail des processus et des structures qui sont impliqués dans ces activités mentales. Elle dispose pour cela d'une palette de techniques indirectes qui permettent, à partir de l'observation de données externes de comportement, recueillies dans des situations expérimentales bien planifiées, d'inférer ce qui se passe de façon interne dans l'activité cognitive, c'est-à-dire cérébrale.

Parmi les plus riches se trouvent les mesures de temps de réponse appliquées à des tâches cognitives. Soit un sujet qui lit une phrase sur un écran ; quelques instants plus tard lui apparaît un mot, dit "mot-sonde", en rapport ou non avec la phrase.

La tâche est d'appuyer sur un bouton, "oui" ou "non", pour indiquer si ce rapport existe. Par exemple : Après avoir roulé avec facilité durant la précédente journée, le maillot jaune s'est effondré dès le milieu du second col, suivi de : défaillance. Des items négatifs sont mélangés avec les items positifs de ce type. La tâche est au total très facile et ne suscite presque pas d'erreur.

La variable expérimentale intéressante est le temps de réponse qui s'écoule entre l'apparition du mot-sonde et la réponse motrice du sujet : quelques centaines de millisecondes. Ces temps comportent des variations, dont certaines sont aléatoires, mais dont les autres recèlent des régularités qui témoignent de l'influence de très nombreux facteurs, et autorisent une reconstruction théorique du fonctionnement mental. Pour isoler l'action de ces facteurs, on utilise l'analyse statistique d'une grande quantité de données expérimentales.

Des unités sémantiques en mémoire

Une des théories actuelles pose que ces temps sont un bon indicateur d'un "état psychologique", l'activation plus ou moins forte d'unités sémantiques préexistantes en mémoire à long terme. C'est l'activation conjointe de ces dernières qui est considérée comme formant la représentation sémantique, ou telle de ses parties. Dans notre exemple, il s'agit de la partie qui correspond à : le maillot jaune s'est effondré, dont défaillance est un équivalent. Quantité de situations expérimentales sont imaginables à partir de ce canevas théorique.

Dans ce genre de conceptualisation, la notion de "niveau d'activation" a le statut d'une variable théorique inférée, relevant de la psychologie cognitive, et valable à son niveau propre au moyen d'un faisceau de mesures systématiques. Elle s'éloigne fortement du fonctionnement informatique. En revanche, on peut en donner une interprétation neurobiologique : au cours de la compréhension seraient activés, à un degré plus ou moins élevé, des ensembles neuronaux répartis dans le cerveau, qui seraient le "support" matériel des représentations sémantiques considérées. Cette façon de raisonner met en œuvre la démarche, spécifique des sciences cognitives,

LANGUAGE COMPREHENSION - Cognitive science research allows progressive determination of both equivalences and differences among human comprehension and machine language processing. Response time measurements during comprehension provide data for indirect study of an internal state: activation of cognitive, or neural, structures involved in semantic representation.

"de recherche de compatibilités conceptuelles entre des disciplines distinctes" : plus haut entre psychologie cognitive et intelligence artificielle, ici entre psychologie cognitive et neurobiologie, ailleurs entre psychologie cognitive et linguistique.

Ainsi, dans une expérience de ce type réalisée d'abord en français, et reproduite ensuite en japonais, on a montré le fait suivant : les réponses aux mots-sondes qui sont "agent" ou "patient" d'une phrase (l'équivalent sémantique de nos sujets et compléments d'objet dans des phrases actives) ont des temps de réponse qui, en mémoire à court terme, s'accroissent moins vite (quelques dizaines de millisecondes de moins) en fonction du délai de sondage que les réponses aux mots-sondes qui ont un rôle circonstanciel. On dira que "leur déclin en mémoire est plus lent", ou que "les ensembles neuronaux correspondants se désactivent moins vite".

C'est, d'autre part, une idée linguistique de base que, pour comprendre la plupart des phrases, il faut déterminer "qui fait quoi, où, quand, comment ?" En français, l'ordre des mots en est une donnée importante. Il semble ici que ce traitement grammatical et sémantique s'accompagne d'une tendance "naturelle" à mieux conserver le souvenir d'un événement, et de ses acteurs ou "actants" principaux, que de ses circonstances. Tendance totalement non consciente, involontaire, mais influençable par divers procédés : intonation, typographie, variations du contexte.

D'autres expériences ont, elles aussi, montré le rôle dans la compréhension humaine du déclin, ou de l'oubli "sélectif". C'est une caractéristique mentale qui vaut d'être soulignée : l'ordinateur, lui, n'oublie jamais si on ne le lui impose. C'est une de ses faiblesses, car savoir bien oublier est une des supériorités de l'intelligence humaine. Dans sa compétition avec l'ordinateur, l'esprit humain, on le voit, ne manque pas d'atouts insoupçonnés.

Jean-François Le Ny, professeur à l'Université de Paris-Sud, directeur du Centre d'étude de psychologie cognitive, Université Paris-Sud, Bât. 335, 91405 Orsay Cedex.

LE TRAITEMENT AUTOMATIQUE DES LANGUES

Connaître la langue et comprendre comment l'homme comprend : deux impératifs pour la communication homme-machine et l'intelligence artificielle.

■ **Gérard Sabah**

Communiquer avec l'ordinateur de la façon la plus efficace possible et rendre plus "humaine" la communication avec la machine, en permettant un langage de plus en plus proche de notre mode naturel d'expression est un des buts essentiels de l'intelligence artificielle. Si les langages informatiques ne transmettent que l'explicite, la fonction même des langues implique qu'on transmet ce qu'on imagine que l'interlocuteur va inférer de ce qu'on dit (le sens "littéral" n'est qu'un support pour transmettre une intention de communication).

Pour simuler sur machine cette compréhension et tenter de réaliser des mécanismes "analogues" aux opérations mentales sous-jacentes, on construit des représentations de diverses interprétations des énoncés. Ces changements de représentations restent toutefois de pures manipulations formelles et s'opposent aux raisonnements plus intuitifs et "sémantiques" du cerveau humain.

L'émergence de l'informatique linguistique

Les recherches dans ce domaine se sont ainsi ancrées dans les sciences cognitives. Les études sur la langue (linguistique), les mécanismes humains de compréhension (psychologie), et la simulation des processus intelligents (IA) sont complémentaires et débouchent sur l'informatique linguistique.

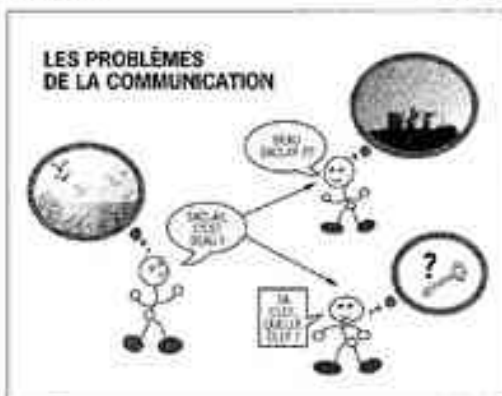
Trois niveaux de difficultés apparaissent qui concernent respectivement le *lexique* (informations sur les mots et leurs sens), la *grammaire* (structures des phrases) et enfin les *connaissances externes* (informations générales sur le monde, sur la situation particulière).

Les programmes de traitement automatique des langues doivent tout d'abord reconnaître les mots de la langue. Les dictionnaires usuels (50 000 mots) sont aisément informatisables, mais les quelques 5 millions de mots des domaines techniques restent hors des possibilités actuelles. De plus, les mots composés, expressions toutes faites, néologismes et abréviations viennent compliquer cette reconnaissance du mot.

Identifier les sens et les rôles des mots, combiner les symboles qui les représentent permet ensuite de constituer une représentation du sens littéral. Même s'il n'existe actuellement aucune grammaire complète d'aucune langue parlée, l'analyse syntaxique – compliquée par les ambiguïtés lexicales, syntaxiques ou sémantiques – est souvent un préalable à cette construction.

Aller au-delà des mots

Une réelle communication demande de dépasser le sens littéral et d'en calculer les interprétations possibles. Toutes nos connaissances sont alors utiles : la réalité et ses contraintes, les aspects culturels, les informations sur la situation, permettent de découvrir les sous-entendus cachés derrière l'énoncé (on parle alors de pragmatique).



De plus, les traitements automatiques diffèrent de la compréhension humaine : on n'utilise pas un ordinateur sans but précis ! Les aspects particuliers de l'application (les buts visés, la tâche, les connaissances du domaine...) sont alors des connaissances utiles pour la mise en œuvre de programmes efficaces dans des domaines restreints et bien formalisés. Si des outils efficaces de représentation ont été développés pour ce faire (schémas, scénarios, scripts...), des problèmes naissent de la très grande quantité de connaissances à utiliser. Retrouver l'information pertinente et ne pas se noyer dans des déductions inutiles restent, bien qu'essentielles, des questions encore ouvertes.

AUTOMATIC PROCESSING OF LANGUAGE - Computer language processing programmes, upstream of man-machine communication, must be capable of recognizing the meaning and role of words, and then calculate all possible interpretations whilst bearing in mind the aims and strategies of the user.

Les premières mises en œuvre ont utilisé ces connaissances en séquence. Dans cette architecture figée, le système ne peut accéder simultanément à toutes ces connaissances, ce qui provoque des ambiguïtés "artificielles" (non dues à la langue elle-même).

Éliminer ces ambiguïtés artificielles implique une utilisation de ses connaissances au moment pertinent, et une adaptation dynamique à la situation, ce que le développement des nouvelles architectures de l'IA ("tableau noir" et systèmes multi-experts) permet d'envisager dès à présent. Leurs fonctionnements sont en outre beaucoup plus cohérents avec ce qu'on sait des mécanismes humains de compréhension.

Les programmes actuels, s'ils sont indéniablement utiles, se situent entre deux extrêmes : d'un côté, des systèmes

efficaces pour des applications réelles, capables de répondre effectivement aux demandes limitées qui leur sont adressées dans des domaines assez vastes ; d'un autre côté, des systèmes "pilotes", visant à montrer la faisabilité d'une approche théorique complexe, et ne fonctionnant guère en dehors d'un nombre d'exemples assez limité. Pour que les systèmes de traitement du langage soient réellement satisfaisants, ils doivent réaliser des inférences appropriées à partir de ce qui leur est dit et,

inversement, leur comportement doit permettre à l'interlocuteur les inférences qu'il fait habituellement en utilisant la langue. Ainsi est-il apparu clairement qu'il n'était pas suffisant de comprendre le sens de surface d'une langue mais qu'il faut pouvoir en comprendre les implications profondes, principalement les buts, les intentions et les stratégies de l'interlocuteur, points essentiels des recherches actuelles de ce domaine pluridisciplinaire.

■ **Gérard Sabah**, directeur de recherche au CNRS, responsable du groupe Langage et cognition, Laboratoire d'informatique pour la mécanique et les sciences de l'ingénieur (UPR 3251-CNRS), Bât. 508, BP 133, 91403 Orsay Cedex.

EFFETS DE SENS

Création continue des sociétés humaines, les langues révèlent une organisation sémantique plus conforme aux besoins de la communication quotidienne qu'à l'idéal des logiciens.

Benoît de Cornulier

La sémantique, ou étude du sens, ne peut se détacher de la question concrète, fondamentale, de la possibilité de la communication. Si on émet à votre intention les sons de *il pleut*, peut-être sortirez-vous sans vous tromper parce que, du fait qu'on vous parle, vous pouvez inférer que sans doute il pleut, et prendrez votre parapluie. Ce n'est pas la pluie que cette production acoustique manifestait, mais, plus directement, la volonté d'informer qu'il pleut, moyennant les conventions de la langue. Mais la conclusion qu'il pleut (sans doute) dépend encore de la mesure dans laquelle vous supposez que votre informateur est bienveillant à votre égard (l'information incorrecte serait nuisible), qualifié pour juger du temps, et autres hypothèses de type social ou économique plutôt que spécifiquement linguistique. Comprendre un signe linguistique, c'est donc, pour ainsi dire, deviner l'intention de son producteur, compte tenu des conventions de la langue, mais en même temps compte tenu de l'explication que nous imaginons du fait qu'il s'en sert en ces circonstances.

Les conventions de sens qui constituent la langue sont d'autant plus délicates à analyser qu'elles émergent de l'usage, plutôt qu'elles ne sont créées par décision autoritaire et explicite (comme un langage

artificiel, qu'on peut connaître avant même de s'en servir). À cette source de difficulté s'ajoute le fait que les locuteurs s'expriment librement, créativement, avec la possibilité permanente d'adapter à leurs besoins les ressources de la langue (ainsi on peut toujours parler plus ou moins par "métaphore", sans que le sens des mots soit réductible à une valeur pré-établie).

Le double sens des mots

Par contraste avec les langages artificiels dont l'emploi présuppose souvent un domaine de référence déterminé, des normes de précision bien définies – par exemple l'absence de précision (4 peut virtuellement contraster avec 4,3) –, et des règles de déduction constantes, l'organisation sémantique des langues est caractérisée par son adaptation aux besoins de la communication quotidienne, avec domaines de référence et niveau de précision flottants, et sans règles de déduction parfaitement définies. D'où notamment l'omniprésence des oppositions dites "privatives" révélant une organisation cognitive structurée dissymétriquement. Ainsi *homme* et *femme* ne désignent pas symétriquement l'humain mâle et femelle, puisque la question *Qu'est-ce qui distingue les hommes des animaux ?* peut concerner les deux sexes (sans compter d'éventuels intermédiaires), alors que la

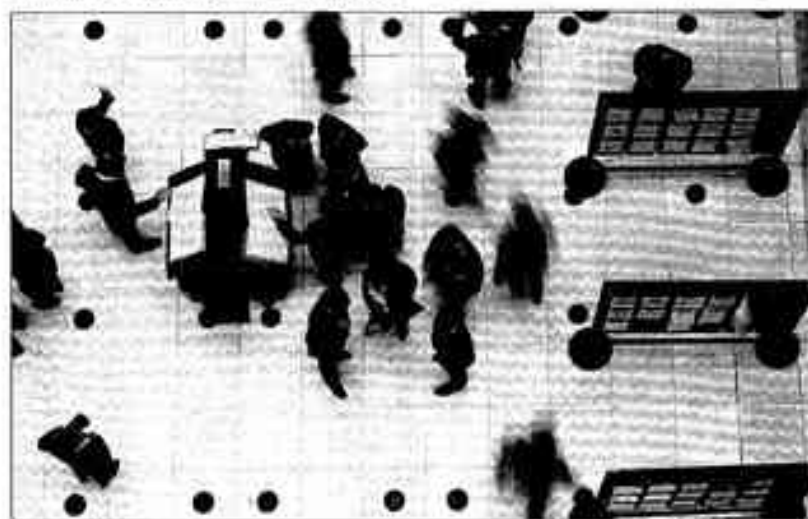
MAKING SENSE - Capturing meaning in language is difficult because the value of words is not established by explicit decisions. The semantic organization of languages seems to be based on very specific properties, related to the needs of informal daily communication, as illustrated by the dissymmetry of so-called privative antitheses.

question *Qu'est-ce qui distingue les femmes des animaux ?* concerne exclusivement les humains femelles ; c'est en situation de contraste virtuel avec *femme* qu'*homme* peut désigner l'humain mâle (parce que non spécifié femelle) ; de même, le genre grammatical masculin est ouvert par rapport au féminin ; d'où la possibilité d'"accorder" des mots féminins et des mots masculins avec un prédicat masculin (*La carotte et le carreau sont cuits* !).

D'une manière comparable, le fait qu'on peut indifféremment répondre *Ma voisine* ou *Mon auto* à la question *Que vois-tu ?* mais non *Qui vois-tu ?* révèle que le pronom interrogatif *qui ?* ne s'oppose pas à *qui ?* comme indiquant le caractère non-humain, mais plutôt, comme n'indiquant pas le caractère humain. Sur un autre plan, la substitution d'une forme de futur à une forme de présent dans *Si tu reviens* ("reviendras") *demain*, on t'*ouvrira*, la substitution inverse ne se faisant pas, révèle que, contrairement aux formes de futur qui indiquent systématiquement la postériorité de l'événement à l'énonciation, les formes de présent, qui n'indiquent pas cette postériorité, n'indiquent la non-postériorité qu'en situation de contraste possible. De même encore le mode verbal indicatif, comme l'infinitif, est neutre et ne s'oppose à d'autres modes qu'en situation de contraste (*Tu te hais* peut être un ordre, mais *Tais-toi* ne peut être une assertion).

Cette organisation caractéristique du sens permet au locuteur (ou au penseur), non seulement de ne pas faire des choix qu'il serait prématuré de faire, mais encore, de ne pas marquer s'il choisit de choisir ou de ne pas choisir. Dans *Deux et deux font quatre*, la forme verbale de présent *font* n'indique, à elle seule, ni qu'on parle seulement pour le temps contemporain de l'énonciation à l'exclusion d'un temps antérieur ou postérieur, ni qu'on parle pour toute époque (vérité éternelle), ni même si on parle en se souciant, ou sans se soucier, de la notion même d'époque ou de temps (vérité intemporelle). Le sens est ouvert, et son analyse d'autant plus problématique.

Benoît de Cornulier, professeur à l'Université de Nantes, directeur du Centre d'études métriques, 1, place Foch, 44000 Nantes.



– "Stabilité, fiabilité. Enfin, vous voyez ce que je veux dire."
– "Absolument."
En matière de communication orale, le sens linguistique est donné à reconstituer (deviner) par l'auditeur. (© S. Benbow - Corbis)

LA PRAGMATIQUE LINGUISTIQUE

La compréhension des énoncés, loin de se réduire à un pur et simple décodage, est un processus non modulaire d'interprétation qui mobilise l'intelligence générale et fait largement appel à la connaissance du monde.

LINGUISTIC PRAGMATICS - Far from being reducible to a modular process of decoding, the interpretation of utterances involves general inferential abilities and presupposes extensive knowledge of the world.

■ François Récanati

La pragmatique étudie la communication linguistique et s'intéresse tout particulièrement au rôle que joue le contexte dans la compréhension des énoncés. Pour comprendre le message véhiculé par un énoncé, il ne suffit pas d'être linguistiquement compétent et de "comprendre" la phrase au sens grammatical du terme; il faut en outre posséder un certain nombre d'informations collatérales (connaissances encyclopédiques sur le monde, informations sur la situation d'énonciation, croyances par-

cialisation et borné par celui-ci est censé avoir eu lieu l'événement décrit... La principale leçon de la pragmatique est que le message communiqué est toujours très largement sous-déterminé par le matériel linguistique utilisé et ne se confond pas avec la signification "grammaticale" de la phrase.

Parmi les processus qui permettent de déterminer le message communiqué sur la base de la signification linguistique de la phrase et des informations contextuelles appropriées, on peut distinguer deux grandes catégories: les processus pragmatiques primaires et secondaires.

telle personne). Saturer la signification consiste à déterminer contextuellement la valeur de toutes les variables. De cette façon on obtient une représentation complète ou une "proposition". Celle-ci peut ensuite être modifiée par l'ajout de déterminations facultatives, c'est-à-dire par un processus d'enrichissement (ainsi lorsque quelqu'un dit *Il a pris sa clé et a ouvert la porte*, on comprend qu'il a ouvert la porte avec la clé, même si cela n'a pas été dit explicitement). Un phénomène de transfert peut également avoir lieu: telle représentation peut en appeler une autre en vertu d'un lien analogique ou métonymique contextuellement saillant, comme lorsque le garçon de café déclare que le sandwich au jambon est parti sans payer.

Identifier le message second

En s'appliquant à la signification linguistique de la phrase, les processus pragmatiques primaires déterminent une proposition ou un message que celle-ci exprime contextuellement. Mais le message en question n'épuise pas le sens de l'énoncé: souvent un message second, véhiculé implicitement, s'ajoute au message exprimé. On peut signifier quelque chose en disant quelque chose d'autre - on peut signifier qu'on veut partir en disant qu'il se fait tard. Le message second est déterminé à partir d'une réflexion sur ce qu'implique contextuellement le fait que celui qui parle ait dit ce qu'il a dit (*Il me dit qu'il est tard, c'est donc qu'il veut partir*). Les processus pragmatiques secondaires sont des processus inférentiels qui se distinguent des processus pragmatiques primaires par le fait qu'ils présupposent l'identification préalable d'un message exprimé par l'énoncé - celui, précisément, qui résulte de l'opération des processus pragmatiques primaires.

■ François Récanati, directeur de recherche au CNRS, Centre de recherche en épistémologie appliquée (URA 1259 CNRS), 1, rue Descartes, 75005 Paris.



tagées des interlocuteurs, etc.). Ainsi pour comprendre un énoncé comme *Elle a changé le bébé*, il faut déterminer entre autres choses: 1°) à quelle personne le pronom *elle* fait référence; 2°) à quel bébé l'expression *le bébé* fait référence; 3°) si c'est l'identité du bébé qui change (remplacement du bébé par un autre) ou certaines de ses propriétés (changement des langes? des habits, etc.); 4°) quand a lieu l'énonciation, le passé étant défini comme antérieur par rapport au moment de l'énonciation; 5°) dans quel intervalle temporel antérieur au moment de l'énon-

Les processus pragmatiques primaires

Parmi ceux-ci, le processus d'instanciation contextuelle des variables (ou "saturation") joue un rôle majeur. On peut se représenter la signification linguistique comme une formule où figurent de nombreuses "variables" qu'il faut instancier en contexte en leur assignant une valeur. Ainsi le pronom *elle* dans la phrase citée plus haut est comme une variable qui pourra, en contexte, prendre telle ou telle valeur (c'est-à-dire désigner telle ou

LES COMPARAISONS INTERLANGUES

Le recours à l'analyse comparée des langues naturelles est fondamental pour l'élaboration de modèles du traitement et de l'acquisition d'une langue quelle qu'elle soit.

Michèle Kail

Si l'élaboration de typologies et la recherche d'universaux constituent des entreprises classiques en linguistique, en revanche, ce n'est qu'à partir des années 75-80 que la psycholinguistique s'est engagée dans de nouvelles problématiques exploitant judicieusement la diversité des langues pour tester des hypothèses sur l'acquisition du langage ou sur son traitement par l'adulte qui ne peuvent être en référence à une langue unique.

Comparer pour généraliser

L'analyse comparée des langues naturelles révèle l'existence d'invariants cognitifs associés à la représentation du temps, de l'espace, de la causalité, de l'agentivité. Même si l'on fait l'hypothèse que des processus universels sont impliqués dans le développement du langage, chaque langue pose à l'enfant un ensemble de problèmes spécifiques, la question centrale étant de savoir si et comment la structure de la langue à acquérir affecte le processus d'apprentissage lui-même. Si l'on prend comme illustration la relation fondamentale agent-action-patient, on voit dans les années 60-70 les recherches menées essentiellement sur l'anglais conduire à l'existence d'une stratégie universelle d'acquisition fondée sur l'ordre des mots (le premier nom est l'agent) lui-même censé refléter l'ordre des pensées. Les recherches interlangues ont au contraire montré que les jeunes enfants sont préparés tant pour l'acquisition de langues qui marquent les fonctions par des flexions

casuelles (allemand, hébreu, grec, hongrois, turc etc.) que pour celles où l'ordre des mots joue un rôle dominant (anglais).

Dans toutes les langues, l'enfant et l'adulte doivent, en fonction des limitations des capacités (perceptives, attentionnelles, mnémoniques) de leur système cognitif de traitement linguistique, construire les relations entre les formes et les fonctions. Cette construction peut être vue comme largement déterminée par les propriétés statistiques de la langue dans une perspective où l'organisme est censé s'y adapter. A tout lien entre une forme et une fonction (syntaxique, sémantique ou pragmatique), se trouve associée une pondération dans une langue donnée. C'est ainsi que dans leur interprétation des phrases simples de type agent-action-patient, les sujets se fondent sur un ensemble d'indices linguistiques – ordre des mots, marques morphologiques casuelles, contrastes sémantiques, intonation – pour identifier les fonctions d'agent ou de patient. Par exemple, si l'ordre des mots est crucial pour la compréhension d'une phrase en anglais, il n'a qu'un rôle très secondaire dans la plupart des langues à morphologie riche.

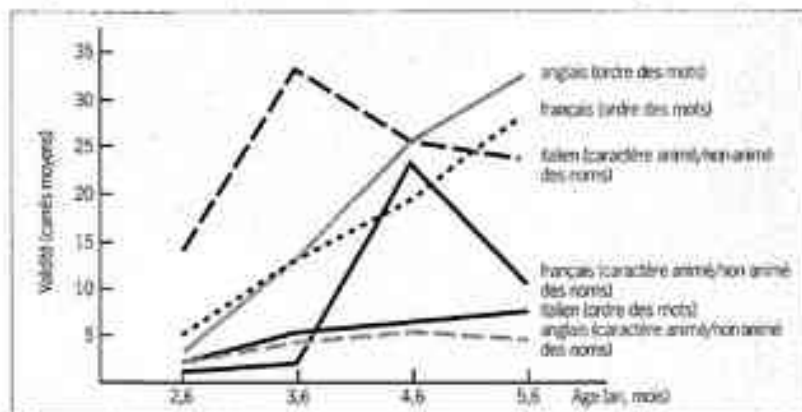
Les travaux expérimentaux réalisés par diverses équipes internationales sur une quarantaine de langues ont permis d'établir une hiérarchie des indices fondée sur leur validité, c'est-à-dire leur disponibilité et leur fiabilité; ces travaux ont également montré l'existence d'une étroite corrélation entre la validité d'un indice dans une langue et son poids dans le traitement des sujets. Ce poids rend compte du degré d'activation d'une interprétation particu-

Cross-Linguistic Studies - Research work on sentence processing in various languages shows the importance of cue validity, cue strength and cue cost to predict the hierarchy of linguistic cues – word order, case marking, semantic contrast, stress – and their emergence in language acquisition. New cross-linguistic data on on-line sentence processing are gathered to study the integration of cues in real time.

lière. En ce qui concerne l'acquisition, l'ordre d'émergence des indices est largement fonction de leur validité dans la langue de l'adulte. Au cours du développement, les enfants procèdent à divers rééquilibrages de leurs stratégies conformément au poids différentiel des indices mais aussi au coût de leur traitement. En effet, certains indices (par exemple les flexions casuelles) donnent lieu à un traitement dit local, alors que d'autres, tels l'ordre des mots ou l'intonation, sont susceptibles d'un traitement relationnel ou topologique. Le principe de localité résume le fait qu'avec le développement, dans toutes les langues étudiées, à l'exception de l'anglais, les traitements locaux sont privilégiés aux dépens des traitements topologiques.

Comparer en temps réel

Les recherches tentent maintenant de comprendre comment ces indices sont intégrés lors de la compréhension en temps réel. Les investigations expérimentales pilotées par ordinateur utilisent des paradigmes permettant de contrôler l'information linguistique effectivement prise en compte par le sujet aux diverses étapes de son traitement. Ces investigations permettent également d'évaluer les capacités immédiates à détecter la dégradation (par exemple par bruit surimposé) ou la distorsion de tel ou tel type d'indice dans des langues présentant des contrastes pertinents. Certaines de ces expériences peuvent être mises en œuvre avec succès chez les enfants à partir de 4 ans. Les résultats de ces travaux devraient permettre de définir les principes qui régissent la perceptibilité d'un indice, c'est-à-dire sa capacité à déclencher le traitement, et l'assignabilité d'un indice, c'est-à-dire sa capacité à être intégré à l'information déjà traitée tant chez l'adulte qu'au cours du développement.



Importance relative, pour la compréhension de la phrase, de l'ordre des mots et du caractère animé/non animé des noms en fonction de la langue et de l'âge des sujets.

Michèle Kail, directeur de recherche au CNRS, responsable de l'équipe Psycholinguistique comparative et développementale du Laboratoire de psychologie expérimentale (URA 316 CNRS), Université René Descartes, Centre Henri Poincaré, 28, rue Serpente, 75006 Paris.

THÉORIE LINGUISTIQUE ET ACQUISITION DU LANGAGE

Une théorie explicite de la structure du savoir linguistique apparaît comme une composante fondamentale de l'étude de l'acquisition du langage.

■ Celia Jakubowicz

L'enfant acquiert sa langue maternelle en un temps relativement bref et indépendamment de tout enseignement explicite. La connaissance linguistique acquise est très riche et fondamentalement uniforme à travers une communauté linguistique, en dépit d'un *input* nécessairement partiel et individuellement variable. Ceci est vrai aussi bien pour un enfant normal que pour un enfant sourd ou aveugle de naissance, à condition que l'information linguistique fournie par l'environnement soit adaptée aux modalités sensorielles disponibles chez l'enfant. Tout cela suggère que, comme dans l'acquisition d'autres capacités propres à l'espèce, l'enfant est génétiquement équipé de contraintes spécialisées qui l'amènent à accepter certaines généralisations et à en écarter d'autres.

Cette hypothèse est confortée par les études récentes en syntaxe comparée. Celles-ci montrent que malgré leur diversité apparente, les langues humaines ont une structure fort uniforme constituée par deux sortes d'objets : "des principes linguistiques" (des "universaux"), caractérisant des propriétés invariantes très structurées, et des "paramètres" qui spécifient les variations très limitées de ces principes à travers les langues. Il s'agit de propriétés abstraites qui ne peuvent pas être apprises à partir des seuls énoncés que l'enfant entend dans son environnement.

Dans l'hypothèse où les principes et paramètres mis en évidence par la linguistique comparative font partie de l'équipement génétique de l'enfant, acquérir une langue veut dire fixer la valeur des paramètres sur la base de la langue d'entrée, et déterminer ainsi sa grammaire sous-jacente. L'acquisition d'une langue est donc envisagée comme un processus de sélection d'une grammaire, sur la base de l'expérience linguistique, à partir d'un ensemble limité de possibilités, défini par les principes et paramètres de l'état initial.

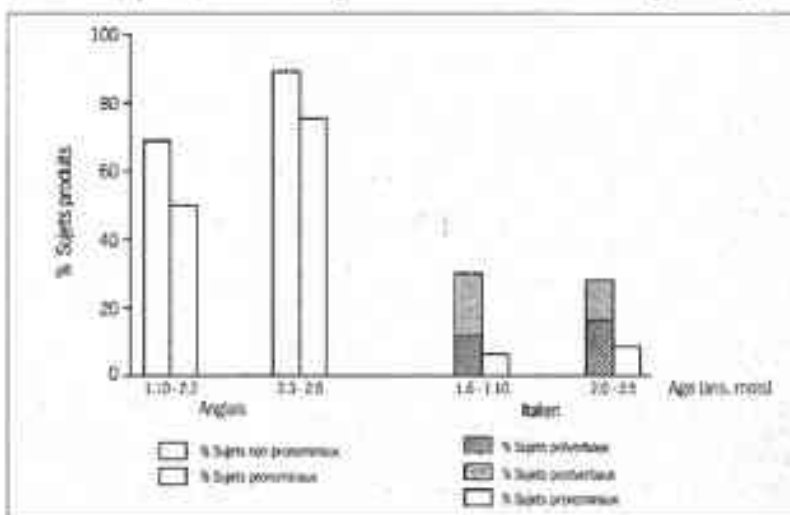
LINGUISTIC THEORY AND LANGUAGE ACQUISITION - Child development studies related to Generative Grammar suggest that language acquisition results from the interaction of a limited number of highly specialized innate constraints and data provided by the child's linguistic environment.

Dès 18 mois, l'enfant a saisi l'ordre des mots

Par exemple, à travers les langues, l'organisation des mots en syntagmes est invariante : un syntagme est la projection d'un mot, "la tête", qui sélectionne des compléments et des spécificateurs. Toutefois, les langues varient selon que la tête précède ses compléments (comme en français ou en anglais), ou qu'elle les suit (comme en japonais). Si à l'état cognitif

fini, la réalisation lexicale du sujet est obligatoire, comme en français ou en anglais, ou facultative, comme en espagnol ou en italien, où un sujet pronominal peut ne pas être prononcé. L'enfant contraint par cet invariant et les valeurs "sujet réalisé" et "sujet nul" du paramètre associé, fixe très précocement la valeur adoptée par sa langue : ceci apparaît sur la figure ci-dessous où on constate que dans des énoncés avec un verbe, la production des sujets pronominaux (*Il dort*) et non-pronominaux (*Jean dort*) est beaucoup plus fréquente chez des enfants parlant anglais que chez des enfants parlant italien.

La littérature fait état de nombreux autres cas de variations systématiques ré-



Production de sujets pronominaux et non pronominaux chez des enfants anglophones et italophones.

initial, avant toute expérience linguistique, l'enfant est contraint par le principe régissant l'organisation des mots en syntagmes et par les deux valeurs - tête initiale et tête finale - du paramètre qui lui est associé, des données linguistiques très simples comme *Jean mange une pomme* pour le français, ou *Jean une pomme mange* pour le japonais, lui suffisent pour déterminer si sa langue est tête initiale ou tête finale. En fait, l'étude des corpus enfantins révèle que dès la période de production de deux mots, aux environs de 1 an et 6 mois, l'ordre verbe complément est observé chez des enfants anglophones et l'ordre complément-verbe chez des enfants japonais, en accord avec la valeur du paramètre adoptée par ces deux langues.

Une autre propriété invariante requiert que toute proposition ait un sujet grammatical. Cependant, les langues diffèrent selon que dans les propositions à temps

gissant la syntaxe de la négation, du verbe, de l'interrogation et du pronom réfléchi. Pour tous ces cas, les données d'acquisition semblent montrer que les invariants linguistiques sont disponibles aussitôt que les constructions qui les manifestent sont utilisées. De tels résultats n'auraient pas pu être trouvés sans la prise en compte d'une théorie formelle de la structure de la connaissance linguistique. La collaboration étroite entre linguistique théorique et psycholinguistique du développement semble donc nécessaire pour mieux comprendre la nature et la mise en œuvre des contraintes spécialisées pour le traitement de l'information linguistique.

■ Celia Jakubowicz, chargée de recherche au CNRS, Laboratoire de psychologie expérimentale (URA 316 CNRS), Université Paris V, Centre Henri Piéron, 28, rue Serpente, 75006 Paris.

LE LANGAGE ET LES LÉSIONS CÉRÉBRALES

L'analyse conjointe des symptômes aphasiques et des anomalies que révèle, dans le cerveau, l'imagerie médicale contemporaine démontre l'organisation des structures neuronales en réseaux fonctionnels.

Jean-François Démonet,
Jean-Luc Nespoulous,
Dominique Cardebat,
Michèle Puel

On sait que des lésions du cortex (ou substance grise dans laquelle sont regroupés les corps cellulaires des neurones) de l'hémisphère cérébral gauche entraînent presque systématiquement chez des sujets droitiers, l'apparition de syndromes aphasiques, constitués de symptômes variés mais traduisant tous un handicap de la communication par le langage chez ces patients. Dès les premiers travaux, de grandes distinctions fonctionnelles entre différentes régions du cortex cérébral ont été établies : les lésions de la région frontale inférieure (aire de Broca) se traduisent par des troubles de l'expression, alors que des lésions temporales perturbent la compréhension du langage parlé.

Cependant, les progrès récents de l'imagerie médicale du cerveau, permettant d'étudier l'anatomie cérébrale (scanner X, IRM) du vivant de nombreux malades (alors que les premiers travaux avaient porté sur l'observation des lésions post-mortem), ont montré la complexité, dans le détail, des relations entre struc-

tures cérébrales et fonctions linguistiques. Ainsi, par rapport aux "dogmes" reliant tel syndrome aphasique à telle localisation lésionnelle, l'existence d'exceptions a été démontrée, suggérant l'intervention d'un grand nombre de facteurs influençant les effets d'une lésion cérébrale, tels que l'âge, le degré de latéralisation manuelle ou le sexe du malade.

Par ailleurs, on a établi que certaines aphasies pouvaient être la conséquence de lésions épargnant le cortex péri-sylvien gauche et localisées, par exemple, dans les structures "sous-corticales" gauches, voire dans l'hémisphère droit.

Une organisation en réseaux fonctionnels

En fait, la recherche des déterminants cérébraux des fonctions linguistiques doit prendre en compte l'organisation en réseaux des structures cérébrales, impliquant éventuellement des structures fort distantes les unes des autres. De ce fait, il n'existe que rarement une correspondance directe entre une structure unique et un processus linguistique donné. D'autre part, les lésions cérébrales affectent sou-

LANGUAGE AND BRAIN LESIONS - The comparative analysis of aphasic symptoms and functional anomalies - as shown by modern cerebral imaging - gives further evidence of the existence of complex functional networks underlying language function(s).

vent les fonctions de régions cérébrales situées à distance de la région détruite.

Cette organisation en réseaux fonctionnels a pu être vérifiée grâce à l'apport très récent d'un autre type d'imagerie médicale, l'imagerie fonctionnelle (tomographies d'émission monophotonique ou positronique) permettant d'explorer le niveau d'activité fonctionnelle des structures cérébrales (voir figures). La taille et la topographie de ces réseaux est variable. Certains d'entre eux ne font intervenir qu'un petit nombre de régions cérébrales : le réseau impliqué dans les processus gérant les composantes élémentaires des mots en termes de sons (les phonèmes) ne semble comprendre que les aires néo-corticales jouxtant la scissure de Sylvius. D'autres réseaux semblent beaucoup plus distribués dans le cerveau, tels ceux prenant en charge les processus sémantiques (gérant le sens porté par les mots).

Ces données issues de l'observation de patients cérébro-lésés sont actuellement confortées par les travaux consacrés à l'exploration des fonctions linguistiques chez des sujets normaux, grâce à la technique d'activation cérébrale au cours de tâches linguistiques.

Enfin, la recherche en neurolinguistique ne peut ignorer un autre type de complexité, celle qui caractérise la nature des manifestations aphasiques qui traduisent non seulement en "négatif" les effets d'une lésion cérébrale, mais aussi en "positif" les stratégies développées par le patient pour compenser ce déficit et les phénomènes de récupération fonctionnelle mis en place progressivement.



Fig. 1 a - Coupe axiale du cerveau par scanner X montrant, dans la profondeur de l'hémisphère gauche, la séquelle d'un infarctus sous-cortical de petite taille (flèche). Le cortex cérébral ne paraît pas affecté par cette lésion (Service de neuroradiologie, Pr. C. Mariette, CHU Purpan, Toulouse).



Fig. 1b - Coupe axiale en tomographie monophotonique montrant, chez le même patient, les conséquences fonctionnelles de cette lésion, avec (en blanc) l'existence d'une importante diminution d'activité fonctionnelle dans les deux régions frontales antérieures et la région thalamique gauche. La lésion sous-corticale entraîne le dysfonctionnement d'un réseau fonctionnel unissant entre elles ces structures qui sont devenues, de ce fait, hypofonctionnelles avec pour conséquence une asportantité du langage.

Jean-François Démonet, chargé de recherche à l'INSERM, GDR 978 CNRS, Laboratoire d'imagerie, de neuropsychologie et de pharmacologie du vieillissement cérébral humain (Unité 230 INSERM), CHU Purpan, Service de Neurologie, 31059 Toulouse Cedex.

Jean-Luc Nespoulous, professeur à l'Université de Toulouse Le Mirail, directeur du Laboratoire de psycholinguistique Jacques Lonjat, 5 allées Antonio Machado, 31058 Toulouse Cedex.

Dominique Cardebat, chargé de recherche à l'INSERM, GDR 978 CNRS, Unité 230 INSERM.

Michèle Puel, praticien hospitalier, GDR 978 CNRS, Unité 230 INSERM.

LA MODÉLISATION DES MÉCANISMES DE LA LECTURE

La neuropsychologie a décrit diverses formes de dyslexie dont les modèles de la lecture doivent pouvoir rendre compte.

Serge Carbonnel

Les nombreuses recherches réalisées depuis quelques années pour comprendre les mécanismes de cette activité essentielle qu'est la lecture ont donné lieu à des interactions fructueuses entre des disciplines comme la psychologie cognitive, la neuropsychologie et, plus récemment, l'intelligence artificielle. En particulier, la mise au point de modèles cognitifs des processus de lecture a largement bénéficié des données provenant d'études de cas de patients qui, à la suite d'une lésion cérébrale située en général dans l'hémisphère gauche, présentent des troubles spécifiques de la lecture (dyslexies acquises).

La modélisation de la lecture

La lecture peut être conçue comme un système de traitement de l'information. L'information d'entrée étant un stimulus écrit, le système doit être capable de produire, en général, deux types de sortie : la signification du stimulus (code sémantique) et sa prononciation (code phonologique). Dans ce cadre, un modèle cognitif classique de la lecture suppose que lors du traitement d'un stimulus écrit comme *bateau* (mot familier) ou *sarnieu* (pseudo-mot), un module d'analyse visuelle permet d'identifier la séquence des lettres (ou graphèmes) présentes. Deux traitements (non lexical et lexical) supposés réalisés en parallèle sont alors possibles : dans le traitement non lexical, la séquence (ex. *sarnieu*), est décomposée en une suite d'unités graphémiques (*s/a/r/n/i/e/u*) auxquelles sont appliquées des règles de conversion graphèmes-phonèmes (ex : *eau* → [o]) pour produire une suite de phonèmes ([sarnio]); dans le cas du traitement lexical, la séquence identifiée est confrontée aux représentations orthographiques de tous les mots connus, stockées dans le "lexique orthographique d'entrée". Si la séquence (ex : *bateau*) est reconnue, elle "active" la représentation du mot dans ce lexique. Celle-ci peut alors donner directement accès à deux types d'information, la signification du mot (ou code sémantique) représentée dans le système sémantique et la forme orale du mot (ou code phonologique, ici [bato]) stockée dans un lexique phonologique établi par l'apprentissage de la pa-

role. Cependant, la forme orale du mot peut également être obtenue via le code sémantique, un peu comme lorsque nous dénommons un objet connu (ex : *bateau*).

Il faut noter que selon ce modèle supposant un double système de lecture, des pseudo-mots (comme *sarnieu*) ne peuvent être lus que par le système non lexical; des mots irréguliers, c'est-à-dire ne respectant pas les règles de conversion grapho-phonémiques (comme *monsieur*, *écho*) ne peuvent être lus que par le système lexical; les mots réguliers (comme *bateau*) pourraient être lus correctement par les deux systèmes.

L'apport de la neuropsychologie cognitive

Si l'on admet que des structures cérébrales distinctes contrôlent l'activité des différents modules postulés dans un tel modèle, certaines lésions cérébrales devraient pouvoir affecter sélectivement les opérations réalisées par l'un ou l'autre de ces modules, tout en laissant les autres intactes. Selon le ou les module(s) supposé(s) touché(s) chez un patient donné, le modèle devrait pouvoir prédire les dissociations qui devraient être observées entre certaines performances altérées et d'autres préservées. Des études ont effectivement révélé qu'il existait plusieurs types de dyslexies acquises pouvant être rapportées à des déficits distincts de certains sous-systèmes fonctionnels supposés dans le modèle. Dans le cas de la "dyslexie phonologique", les patients lisent aisément les mots familiers (*bateau*, *monsieur*...) mais sont pratiquement incapables de lire des pseudo-mots (*sarnieu*). Ce tableau peut s'expliquer par un déficit sélectif du système non lexical associé à une préservation du système lexical. La "dyslexie de surface" caractérise des patients dont les principales difficultés en lecture portent sur les mots irréguliers (exemple : le "ch" de *écho* est lu comme dans *chat*) alors que les mots réguliers et les pseudo-mots sont en général bien lus. Ce tableau, miroir du précédent, s'explique si l'on suppose que, l'autre système étant touché, c'est le système non lexical qui prend en charge le traitement de tous les stimuli écrits. Enfin, dans le cas de la "dyslexie profonde", les patients ne parviennent pas à lire des pseudo-mots, mais de plus, ils com-

mettent fréquemment de surprenantes erreurs "sémantiques", lors de la lecture de mots familiers comme, par exemple, avec le mot *lion* qui est lu *tigre*, ou *tulipe* lu *rose*, ou *coût* lu *argent*, ou encore *Belmondo* qui est lu *Delon*. Pour rendre compte de ces données, il faut supposer un double déficit fonctionnel : celui du système lexical et celui de la connexion reliant le lexique orthographique au lexique phonologique. La forme orale d'un mot ne pourrait alors être obtenue que sur la base d'un code sémantique peut-être insuffisamment précis, ce qui expliquerait les glissements sémantiques observés.

Nouvelles perspectives

Les dissociations dans les performances, observées dans les divers types de dyslexies acquises, semblent conforter l'existence d'un double système de lecture postulée dans le modèle cognitif décrit. Cependant, il devient actuellement possible de simuler l'apprentissage de la lecture en utilisant des réseaux multicouches de neurones formels. Les premiers résultats indiquent qu'un même réseau (ou système) peut être capable de traiter à la fois des mots et des pseudo-mots. De plus, il semble possible de reproduire certaines dissociations de performance, comme celles décrites par exemple dans les dyslexies phonologique et de surface, en pratiquant, sur le même réseau, des types différents de "lésions" (par exemple, abaissement du niveau général d'activation du réseau ou perturbation de certaines connexions). S'ils se confirmaient, ces résultats montreraient que l'observation, en pathologie, de dissociations de performance entre certaines tâches n'implique pas nécessairement une dissociation des systèmes de traitement sous-jacents.

THE MODELLING OF READING MECHANISMS - The study of various forms of acquired dyslexia seems to confirm the existence of a dual system of reading: lexical and non-lexical. However, the simulation of reading processes with connectionist networks may challenge this view.

Serge Carbonnel, maître de conférences à l'Université de Savoie, Laboratoire de psychologie expérimentale, psychologie cognitive et sciences de la cognition (URA 665 CNRS), GRD 978 CNRS, Université de Savoie, BP 1104, 73011 Chambéry Cedex.

LES MÉCANISMES DE PRODUCTION DU LANGAGE ORAL

La nature des processus cognitifs qui sous-tendent la production du langage oral peut être mise en évidence par le biais de l'étude d'erreurs de production.

Sylviane Valdois

Tout acte de parole nécessite la mise en jeu de traitements cognitifs complexes. L'approche neuropsychologique vise à déterminer quelles sont les étapes et les opérations qui sous-tendent la production de mots et de phrases à travers l'étude des erreurs de production.

L'analyse montre que ces erreurs obéissent à des règles précises. Lorsqu'un locuteur substitue un mot à un autre, il tend à produire un mot sémantiquement proche (proximité de sens) mais phonologiquement éloigné (distant quant à la forme sonore) du mot attendu, par exemple : *je me suis coupé les doigts* (au lieu de *ongles*). Dans d'autres cas, le mot produit est phonologiquement proche du mot cible mais véhicule un sens très différent, par exemple : *Elle a une liaison gauche* (au lieu de *lézien*). Donc, le plus souvent, mot produit et mot attendu présentent une proximité de sens ou de forme mais pas les deux simultanément. Garrett (1982) suppose que pour produire un mot dans le contexte d'une phrase, un sujet doit accéder à une information lexicale stockée en mémoire. Cet accès se ferait en deux temps : une première étape où la recherche est uniquement basée sur le sens et une deuxième étape où la forme phonologique du mot sera recherchée. En situation de "manque du mot", lorsqu'il peut donner une définition ou un synonyme du mot qu'il est par ailleurs incapable de produire, le locuteur semble avoir franchi la première étape mais non la seconde.

Deux niveaux d'erreurs

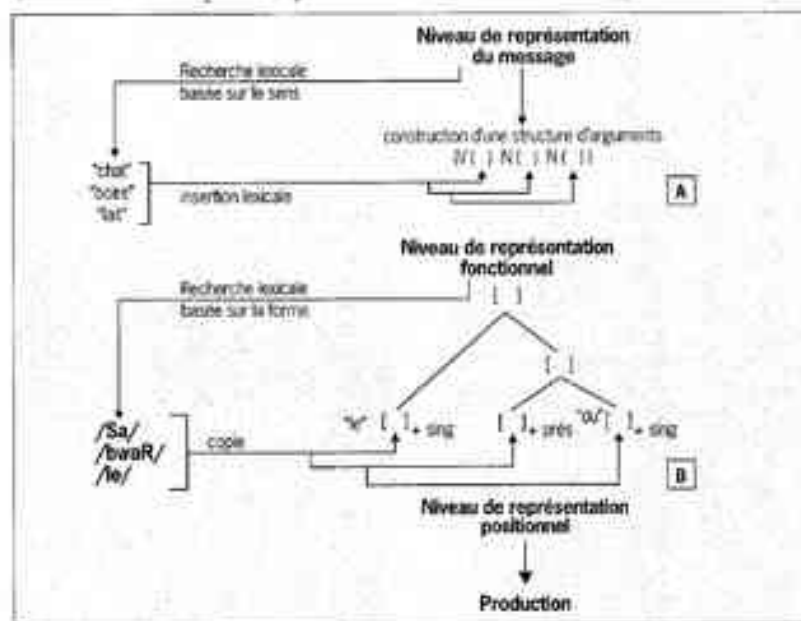
D'autres erreurs se caractérisent par l'intervention de deux mots de la phrase. Considérons l'exemple suivant : *La semaine dernière ce sera le prochain cours*. Les mots *dernier* et *prochain* ont été interchangés. L'échange concerne des mots qui diffèrent quant à la forme mais sont apparentés quant au sens. Garrett (voir figure) suppose que ces erreurs se produisent à un niveau de traitement, le niveau fonctionnel, où plusieurs syntagmes sont planifiés simultanément et où les mots sont spécifiés sémantiquement mais non phonologiquement.

L'échange résulterait d'une erreur d'assignation lorsque les items lexicaux sont insérés dans la structure syntaxique (en A sur la figure). Il faut encore remarquer que l'acronyme en genre des mots *dernier* et *prochain* a également été modifié lors de l'intervention. On suppose que les informations grammaticales de ce type sont directement rattachées à la structure syntaxique. Ainsi, le mot *dernier* qui a été par erreur inséré dans une position spécifiée "féminin" sera produit *dernière* et non *dernier*.

Les erreurs concernant les sons qui constituent les mots semblent quant à elles se produire à un autre niveau de traitement, le niveau positionnel (voir figure). Considérons l'exemple *une feuille de*

THE MECHANISMS OF SPEECH PRODUCTION - Spontaneous speech errors made by non-brain damaged or by aphasic subjects are governed by strict rules which reveal the nature of the cognitive system that underlies oral production. These lapsus highlight the existence of several processing levels and mechanisms that can be computerized.

tée. Les mots seraient copiés segment par segment lors du transfert du lexique dans la structure phrasique. Les interventions de sons résulteraient d'une erreur d'assignation lors de ce transfert (en B sur la figure). Néanmoins, le modèle de Garrett reste peu détaillé et de nombreuses recherches tentent de préciser quels sont les unités et les processus mis en jeu lors du traitement phonologique de l'information. De nouvelles voies de recherches s'ouvrent également avec la possibilité de simuler ces comportements langagiers sur ordinateur par le biais de modèles connexionnistes de type neuromimétique.



Modèle de production de phrase (adapté de Garrett, 1984).
A Construction de la phrase : "le chat boit du lait".

paye produit *une feuille de fuyt* où les sons initiaux des deux substantifs ont été intervertis. Ce type d'erreur concerne en général des mots voisins qui ne sont pas sémantiquement reliés. Ces erreurs se produisent à un niveau de traitement où la forme phonologique du mot est représen-

Sylviane Valdois, chargée de recherche au CNRS, Laboratoire de psychologie expérimentale, psychologie cognitive et sciences de la cognition (URA 665 CNRS), GDR 978 CNRS, Université Pierre Mendès-France, Bât Sciences humaines et mathématiques, BP 47X, 38040 Grenoble Cedex.

Raisonnement

L'étude du raisonnement relève traditionnellement de la logique pour ce qui concerne les propriétés formelles des opérations permettant de passer de prémisses à des conclusions par des inférences justifiées, et de la psychologie pour les conditions mentales, comportementales, voire sociales, dans lesquelles s'effectuent ces activités chez l'être humain. On peut distinguer deux grands niveaux d'analyse psychologique du raisonnement. Le premier est celui de la macrostructure de l'activité ou du discours : il s'agit des *raisonnements longs* mis en jeu dans les situations d'acquisition de connaissances et de certains apprentissages, d'argumentation, de démonstration, de résolution de problème et de conduite de dispositifs complexes. Les concepts pertinents pour l'analyse de ces situations sont ceux de but et de stratégie. Le second niveau est celui de la microstructure : il s'agit des *raisonnements courts* qui forment la maille des premiers ; ils consistent, par exemple, à transformer une proposition en une autre proposition logiquement équivalente, produire la conclusion d'un syllogisme, appliquer un schéma déductif propositionnel ou hypothético-déductif, découvrir un principe de catégorisation. On voit à quel point ces activités occupent une place centrale dans la cognition.



P. Klee, *Äußerer am Vorabend* (1933), coll. part. ICI ADAGP Paris 1992, Edimediart.

La psychologie cognitive, de concert avec la pragmatique du langage, a mis en évidence l'ina-
déquation des logiques classiques pour rendre compte, à elles seules, des comportements du sujet raisonnant. Cependant, quelles que soient les limites de son rôle *descriptif*, la logique apporte une première contribution significative à l'étude cognitive du raisonnement grâce à sa fonction *normative*, qui permet la mise en évidence et l'analyse des erreurs de raisonnement. On a ainsi bien établi au cours de ces deux dernières décennies : la médiocrité de la performance des individus dans toute une variété de tâches déductives et inductives ; l'effet considérable du contexte et du contenu des énon-

cés sur la performance, tout en maintenant constante la structure logique des énoncés ; l'influence des croyances, l'individu ayant tendance à accepter ou à rejeter une conclusion selon qu'elle est ou non congruente avec ses croyances ; enfin, l'existence de différences de performance marquées d'un individu à l'autre, et, de façon plus inattendue, chez un même individu.

L'étude de certains raisonnements courts à partir de leur formulation linguistique a suscité dès le milieu des années 1950 de nouveaux développements sur le versant sémantique de la logique, conciliant sa rigueur formelle avec des capacités

expressives plus étendues que celles de la logique classique. Hintikka et Kripke sont ainsi parvenus à rendre compte formellement des mécanismes déductifs associés aux attitudes propositionnelles (croire que p...), et aux modalités (il est nécessaire que p...). Le même travail était entrepris par Prior pour quelques concepts temporels.

Cette préoccupation se retrouve aujourd'hui au carrefour de deux importants courants de recherche. En premier lieu, l'extension des domaines d'application de l'informatique conduit à définir des formalismes dont le pouvoir expressif les rend aptes à traduire l'expérience pratique ; en même temps, on étudie systématique-

ment une grande variété de formes de raisonnement en vue de les implanter sur des machines (abduction, induction, analogie, planification des actions). Le raisonnement révisable, qu'il soit explicitement associé à l'évolution temporelle ou qu'il résulte de la gradualité des prédicats est aussi un thème important. Par les contraintes computationnelles qu'elles doivent satisfaire, ces recherches fournissent un cadre procédural, incomplètement exploité jusqu'ici, qui permet de formuler – et par conséquent de mettre à l'épreuve – de nouvelles hypothèses psychologiques sur le raisonnement.

La rencontre de la logique, du langage et de l'informatique ouvre une deuxième voie d'accès. Bien que le raisonnement se manifeste aussi par tel ou tel type de comportement (action), il n'en reste pas moins qu'il s'exprime avant tout par des énoncés linguistiques. Or, depuis les travaux de Montague, un très important courant de recherches s'est donné pour objectif la construction d'une sémantique formelle du langage naturel, exprimée dans le cadre de la théorie des modèles. Ces travaux portent sur le lexique et la phrase, mais ils ont plus récemment été étendus au discours par Kamp, qui a défini le cadre théorique permettant algorithmiquement de construire la représentation d'énoncés qui pourraient être des raisonnements. Il apparaît, certes, que la "mécanisation" de l'interprétation du discours est un vaste chantier qui soulève des problèmes considérables, tant au point de vue déductif (par exemple pour la "révision des connaissances" liée au traitement des séquences de phrases) que par la nécessité d'insérer l'interprétation dans un contexte prag-

matique, comme l'ont montré les études de Smith sur la structure temporelle des groupes verbaux et celles de Aurnague et Vieu sur les relations spatiales. Il n'en reste pas moins que le calcul des structures discursives offre également un cadre où la logique et l'informatique sont directement mobilisées pour la description de raisonnements naturels.

La tendance en psychologie, jusqu'à ces dernières années, a été marquée par un certain repli vis-à-vis des formalismes, tout au moins dans leur variété syntaxique. Ainsi l'approche théorique la plus influente aujourd'hui est une approche purement sémantique, celle des *modèles mentaux* défendue par Johnson-Laird. Pour cet auteur, les individus raisonnent entièrement sans règles d'inférence. Ils construisent un modèle mental, c'est-à-dire une représentation de l'énoncé, fondée sur ses conditions de vérité, et ils envisagent une conclusion possible compatible avec ce modèle, puis ils cherchent s'il existe d'autres modèles de l'énoncé dans lesquels cette conclusion serait fautive. S'ils en trouvent, la conclusion est rejetée et dans le cas contraire elle est acceptée. Une autre approche influente, celle de Kahneman et Tversky, qui porte non seulement sur le raisonnement, mais aussi sur le jugement et la prise de décision, fait encore moins de place au formalisme puisqu'elle ne reconnaît même pas de "modèle de compétence" à expliquer. Ces auteurs postulent que les sujets appliquent des heuristiques, c'est-à-dire des principes simples et généraux qui ne prennent en compte que certains aspects des situations ou des énoncés sur lesquels porte le raisonnement et qui peuvent par conséquent être

inadéquats. Par exemple, à l'aide de l'heuristique de disponibilité, un individu base l'estimation de la probabilité d'un événement sur l'aisance avec laquelle il peut se rappeler des exemples de l'événement. D'autres chercheurs, comme Cheng et Holyoak, proposent que les individus raisonnent souvent en utilisant des structures de connaissance d'un niveau d'abstraction intermédiaire entre la mémorisation directe de l'expérience et des règles d'inférence de type syntaxique. De tels schémas de raisonnement seraient induits de l'expérience et leur évocation déclenchée par le contexte qui est souvent socialement déterminé, comme dans le cas des schémas de *permission* et d'*obligation*. Chaque schéma possède plusieurs règles de production stipulant une action et une condition. Lorsqu'un sujet raisonne apparemment logiquement, c'est parce que les règles de production du schéma donnent le même résultat que la règle de logique. Cependant, de façon significative, ceux qui font appel à un système de règles comme modèle de compétence pour le raisonnement déductif humain sont aussi ceux qui reconnaissent l'importance du rôle de la composante pragmatique (Braine), voire qui lui accordent avec Sperber et Wilson le rôle principal. Le défi, mais aussi la solution des problèmes posés par l'étude du raisonnement, est probablement dans la prise en charge de plus en plus complète, et parfois formelle comme dans les travaux de Searle et Vanderveken, des facteurs pragmatiques.

■ **Muriel Borillo**, directeur de recherche au CNRS.

■ **Guy Politzer**, chargé de recherche au CNRS.

PRÉDICATS GRADUELS ET MODALITÉS NUANCÉES

L'utilisation de prédicats graduels permet de modéliser certains types de raisonnements humains que la logique classique représenterait difficilement.

■ Didier Dubois,
Henri Prade

Pour l'essentiel, l'intelligence artificielle a mis l'accent sur la représentation symbolique des connaissances sur ordinateur. Elle a cherché à modéliser de cette façon la fraction de ces connaissances qui s'expriment à l'aide de mots, et les types de raisonnements humains qui utilisent ces représentations. Très naturellement, on a pour cela fait appel à la logique classique. On s'est vite aperçu de ses limites pour prendre en compte tous les types de raisonnement humain.

Parmi ces limites, on a observé que l'homme n'utilise pas toujours la notion de prédicats comme le fait la logique classique. Plus précisément, l'ensemble des situations qui forment l'extension d'un prédicat n'est pas toujours considéré sur un pied d'égalité. Par exemple, parmi les tailles qui correspondent au prédicat *grand*, certaines seront considérées comme plus conformes à l'idée de *grand* que d'autres, même dans un contexte donné. Dire d'un individu qu'il est *grand* c'est préférer lui attribuer par exemple une taille de 1,80 m plutôt que 1,75 m et de 1,75 m plutôt que 1,70 m. De même, quand on décrit un animal comme étant un *oiseau*, on préférera penser qu'il s'agit d'un moineau ou d'un oiseau semblable, plutôt que d'un pingouin. *Grand* et *oiseau* sont alors considérés comme des prédicats graduels, pour exprimer que leur extension est munie d'une relation de préférence entre situations plus ou moins typiques du prédicat; cette relation est parfois codée à l'aide d'un "ensemble flou".

Souvent, la gradualité d'un prédicat est liée à un continuum de situations sous-jacentes (un ensemble de tailles pour *grand*) qui interdit la définition d'un seuil

précis de démarcation entre le vrai et le faux (le prédicat est-il vrai pour telle situation précise ?). Ces prédicats sont souvent qualifiables à l'aide d'adverbes d'intensité tels que *très*, *peu*, etc. Plus généralement, la gradualité du prédicat est liée à la notion de typicalité : le moineau est un oiseau typique, le pingouin est un oiseau atypique.

Des règles de trois linguistiques

L'utilisation de prédicats graduels permet de modéliser notamment les raisonnements par interpolation ou extrapolation et le raisonnement révisable. Un exemple de raisonnement du premier type est le suivant :

A) *plus une tomate est rouge, plus elle est mûre*

B) *la tomate est très rouge*

C) *la tomate est très mûre*

La règle A est dite règle graduelle. De telles règles permettent d'exprimer des dépendances qualitatives de type "croissance" (plus... plus...) ou "décroissance" (plus... moins...), et de réaliser des "règles de trois" linguistiques. La représentation d'une règle graduelle correspond alors à l'expression d'une contrainte qui lie les interprétations préférées des parties condition et conclusion de la règle. L'utilisation d'un jeu de règles graduels correspondant à plusieurs situations-types, permet de réaliser des inférences sur des situations qui s'écartent des cas-types prévus par les règles. Ceci est réalisé en interpolant entre les conclusions-types, sur la base des degrés de préférence. C'est ce type de mécanisme qui est exploité dans beaucoup d'applications récentes de la logique floue.

Un exemple de raisonnement révisable est le suivant : considérons une base de connaissance contenant les trois règles :

les oiseaux volent

les pingouins sont des oiseaux

les pingouins ne volent pas

Si on sait que *Titi* est un oiseau, on soustaira en déduire (provisoirement) que *Titi* vole. Mais si on apprend ensuite que *Titi* est un pingouin, on reviendra sur cette conclusion hâtive pour affirmer que *Titi* ne vole pas. Ce type de raisonnement n'est pas conforme à la logique classique parce que l'acquisition de nouvelles informations peut invalider certaines conclusions déjà acquises. On peut l'expliquer par

la "gradualité" du prédicat *oiseau*. Il faut comprendre les oiseaux volent comme *plus un oiseau est typique, plus on est certain qu'il vole*. L'information incomplète *Titi est un oiseau* est interprétée en situant préférentiellement *Titi*, par défaut, parmi les oiseaux typiques. Si on apprend que *Titi* est un pingouin, on ne peut plus considérer qu'il est un oiseau typique, ce qui fait chuter à zéro la certitude de la conclusion *Titi vole* et permet d'appliquer alors sans incohérence la règle relative aux pingouins.

Nuancer les certitudes

Cet exemple montre que l'emploi de prédicats graduels conduit à nuancer la certitude des conclusions inférées. On pourra évaluer à quel point une conclusion peut être inférée (degré de certitude ou de nécessité), ou à quel point elle n'est pas incompatible avec l'état des connaissances (degré de possibilité). Le modèle d'incertitude ainsi dérivé ne doit rien aux probabilités, car son origine est liée à une relation de préférence (notion ordinale) et non au comptage additif de cas favorables. De plus, les probabilités ne permettent pas de distinguer entre les modalités (graduées) de nécessité et de possibilité, et de rendre compte de leur dualité, semblable à celle existant en logique modale (une proposition est certaine lorsque son contraire est impossible). Si une proposition a une probabilité faible, son contraire aura une probabilité forte. En revanche, ce n'est pas parce qu'une proposition est fort peu certaine que son contraire sera presque certain.

La formalisation des raisonnements liés à la gradualité des prédicats, et prenant en compte des notions de degré de typicalité, de possibilité et de certitude, est en plein essor. Elle repose sur des modèles numériques (théorie des possibilités, logique floue) ou symboliques (logiques dites "non-monotones" notamment). Ces résultats intéressent les sciences cognitives à divers titres, notamment pour vérifier expérimentalement la pertinence de nouvelles approches, vérifications qui n'ont jusqu'à présent concerné que la théorie des probabilités.

■ Didier Dubois, directeur de recherche au CNRS, Institut de recherche en informatique de Toulouse (URA 1399 CNRS).

■ Henri Prade, directeur de recherche au CNRS, Institut de recherche en informatique de Toulouse (URA 1399 CNRS), Université Paul Sabatier, 118, route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex.

GRADUAL PREDICATES AND GRADED MODALITIES - Certain types of human reasoning which classical logic cannot handle involve interpolation and defeasible reasoning. It is suggested that the latter can be formalized using graded modalities in a framework which departs from probability theory.

LE CALCUL D'ÉVÉNEMENTS : ENTRE LOGIQUE ET LANGAGE

Pour conduire des raisonnements en forme de dialogue sur la révision des connaissances, on associe principe de coopérativité et interprétation d'énoncés linguistiques.

Mario Borillo,
Bruno Gauvre

Immergés dans le flux du temps, comment semblons-nous raisonner pour mettre à jour nos connaissances sur le monde de l'expérience commune, déceler d'éventuelles incohérences qui les entraîneraient ? Imaginons une nouvelle policière dans laquelle Eve apprend à 15 heures que Max est sorti du salon à 13 h 15 ; plus tard, à 16 heures, elle apprend qu'il était dans la cuisine de 12 heures à 13 heures. Eve n'a aucun doute au sujet de ces informations. Comment varieront ses réponses à la question : "Max était-il dans le salon à 12 h 45 ?" (Fig. 1).

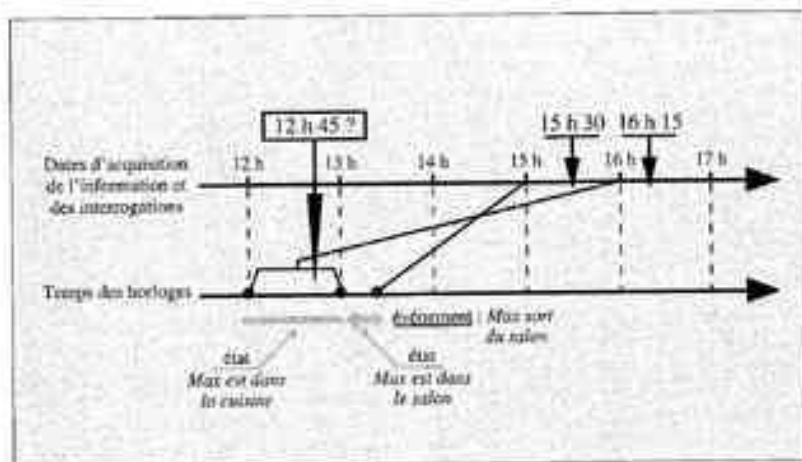


Fig. 1 - Évolution de l'information spatio-temporelle.

Si la question lui est posée à 15 h 30, elle répondra (c'est-à-dire que nous répondrions à sa place) : "oui c'est possible" ; car à ce moment-là, elle sait seulement que Max est sorti du salon à 13 h 15, donc qu'il a dû s'y trouver auparavant, sans pour autant qu'elle sache depuis quand.

Mais si la question lui est posée à

16 h 15, la réponse de Eve sera : "non, sûrement pas", puisqu'elle a entre temps acquis une information qui non seulement change la polarité logique de sa réponse, mais modifie également la nature de la certitude qu'elle peut lui attacher.

Un raisonnement par défaut

Cet exemple très simple suffit à illustrer le type de raisonnement que Kowalski & Sergot ont appelé "calcul d'événements". Quels sont les éléments qu'il met en jeu ? D'abord, un système de déduction qui est en l'occurrence celui de la logique du premier ordre. Ensuite, des informations spécifiques sur un ensemble d'événements (entrer, sortir...) créant ou annulant des états du monde (se trouver

dans / hors...). Enfin, des axiomes qui expriment la cohérence de l'expérience commune et que l'on peut regrouper en deux classes :

a) des règles sûres, comme la non-ubiquité des entités concrètes, la structure ordonnée du temps. Elles permettent de déduire à 16 h 15 que Max n'était sûrement pas dans le salon à 12 h 45 ;

b) des règles par défaut (ici, la persistance des états tant qu'on ne sait pas qu'un événement les a modifiés). Elles permettent de répondre à 15 h 30 qu'il est possible que Max ait été dans le salon à 12 h 45. Ce dernier type de réponse est révisable dans la mesure où elle a été calculée en utilisant l'axiome de persistance. Elle sera dite par défaut, et on distinguera le "oui par défaut" noté *d1* et le "non par défaut" noté *d0*, des "oui" et des "non" classiques, notés *I* et *O*.

En l'état actuel des recherches, le système qui implémente le calcul d'événements étendu permet également de

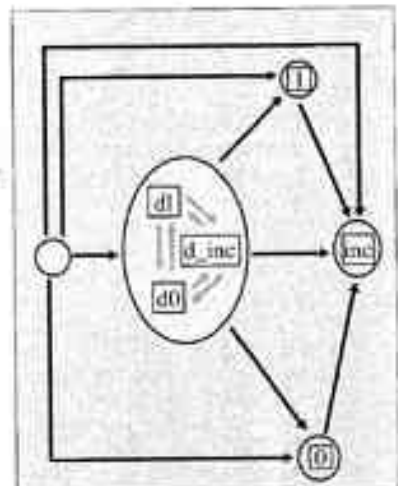


Fig. 2 - Un arc orienté quelconque $R_i \rightarrow R_j$ (ou R_i et R_j peuvent être n'importe lequel des sommets du graphe) signifie qu'il est possible, à partir de la réponse R_i du système, d'atteindre éventuellement la réponse R_j dans un état postérieur des connaissances.

distinguer deux types d'inconsistances, l'inconsistance classique notée *inc* et l'inconsistance par défaut notée *d-inc*. Il est remarquable que les résultats des raisonnements que l'on peut exécuter au cours du temps, par révision des connaissances, s'organisent selon le graphe de la figure 2.

Révision des connaissances, pragmatique et sémantique

Ce graphe, on le voit, n'est pas complet et un examen attentif des "transitions" possibles montre qu'elles s'ordonnent de telle manière que le comportement du sys-

CALCULATION OF EVENTS: BETWEEN LOGICS AND LANGUAGE - Within the functional framework of logical programming, an analysis of the way in which calculations regarding events are made offers the possibility of implementing an interactive question and answer system based on revisable knowledge. New features of the model improve cooperation and associate language interpretation to knowledge revision.

ème satisfait le principe de coopérativité dans le dialogue, plus précisément deux "maximes" de Grice selon lesquelles :

a) la contribution de l'interlocuteur, ici l'ordinateur, ne doit être ni plus ni moins informative qu'il n'est exigé pour la bonne conduite de l'échange ;

b) l'interlocuteur ne doit pas affirmer ce pour quoi il n'a pas de preuve suffisante.

Le calcul d'événements étendu apparaît ainsi comme doté de pertinence pragmatique au niveau global du dialogue. Mais son intérêt cognitif tient aussi à ce qu'il est possible de l'appliquer à des données qui sont le résultat de l'interprétation d'énoncés linguistiques. Par exemple, en définissant une sémantique formelle pour certains fragments du langage relatifs au temps (les temps verbaux, les adverbies temporels : *Mux sortira demain, il avait traversé hier...*) et à l'espace (les prépositions spatiales, les verbes de déplacement : *partir de, arriver à, entrer dans...*), les connaissances spatio-temporelles du système seront codées directement - et rigoureusement - à partir d'énoncés linguistiques, phrases ou discours.

Du point de vue logique et informatique, les propriétés théoriques du modèle et du démonstrateur ont été établies en s'inspirant des travaux de Poole sur la révision des connaissances et le raisonnement par défaut.

Ces recherches, qui n'en sont qu'à leurs débuts, esquissent une méthodologie qui incorpore dans un mécanisme déductif essentiel et l'interprétation d'énoncés naturels. Il sera peut-être intéressant pour le psychologue de comparer les performances du modèle théorique avec les réponses d'Ève à partir de sa propre "révision de connaissances".

■ **Mario Borillo**, directeur de recherche au CNRS, Institut de recherche en informatique de Toulouse (URA 1399 CNRS).

■ **Bruno Gauvre**, attaché temporaire d'enseignement et de recherche, Institut de recherche en informatique de Toulouse (URA 1399 CNRS), Université Paul Sabatier, 118, route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex.

LE RAISONNEMENT PAR ABDUCTION

Un raisonnement qui permet, en remontant des conclusions aux hypothèses, de déterminer les causes susceptibles d'expliquer un fait.

■ **Robert Demolombe**,
Luis Fariñas del Cerro

Depuis quelques années, nous voyons se développer en informatique l'étude d'un problème classique en philosophie, à savoir l'étude du raisonnement abductif. Le raisonnement abductif s'intéresse à la recherche des causes, ou des explications, d'événements observés dans des situations déterminées. Ainsi, par exemple, si on observe un fait A dans une situation B, qui peut être décrite en termes de liens reliant les causes (les hypothèses) et les effets (les conclusions), le raisonnement abductif permet, en "remontant" des conclusions aux hypothèses, de déterminer les causes (les hypothèses) susceptibles d'expliquer le fait A.

Les domaines d'application de ce type de raisonnement sont très nombreux, leur point commun étant la recherche d'explications. Considérons, comme exemple d'école dans le domaine du diagnostic, un moteur à explosion qui ne démarre pas, et dont on observe que la bougie ne donne pas d'étincelle. Supposons que la situation B soit décrite par les règles :

*Si bougies usagées ET temps humide
ALORS pas d'étincelle.*

Si batteries sèches ALORS pas d'étincelle.

Et par l'observation : *temps humide.*

Dans ce cas, un raisonnement abductif permet de "conclure" que les deux seules explications sont : *bougies usagées*, et *batteries sèches*. Ces "conclusions" sont obtenues en recherchant les ensembles d'hypothèses qui permettent de déduire, si elles s'avèrent satisfaites, qu'il n'y a pas d'étincelle. Parmi ces hypothèses, on distingue celles dont on sait, dans la situation B, qu'elles sont satisfaites, par exemple : *temps humide*, et celles dont on ne sait rien. Ce sont ces dernières qui sont produites par le raisonnement comme des explications potentielles.

Classer selon la vraisemblance

On peut avoir une information plus fine qui permette de classer les hypothèses (avec une relation d'ordre) selon qu'elles sont jugées plus ou moins vraisemblables. Cette information est généralement de nature empirique. Elle est très importante dans un exemple réel, car le nombre d'explications possibles peut être très grand. Dans ce cas, seules les explications les plus plausibles seront retenues.

Pour notre exemple, on peut supposer que l'explication *batteries sèches* est moins plausible que *bougies usagées*, et ne retenir que l'explication *bougies usagées*.

Les recherches récentes sur le raisonnement abductif combinent un raisonnement qui est valide et un raisonnement, faisant intervenir des hypothèses, qui conduit à des conclusions plus ou moins plausibles. Ces recherches sont importantes et prometteuses sur le plan théorique puisqu'elles prennent en compte, dans un cadre homogène, des informations considérées habituellement comme qualitatives (vrai ou faux), et quantitatives (probabilités, degrés de possibilités etc.).

REASONING BY ABDUCTION - Abduction deals with the research for causes or with the explanations events observed under specific situations. A valid premise is combined with a premise including hypotheses. The result is a more or less plausible conclusion.

■ **Robert Demolombe**, ingénieur de recherche à l'ONERA, Centre d'études et de recherches de Toulouse, 2, avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse Cedex.

■ **Luis Fariñas del Cerro**, directeur de recherche au CNRS, Institut de recherche en informatique de Toulouse (URA 1399 CNRS), Université Paul Sabatier, 118, route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex.

LE RAISONNEMENT INDUCTIF

L'analyse du raisonnement inductif ne peut être conduite sur le seul plan syntaxique.

Jacques Dubucs

L'inférence suivante est typique d'un raisonnement inductif :

A l'Hôpital Necker, tous les patients qui présentent le symptôme S sont atteints de la maladie M.

Tout patient présentant le symptôme S est atteint de la maladie M.

L'induction est donc un raisonnement ampliatif (la conclusion va au-delà des données consignées dans les prémisses), faillible (la conclusion peut être démentie par des observations plus étendues) et graduel (la conclusion est d'autant plus sûre que les données en sa faveur sont nombreuses et variées).

Logique de l'induction.

La logique inductive est une approche essentiellement quantitative (probabiliste), dans laquelle on cherche à définir le degré auquel la conclusion d'un argument inductif est "supportée" ou "confirmée" par ses prémisses. On parvient aisément,

pour des langages de description assez pauvres, à construire des mesures de confirmation qui tiennent compte à la fois de la taille des données (l'hypothèse étiologique de notre exemple est mieux confirmée si l'hôpital de référence est important) et de leur variété (à nombre d'observations égal, l'hypothèse est mieux confirmée si cet hôpital accueille des patients d'âge et d'antécédents médicaux très disparates).

Toutefois, cette approche syntaxique semble incapable d'expliquer pourquoi l'on doit rejeter l'induction suivante, qui repose sur les mêmes données que la première, qui est concluante au même degré qu'elle, mais qui donne lieu à des prédictions exactement opposées à propos des patients hospitalisés ailleurs qu'à Necker :

A l'Hôpital Necker, tous les patients qui présentent le symptôme S sont atteints de la maladie M et hospitalisés à Necker, ou bien atteints de la maladie M et hospitalisés ailleurs.*

Tout patient présentant le symptôme S est atteint de la maladie M et hospitalisé à Necker, ou bien atteint de la maladie M et hospitalisé ailleurs.*

INDUCTIVE REASONING - The analysis of an example demonstrates both the significance as well as the limits of a purely syntactic approach of inductive inference.

Pragmatique de l'induction

Le contre-exemple précédent (paradoxe de Goodman) montre que seuls certains prédicats, dits projectibles, peuvent figurer dans une inférence inductive : être atteint de la maladie M est dans ce cas, mais pas être atteint de la maladie M* et être hospitalisé à Necker, ou être atteint de la maladie M* et être hospitalisé ailleurs. Comme il paraît impossible de donner un critère purement syntaxique de la projectibilité, l'analyse logique de l'induction doit être relayée par une analyse pragmatique visant à déterminer les prédicats pertinents dans le contexte cognitif où les inférences sont effectuées ; à l'inverse de la situation qui prévaut dans le domaine déductif, la correction d'une inférence inductive dépend du domaine particulier (médecine etc.) dans lequel elle intervient.

Jacques Dubucs, chargé de recherche au CNRS, Institut d'histoire et de philosophie des sciences et des techniques (URA 1079 CNRS), Université Paris 1, 13, rue du Four, 75006 Paris.

CNRS - AUDIOVISUEL

1, place Antide-Bonard 92495 Meudon Cedex

UN AUTRE PAS COMME LES AUTRES

Étude sur la représentation de soi chez l'enfant de 19 à 26 mois. Des enfants de différents âges sont placés devant un miroir, puis devant une vitre, face à un autre enfant afin d'étudier leurs réactions et leurs attitudes dans ces deux situations. À partir de 18 mois, apparaît chez les enfants un comportement étrange de fascination et d'inquiétude provoqué par la vue de leur propre reflet, qui se manifeste par l'évitement du regard et le détournement de l'image perçue. (L'expérience est également menée avec des singes et des chiens).

Auteur scientifique : René Yarni
Réalisateur : Jean Dominique Lapoux
Production : CNRS Audiovisuel
26 min - 1981

Film 16 mm et vidéo. Grand public et public spécialisé.

LA SYNTAXE DU REGARD

Étude de la stratégie oculomotrice appliquée à l'esthétique expérimentale

La syntaxe du regard est dictée au cerveau par les mouvements des yeux. L'esthétique expérimentale tente, pour mieux saisir l'œuvre, de comprendre le regard. Les mouvements des yeux sont ici étudiés grâce à la technique électro-oculographique (quatre électrodes détectent les variations de potentiel crâniens par le mouvement relatif de l'œil), les sujets étant mis en présence d'œuvres de Monet, Klee, Warhol, Mondrian et Van Der Velden.

Auteurs scientifiques : François Molnar et L. Dufailly
Réalisateur : Philippe Lavallois
Production : CNRS Audiovisuel (SHERIDAN)
17 min - 1978

Film 16 mm et vidéo. Public averti et spécialisé.

LE RAISONNEMENT ANALOGIQUE

Un mode de raisonnement qui utilise une situation déjà connue pour expliquer une situation nouvelle.

■ Louis Bourrelly,
Eugène Chouraqui

L'analogie est un mode de raisonnement non valide qui participe par là-même à la création. Elle est souvent mise en œuvre dans des processus cognitifs variés (apprentissage, explication, argumentation, résolution de problèmes, etc.), et a été étudiée sous divers aspects – philosophique, psychologique, linguistique, rhétorique – et plus récemment par l'intelligence artificielle. Sa méconnaissance l'a jusqu'à présent laissée à l'écart des modélisations logicielles.

ANALOGICAL REASONING - Analogy is a common-sense reasoning which makes use of a well-known situation to explain a less well-known one. The comparison of these situations is based upon relevant criteria. By means of a complex process, a pattern of analogical reasoning is developed.

C'est un mode de raisonnement qui s'appuie sur la connaissance d'un objet (la base) pour inférer de nouvelles connaissances sur un objet moins connu mais donné (la cible). Il ne peut être activé que si le raisonnement déductif n'est pas à même de fournir le résultat attendu ou si sa complexité est rédhibitoire.

Le raisonnement analogique consiste à transférer une propriété ou un ensemble structuré de propriétés et/ou de relations – appelé la propriété-analogique – de la base à la cible, puis à inférer à partir de ce transfert, si cela est nécessaire, de nouvelles propriétés de la cible.

Ce processus se décompose selon les étapes suivantes :

1. Le rappel de la base. Il s'agit là de trouver dans la mémoire la base adéquate à la cible et aux questions qu'elle pose. Cette recherche est fondée sur des opérations de comparaison entre des propriétés supposées pertinentes de la cible et de la base.

2. Le calcul de la propriété-analogique. Dans le cas général, la propriété-

analogique doit être calculée à partir des lois qui régissent la base. Sur le plan cognitif, il est probable que ce calcul est fondé sur la déduction.

3. Le transfert analogique. On appelle transfert analogique la décision que la propriété-analogique mise en exergue dans la base doit être aussi une propriété de la cible. Si la propriété à transférer n'est pas compatible avec la partie connue de la cible, alors la base choisie doit fournir une autre solution, ou elle est abandonnée.

4. Le calcul de la réponse au problème posé. La propriété-analogique peut être la réponse attendue, auquel cas le raisonnement est terminé. Dans le cas contraire, il faut que cette propriété-analogique soit utilisée dans le processus du calcul de la réponse.

5. La validation du résultat obtenu. Comme le résultat a été obtenu à l'aide d'un raisonnement non valide, il est nécessaire d'évaluer sa pertinence dans le contexte de sa production.

De nombreux points à éclaircir

Ce modèle général du raisonnement analogique comporte de nombreux points encore non ou mal éclaircis qui font actuellement l'objet de travaux de recherches multidisciplinaires. En premier lieu, soulignons les questions que pose le rappel de la base : comment le problème posé et le contexte dans lequel il se pose sont-ils utilisés pour choisir telle ou telle base ? Quand plusieurs bases sont candidates, quels sont les critères de sélection ? Quel rôle joue la formulation du problème dans la mise en correspondance de la cible et de la base ? Au niveau des calculs de la propriété-analogique et de la réponse au problème posé, plusieurs solutions peuvent être proposées : comment les évaluer et juger de leur pertinence ? L'exemple présenté sur la figure illustre simplement quelques-unes des questions évoquées ci-dessus.

DESSOUS → DESSUS

DEBOUT → ?

On peut voir dans cette analogie au moins deux acceptions :

- prendre l'opposé du sens, ce qui conduirait au résultat "COUCHE"
- supprimer la lettre O, ce qui conduirait au résultat "DEBUT".

■ Louis Bourrelly, ingénieur d'études au CNRS, Groupe de représentation et traitement des connaissances (UPR 270 CNRS).

■ Eugène Chouraqui, professeur à l'Université Aix-Marseille III, directeur du Groupe de représentation et traitement des connaissances (UPR 270 CNRS), 11, chemin Joseph Aiguier, 13402 Marseille Cedex 09.

L'ANALOGIE DANS L'APPRENTISSAGE DES DISPOSITIFS DE COMMANDE

Le sujet humain n'utilise pas spontanément l'analogie quand il recherche la solution d'un problème. Il y a recours lorsqu'il s'agit d'apprendre des concepts entièrement nouveaux pour lui.

Anh Nguyen-Xuan

Le raisonnement par analogie est cognitivement économique. De nombreuses expériences en psychologie ont cependant montré que lorsqu'il cherche à résoudre un problème, le sujet humain a beaucoup de difficultés à évoquer une situation analogue familière. C'est dans les situations d'apprentissage des dispositifs de commande qu'on a largement observé un phénomène inverse : une situation familière s'impose souvent de façon inévitable. Nous allons montrer pourquoi.

Un dispositif de commande est un système de traitement de l'information avec des moyens d'entrée et de sortie, et des opérateurs élémentaires de traitement de l'information. Une calculatrice de poche, un traitement de texte, un langage de programmation sont des exemples de dispositifs de commande. La plupart des dispositifs de commande sont indépendants d'un domaine de connaissance parti-

opérateurs ou séquences d'opérateurs. Cette connaissance peut être apprise à partir de la notice d'utilisation :

- la connaissance sur les résultats de l'application d'un opérateur ou d'une séquence d'opérateurs, c'est-à-dire ce que permet d'obtenir telle ou telle commande, ou séquence de commandes. C'est cette connaissance qui permet d'envisager les résultats intermédiaires (des sous-but) qu'on doit obtenir afin d'arriver au résultat final dont le sens est défini dans un domaine de connaissance spécifique. Elle doit être acquise par la pratique, car les problèmes qu'on peut résoudre avec le dispositif sont trop variés pour que le constructeur du dispositif puisse en faire un inventaire exhaustif et donc en prévoir les solutions.

Commencer par des exercices

Par conséquent, pour apprendre à se servir d'un dispositif de commande, l'apprenant doit faire des exercices, c'est-à-dire résoudre des problèmes. Ceux-ci

appartiennent forcément à un domaine de connaissance défini. Par ailleurs, les exercices doivent être suffisamment familiers pour l'apprenant, car l'objectif n'est pas d'apprendre des connaissances du domaine en soi, mais apprendre à utiliser le dispositif. C'est pourquoi on donne en général aux novices des exercices qu'ils savent résoudre hors dispositif. Par exemple, écrire un programme en LOGO pour faire un triangle rectangle quelconque est un exercice (peut-être difficile) pour un élève de

4^{ème} qui débute l'apprentissage du langage LOGO ; cependant, cet élève sait parfaitement ce qu'est un triangle rectangle quelconque et comment le dessiner à l'aide d'un compas et d'une règle.

Ainsi, en référence au domaine de connaissance auquel appartiennent les exercices, ceux-ci sont des situations familières pour l'apprenant. Les mêmes problèmes sont pour lui non familiers lorsqu'il doit les résoudre en utilisant les opérateurs du dispositif qu'il maîtrise mal. Mais comme il sait résoudre hors dispositif

ANALOGY IN LEARNING HOW TO HANDLE CONTROL DEVICES - When looking for a solution to a new problem, normally, individuals do not reason by analogy because a relevant analog is not readily retrieved from long-term memory. However, there is an exception: when learning how to use a control device, analogical transfer is spontaneously applied.

les problèmes posés, il dispose donc d'une manière de s'en sortir : conduire le raisonnement de recherche de la solution en termes des sous-but (c'est-à-dire des résultats intermédiaires) que permettent de réaliser les opérateurs dont il est familier, puis essayer de produire ces résultats intermédiaires avec les opérateurs du dispositif. Par exemple, la règle, l'équerre et le compas sont des opérateurs familiers pour dessiner à la main des figures géométriques. Si l'élève veut faire un programme LOGO pour produire sur l'écran d'ordinateur un triangle rectangle, il est tenté de concevoir le programme comme s'il dessinait la figure à la main, avec les sous-but successifs : obtenir un angle droit avec l'équerre, déterminer deux points quelconques sur les deux côtés de l'angle droit, obtenir le triangle en joignant ces deux points. Cette structure de sous-but n'est pas facile à réaliser en LOGO, ce qui amène à des tentatives de résolution vouées à l'échec... d'où un risque de "blocage", à moins que l'apprenant ne revise sa façon de penser le problème.

Le phénomène de transfert analogique dans les situations d'apprentissage de dispositifs de commande n'a pas toujours que des effets négatifs susceptibles de créer un blocage chez l'élève. Les difficultés surgissent surtout dans deux cas :

- lorsqu'une structure de sous-but empruntée à la situation familière est telle que la réalisation par le dispositif de certains résultats intermédiaires empêche la réalisation d'autres résultats intermédiaires ;
- lorsqu'il faut combiner plusieurs opérateurs élémentaires du dispositif pour produire un résultat alors que, dans la situation familière, ce même résultat est obtenu par l'application d'un seul opérateur élémentaire.

Anh Nguyen-Xuan, directeur de recherche au CNRS, unité Psychologie cognitive du traitement de l'information symbolique (URA 1297 CNRS), Université Paris VIII, 2, rue de la Liberté, 93526 Saint-Denis Cedex 02.



Station de travail pour conception assistée par ordinateur de moteur électrique. (ICI CNRS - LEG).

culier : ce sont des outils pour atteindre des buts (c'est-à-dire obtenir des résultats) dont le sens est défini hors du dispositif. Par exemple, on peut utiliser le langage FORTRAN pour faire un programme de résolution d'équations (domaine des mathématiques), ou bien un programme pour gérer un stock de marchandises (domaine de la gestion). Pour savoir utiliser de façon optimale un dispositif de commande, on doit acquérir deux types de connaissances :

- la connaissance sur la façon d'activer les

RAISONNER POUR PLANIFIER

Les spécificités de l'opérateur humain apparaissent comme des éléments importants dans la conception d'un système de génération de plans.

**Claude Barrouil,
Véronique Royer**

L'objet de la "planification" est de proposer à un utilisateur, homme ou machine, un "meilleur" plan d'action pour atteindre un objectif assigné. Les applications potentielles sont nombreuses : conduite de systèmes autonomes ou aide à la téléopération, aide à la décision, planification d'expériences, gestion de ressources, conduite d'atelier de production, aide au commandement sur le champ de bataille... Il convient de distinguer plusieurs aspects :

- la génération de plan proprement dite, dont l'objet est de répondre à la question : quelles actions ?

- l'ordonnancement qui cherche à répondre à la question : quand exécuter les actions ?

- l'aide à l'opérateur, qui couvre les problèmes de saisie de l'intention et de communication des résultats et permet de répondre à la question : pour quoi faire ?

Les deux premières questions sont évidemment étroitement liées dans une application particulière, mais les méthodes de résolution sont totalement différentes : en génération de plans, on utilise un moteur d'inférence pour exploiter un modèle du monde et des actions, alors qu'en ordonnancement, on se ramène à l'exploration d'un graphe de recherche, de taille souvent très importante.

Produire un plan d'action

Dans les cas les plus simples, l'objectif est de produire, hors ligne, un plan d'action. Pour les applications à la conduite de systèmes plus complexes, à forte autonomie (robot mobile, systèmes spatiaux...), il faut se placer dans le cadre de fonctionnement en boucle fermée. Le système de planification prend des décisions sur la base de croyances courantes, elles-mêmes mises à jour par fusion d'informations en provenance du monde réel. Le processus décisionnel peut être simplement réactif, c'est-à-dire que les décisions sont prises sur la base de règles de type *si* [croyance] *alors* [décision]. Cette approche a l'avantage de déboucher sur des réalisations simples ; malheureusement, elle ne permet pas de garantir que les décisions ainsi produites permettent d'atteindre l'objectif assigné.

Pour tenter d'apporter ce type de garantie, les méthodes de génération de plan reposent sur une modélisation des effets de l'exécution des actions sur le monde, dans le temps, et font l'objet de recherches actives depuis une vingtaine d'années. La formulation usuelle est basée sur la logique mathématique : le monde est décrit par un ensemble de propositions. Le concept de temps peut être introduit soit par la notion de date, soit par la notion d'intervalle temporel ; il permet de définir une action comme un changement de valeurs des propriétés. Le concept est large : il couvre à la fois les concepts d'action et de défaillance. Le



Le poste de contrôle du robot mobile autonome DAREUS (Démonstrateur Autonome à Rapidité de Déplacement pour la Surveillance - Document Essai Électronique, DGA/ONET).

choix d'un formalisme satisfaisant est encore du domaine de la recherche.

Un premier problème est d'utiliser les outils de la logique mathématique pour exprimer le changement. La spécification de ce qui ne change pas fut l'un des premiers problèmes difficiles identifiés. Une solution consiste à décrire les changements par une liste de conditions d'application et d'effets, et à postuler que les seuls changements sont ceux spécifiés dans ces listes (modèle STRIPS). Dans ce cadre, on sait construire un plan d'action, généralement par chaînage arrière à partir des objectifs. En pratique, l'usage de ces méthodes est limité aux problèmes académiques, en raison du mode de modélisation trop simple du monde. Des efforts de recherches sont actuellement consacrés à la représentation de mondes et de croyances mieux adaptés aux problèmes

réels, et aux modes de raisonnement qui doivent leur être associés. Par exemple, il est très important de pouvoir déterminer tous les effets d'une action, notamment les effets secondaires (après avoir déposé un objet sur une table, si cette dernière est trop chargée, elle casse). Inversement, on veut pouvoir garantir les effets d'une action, et pour cela il faut en identifier toutes les préconditions.

Nécessité d'une approche cognitive globale

En ce qui concerne les fonctionnalités de communication coopérative et d'aide à l'opérateur, d'autres types de connaissances doivent être pris en compte : connaissances stratégiques, heuristiques, modélisations des intentions, des intérêts... Ces connaissances ne peuvent être circonscrites au problème de l'interface, elles rejaillissent sur les problèmes de planification pure. En effet, dans le cadre de systèmes relativement complexes, les différentes phases de la boucle classique "perception, évaluation, décision, action" ne peuvent être considérées comme étant complètement indépendantes les unes des autres et pouvant être traitées en séquence. Typiquement, l'analyse et l'interprétation d'une scène peuvent dépendre des objectifs de la mission assignée au système. De même, la révision d'un plan qui suit une révision des croyances est en général conditionnée par un ensemble de critères de pertinences liées aux conditions d'utilisation du système et à sa stratégie globale. L'interdépendance entre ces divers types de connaissances et les diverses fonctionnalités du système de planification rend nécessaire une approche cognitive globale, seule capable de permettre une appréhension fine des processus de raisonnement pertinents dans un contexte d'aide à l'opérateur.

REASONING FOR PLANNING - Reasoning for planning is based on a representation of beliefs related to both environment and expected results. The development of efficient decision making tools today, requires the use of a wide framework which includes the human user.

Claude Barrouil, ingénieur de recherches à l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA), Groupe d'intelligence artificielle.

Véronique Royer, ingénieur de recherches à l'ONERA, Groupe d'intelligence artificielle, Centre d'études et de recherches de Toulouse, 2, avenue Edouard Belin, BP 4025, 31055 Toulouse Cedex.

RAISONNEMENT ET RÉOLUTION DE PROBLÈMES

Les raisonnements de nature heuristique apparaissent de plus en plus importants dans les activités de résolution de problèmes.

Jean-François Richard,
Daniel Kayser

Dans les situations de résolution de problèmes, le raisonnement est finalisé par la tâche : il s'agit d'atteindre un but déterminé sous certaines conditions et avec certaines contraintes. La validité n'est plus le premier critère, comme dans le raisonnement logique : ce qui est primordial, c'est de produire des hypothèses de solution dont la mise en œuvre permette d'atteindre le but, ou tout au moins de s'en rapprocher.

Le raisonnement en situation de résolution de problèmes résulte de l'interaction d'un certain nombre de processus qui ont différentes fonctions : production d'hypothèses de solution, réduction de l'espace de recherche, contrôle et évaluation. Ce sont :

- la construction de la représentation du problème. Il s'agit de construire une interprétation compatible avec les données de la situation, le but à atteindre, et les contraintes sur les moyens. Cette fonction est essentielle, car il y a généralement un grand nombre de façons de comprendre un problème, et il est souvent nécessaire de remettre en cause la première interprétation ;
- l'assimilation du problème à une classe de problèmes connue, pour laquelle on dispose de critères d'identification et d'une procédure de résolution ;
- l'activation de procédures connues pour atteindre le but dans un contexte similaire. Il s'agit là d'un mécanisme connu sous le nom de transfert analogique : il produit souvent des erreurs, mais ces erreurs permettent d'acquérir des informations sur la situation et de modifier la représentation du problème ;
- la mise en œuvre d'heuristiques, qui sont des règles générales d'action indépendantes du contexte du problème, et qui permettent de réduire l'exploration de l'espace-problème ;
- la mémorisation sélective d'événements critiques comme le contexte qui a permis d'atteindre un but ou un sous-but, la détection des impasses.

Planifier et explorer

La résolution de problèmes met en jeu deux types de conduites :

- des conduites de planification, lorsque

le sujet a une représentation adéquate de l'espace-problème ;

- des conduites d'exploration, qui permettent de rectifier la représentation de la situation, par le fait qu'une représentation erronée conduit à des impasses, et que, pour en sortir, le sujet doit violer des contraintes qui résultaient d'une interprétation inadéquate du problème. Ces conduites d'exploration, associées à la mémorisation d'événements critiques, produisent l'apprentissage par l'action grâce auquel le sujet découvre progressivement, de façon inductive, les propriétés de la situation qui sont critiques pour atteindre la solution.

On retrouve certaines des caractéristiques de la résolution humaine des problèmes dans les méthodes informatiques, et il n'y a rien d'étonnant à cela dans la mesure où ces caractéristiques dépendent de contraintes générales, et non du système de résolution. En dépit de leur capacité de mémorisation et de leur vitesse, les ordinateurs sont incapables d'explorer totalement l'espace des solutions d'un problème de taille réaliste.

Les premières tentatives en intelligence artificielle (IA) pour arriver à des méthodes générales de réduction de cet espace se sont soldées par des résultats plutôt négatifs, et l'on sait maintenant que – sauf s'il est guidé par des stratégies ayant des propriétés qui reviennent presque à exiger d'elles un procédé constructif de la solution – le raisonnement systématique nécessite l'exploration d'un espace dont la taille croît exponentiellement avec celle du problème à résoudre.

S'appuyer sur des connaissances locales

Ce résultat, qui montre la vanité de la recherche d'un mécanisme universel de résolution de problèmes, a conduit les chercheurs en IA à s'appuyer de plus en plus sur des connaissances locales concernant le domaine sur lequel on raisonne. Ceci présuppose que l'on sache les représenter et les utiliser à bon escient ; or, on constate une grande diversité dans le statut même de ces connaissances, et il convient de respecter cette diversité lors de leur mise en œuvre en machine. C'est pourquoi les recherches les plus récentes tentent d'identifier, puis de donner des

REASONING AND PROBLEM-SOLVING - Reasoning in problem-solving situations is the result of the interaction of different processes: construction of the problem-space, reduction of the problem-space, evaluation and control. Resulting behavior is mainly heuristic.

modèles rigoureux des différentes natures de connaissances, ou plutôt des différentes formes des raisonnements qui sont adéquats pour les exploiter.

Parmi ceux-ci, une forme de raisonnement, appelée raisonnement non-monotone, retient particulièrement l'attention en ce moment. En logique, si q est une conclusion valide d'un ensemble de prémisses $p_1, \dots, p_n$, elle le restera si l'on dispose d'un ensemble plus large $p_1, \dots, p_n, p_{n+1}, \dots, p_m$. Cette propriété du raisonnement logique, la monotonie, témoigne de ce que la logique n'exprime que des modèles trop idéalisés des situations ordinaires : en effet, la présence de $p_{n+1}, \dots, p_m$ peut signifier que l'on se trouve dans une situation exceptionnelle dans laquelle la conclusion q , quoique normale en présence de $p_1, \dots, p_n$, n'est plus assurée.

Cette situation, paradoxale aux yeux de la logique classique, est fréquente dans la vie quotidienne où, par économie ou par nécessité, l'on utilise beaucoup plus de normes que de lois infallibles. L'importance du raisonnement non-monotone pour les sciences cognitives apparaît de plus en plus clairement : la compréhension (de texte ou de scène) n'est en effet pas un processus qui, partant des données (les perceptions), aboutirait à un résultat (le sens) ; elle s'apparente beaucoup plus à une recherche d'équilibre entre différentes contraintes, dont le résultat est toujours provisoire, puisqu'il peut être remis en cause par la prise en considération de nouvelles informations.

Jean-François Richard, professeur des universités, directeur de l'Unité Psychologie cognitive du traitement de l'information symbolique (URA 1297 CNRS), Université Paris VIII, 2, rue de la Liberté, 93256 Saint-Denis Cedex 02.

Daniel Kayser, professeur à l'Université Paris-Nord, responsable de la Formation doctorale en intelligence artificielle commune aux universités Paris-Nord et Paris-VIII, LIPN, Université Paris-Nord, avenue Jean-Baptiste Clément, 93430 Villetaneuse.

L'ACQUISITION DES CONNAISSANCES

L'acquisition des connaissances pour les systèmes experts, initialement perçue comme une activité de transcription d'expertise, est maintenant davantage considérée comme un processus de modélisation, créateur de connaissances.

■ Jean-Paul Krivine

Faut-il imiter la démarche humaine ou simplement atteindre des performances analogues ? Pour les uns, seule "l'obligation de résultats" (les performances) doit être remplie. Pour d'autres, "l'obligation de moyens", est une condition nécessaire. Il n'est donc pas étonnant de retrouver ces deux influences dans les travaux en cours en "acquisition des connaissances".

Un système expert se doit de résoudre une tâche, généralement faite par un expert humain, là où aucune méthode systématique ne semble adaptée. La clé des performances du système va résider dans la qualité et la quantité des connaissances qui vont lui être fournies. Mais d'emblée, deux difficultés surgissent. D'une part, les connaissances pertinentes peuvent être difficiles d'accès : les experts humains savent résoudre efficacement des problèmes, mais pas nécessairement expliciter leur méthode. Par ailleurs, en supposant que ces connaissances puissent être extraites, on constate un grand décalage entre la forme sous laquelle elles sont exprimées et les formalismes actuels de représentation des connaissances.

Une première génération de systèmes experts

Tout d'abord, soulignons que les performances sont bien au rendez-vous. Le système MYCIN, développé au début des années 70, propose une thérapie jugée la mieux adaptée pour des cas de maladies infectieuses du sang (pas ultérieurement, de méningites). Le système va subir une véritable évaluation en double aveugle et ainsi montrer des performances comparables (validation statistique) aux meilleurs experts médicaux. Ces performances sont attribuées au fait que "l'obligation de moyens" semble également respectée.

Le balancier est à ce moment nettement du côté de "l'IA fortement anthropomorphique" (reproduction du raisonnement de l'expert). On prête alors aux formalismes utilisés par les systèmes experts (règles de production, réseaux sémantiques) d'importantes propriétés cognitives.

Mais la généralisation de l'expérience va faire surgir de nombreuses difficultés : explications fournies par les systèmes peu adaptées aux attentes des utilisateurs, performances très fragiles sur des cas atypiques, maintenance délicate des bases de connaissances, etc. Ainsi, *Digital Equipment* qui exploite un des tout premiers systèmes experts opérationnels et rentables (le système R1/XCON pour la configuration d'ordinateurs) a-t-il dû le reprendre complètement pour pouvoir gérer des évolutions qui remettaient chaque année en cause près de 50 % de la base de connaissances. La "transparence cognitive" apparaît n'être qu'illusion.

Construire un modèle, créer des connaissances

Le balancier va alors se déplacer vers une "IA plus indépendante". L'acquisition des connaissances et la construction d'un système expert sont maintenant clairement définies comme des activités de modélisation. Les chercheurs concentrent leurs travaux sur la définition de primitives de modélisation. Un des apports majeurs a été la constitution de bibliothèques de "tâches génériques". L'idée de base consiste à identifier dans des raisonnements complexes, des tâches élémentaires, indépendantes du domaine. Ces tâches génériques vont alors être formalisées et organisées dans des bibliothèques afin de pouvoir être réutilisées dans une grande variété d'applications. Ces bibliothèques apparaissent ainsi comme des "boîtes de legos" dans lesquelles le concepteur du système expert ira piocher les éléments qu'il jugera pertinents pour son application.

Dès lors, l'acquisition des connaissances se décompose en deux phases. Dans un premier temps, on va chercher à reconnaître le type de tâches que le système devra réaliser ("quels sont les legos les mieux adaptés au problème à résoudre ?"). Il s'agit à proprement parler d'une activité de modélisation créatrice de connaissances. Dans un second temps, le modèle élaboré va servir de base au recueil des connaissances : l'acquisition des connaissances est alors dirigée par un modèle de résolution.

Les modèles construits par cette approche ne sont plus des modèles de l'expert, ni des reflets de son raisonnement. Ce sont des modèles originaux et performants. Cependant, leur description en des termes compréhensibles par des experts humains leur confère une "plausibilité cognitive". Un expert ayant collaboré plusieurs années à la réalisation d'un important système, maintenant en cours d'industrialisation, résumait à sa façon les propriétés attendues : "ce n'est pas réellement comme ça que l'on raisonne, mais dans ce formalisme, avec ce modèle, on arrive à exprimer ce qui est indispensable".

Retour vers la psychologie cognitive

L'acquisition des connaissances, en prenant certaines libertés avec "l'obligation de moyens", a certes réduit ses ambitions, mais a permis des avancées pratiques incontestables. Cette relative prise de distance a été nécessaire pour progresser. Mais l'interdisciplinarité se traduit souvent par des points de rencontre très féconds, séparés par des routes distinctes. Aujourd'hui, l'acquisition des connaissances, avec ses méthodologies, ses "legos", ses tâches génériques, tend à se tourner de nouveau vers la psychologie cognitive pour lui demander d'évaluer ses résultats, d'évaluer la pertinence cognitive de ses modèles.

Il est d'ailleurs intéressant de noter que ces modèles, au départ originaux, peuvent avoir des effets en retour sur l'expertise elle-même. Dans ce domaine aussi, l'observation influe sur la réalité observée.

Enfin, la confrontation de modèles à objectif purement opérationnel à une certaine réalité psychologique peut servir de base à une meilleure compréhension de cette dernière.

KNOWLEDGE ACQUISITION - The acquisition of knowledge when developing a system based on knowledge, initially perceived as a skill transcription activity, is now construed as a formalization process. Such developments require a new appraisal of the relationship between cognitive psychology and expert system design.

■ Jean-Paul Krivine, ingénieur, chercheur à la Direction des études et recherches d'EDF, 1, avenue du Général de Gaulle, 92141 Clamart Cedex.

LE DÉCALAGE ENTRE LOGIQUE ET CONNAISSANCES

L'exemple de la compréhension de la négation par l'enfant illustre le fait que les connaissances humaines sont caractérisées par le contexte spécifique dans lequel elles sont activables.

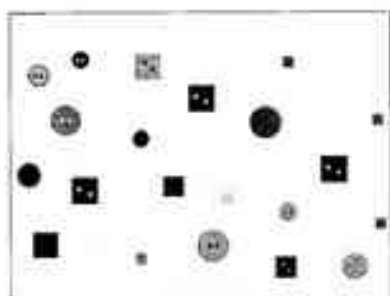
■ Claude Bastien

Le raisonnement humain dans les situations de résolution de problèmes n'a été longtemps étudié qu'en référence aux logiques monotones classiques. Les opérations mentales, qu'on pouvait inférer à partir des suites d'actions observables chez des sujets en train de résoudre des problèmes dans des conditions expérimentales, étaient analysées par comparaison aux étapes d'un raisonnement formel appliqué aux mêmes situations. La performance des sujets était alors caractérisée en termes d'incomplétude, d'erreurs... A cette démarche correspond la conception selon laquelle l'évolution des connaissances s'effectue dans le sens d'une abstraction de plus en plus importante. Cette conception a été récemment remise en cause. La modélisation des processus d'acquisition et de gestion des connaissances en psychologie du développement, mais aussi, chez l'adulte, l'analyse des connaissances des experts humains (en vue d'élaborer des systèmes experts) ont montré le faible rôle que jouaient les connaissances générales abstraites par rapport aux connaissances spécifiques. La logique formelle n'apparaît dès lors que comme un type de connaissances particulier. L'exemple de la négation est de ce point de vue particulièrement illustratif.

Deux types de négation

Dès trois ou quatre ans, les enfants sont capables de déterminer, face à un ensemble de fruits, ceux qu'ils peuvent consommer lorsqu'on leur dit : "ne mange pas les grosses pommes vertes". Mais ces mêmes enfants, à six-sept ans, sont incapables de répondre correctement à la consigne "donne-moi tous les boutons qui ne sont pas grands carrés noirs" quand on leur présente un ensemble d'objets (voir figure) : ils ne fournissent dans ce cas qu'une réponse partielle (les boutons ronds, par exemple). Il est clair que les deux consignes ("ne mange pas..." et "donne-moi...") peuvent être décrites comme requérant la mise en œuvre d'un opérateur propositionnel $\neg(x \vee y)$: ce qui

n'est pas pomme grosse verte) ou la mise en œuvre de l'opérateur booléen de complémentarité (C^R : la partie constituée par les fruits autres que grosse pomme verte). Ces deux expressions de la négation sont logiquement équivalentes, mais les résultats expérimentaux montrent qu'elles ne sont pas psychologiquement équivalentes. D'une série d'expériences d'apprentissage pilotées par ordinateur, il ressort que si les enfants comprennent bien la consigne, ils ne sont pas capables d'enlever tout ce qui n'est pas grand carré noir. En fait, tout se passe comme si le fait d'avoir à agir (extraire les éléments) les contraignait à "positiver" la négation. Ils



Situation correspondant à la consigne : enlever tous les boutons qui ne sont pas "grand carré noir".

procèdent alors à des disjonctions de négations non exhaustives $\neg(x \vee y)$. L'apprentissage permet à la majorité d'entre eux de parvenir à résoudre la tâche, mais par une suite de "positivisations" (d'abord les ronds, puis les carrés gris...). Cette procédure, fort peu économique, témoigne que les deux expressions de la négation (propositionnelle et booléenne) restent indépendantes. Il semble que cette indépendance persiste chez l'adulte. Le fait que l'univers soit défini en extension ou en compréhension, et le fait que la tâche contraigne ou non à opérer sur les éléments, déterminent les représentations et par suite des usages différents de la négation. Si on définit le contexte d'une connaissance par les caractéristiques de la situation et par les buts qu'elle permet de satisfaire, on dira que ces deux types de

THE GAP BETWEEN LOGIC AND KNOWLEDGE - Human reasoning resorts more often to knowledge structured by functional context rather than by logic. An example of the understanding of negative assertions is considered and a hypothesis on the organization of knowledge is submitted.

négations appartiennent à des contextes différents.

La mise en contexte des connaissances

Il semble donc bien que l'évolution cognitive ne tende pas vers la mise en place de connaissances de plus en plus abstraites, mais, à l'inverse, vers leur mise en contexte, lequel détermine les conditions de leur activation en même temps que les limites de leur validité. Ainsi peut s'expliquer que, dans une situation donnée, une grande part des connaissances ne soit pas accessible (nous savons que nous savons, sans pouvoir récupérer la connaissance). Cette contextualisation ne doit pas être regardée comme une limite du fonctionnement humain, mais au contraire, sans doute, comme une condition essentielle de son efficacité. On a peut-être là une esquisse de réponse au problème de l'explosion combinatoire, bien connue des chercheurs en intelligence artificielle. Si on admet que tout système de connaissances fonctionne, à un moment donné, dans un contexte déterminé qui isole la partie des connaissances activables et que, de plus, seul un nombre restreint d'autres contextes sont reliés de façon probabiliste au contexte courant, on a là un cadre conceptuel qui devrait permettre d'étudier de façon heuristique un certain nombre de caractéristiques du fonctionnement cognitif humain, comme la rapidité d'accès aux connaissances pertinentes, le raisonnement analogique, mais aussi certains types d'erreurs de raisonnement. Il reste à préciser les éléments (tâche, contrainte temporelle...) qui définissent un contexte et les processus par lesquels s'établissent des liens entre contextes. Il y a sans doute là matière à une coopération fructueuse entre intelligence artificielle et psychologie cognitive.

■ Claude Bastien, professeur à l'Université de Provence, responsable de l'équipe "Modélisation de l'apprentissage", Centre de recherche en psychologie cognitive (URA 182 CNRS), Université de Provence, 29, avenue Robert Schuman, 13621 Aix-en-Provence Cedex.

RAISONNEMENT ET CONCEPTUALISATION

Les processus de conceptualisation doivent être placés au centre des recherches sur le raisonnement. L'exemple du concept de volume va permettre d'illustrer cette nécessité.

■ Gérard Vergnaud

La logique n'offre que des modèles trop généraux et trop faibles : ni la logique des propositions, ni la logique des prédicats, ni les différentes variétés de logique modale ou de logique floue ne permettent d'analyser d'une manière intéressante les différences de raisonnement qu'on constate dans l'apprentissage des mathématiques, de la physique, de la biologie, de l'informatique ou de la technologie.

Voici l'exemple :

Monsieur Dupont a deux aquariums. Celui du salon est deux fois plus long, trois fois plus large et deux fois plus profond que celui de la cuisine. Combien de fois celui du salon est-il plus grand que celui de la cuisine ?

Examinons quelques-uns des raisonnements produits par des enfants et des adolescents entre 11 et 16 ans.

Un premier raisonnement consiste à paver mentalement le grand aquarium avec le petit : trois dans la largeur et deux dans la longueur, cela fait trois ; et trois, six ; puis deux dans la hauteur, cela fait 12 : 12 fois plus grand.

Un second raisonnement consiste (éventuellement après un premier refus de répondre, sous prétexte qu'on ne connaît pas les dimensions des aquariums) à faire une hypothèse sur les dimensions du petit (mettons $20 \times 10 \times 10$), à calculer les dimensions du grand, à calculer le volume du petit et du grand, enfin à rechercher le rapport des deux volumes.

Un troisième raisonnement consiste à composer directement les rapports : 2 fois plus, 3 fois plus, 2 fois plus, cela fait 12 fois plus.

D'autres raisonnements, erronés cette fois, consistent à évaluer le rapport entre les volumes, à partir d'une sorte de moyenne des rapports entre les dimensions linéaires : 2 fois plus ou 2 fois 1/2 plus. On observe aussi la composition additive des rapports : $2 + 3 + 2$: 7 fois plus.

Analyser les raisonnements...

On peut repérer assez facilement les problèmes de conceptualisation sous-jacents à ces raisonnements.

Le premier repose sur des opérations dans l'espace géométrique représenté et sur la mise en correspondance de ces opérations avec des opérations numériques. Le second reflète l'impossibilité de raisonner sur des rapports en l'absence d'information sur les grandeurs elles-mêmes ; par contre, l'algorithme de calcul du volume du parallélépipède rectangle est acquis et utilisé. Le troisième enfin repose sur un théorème relatif aux fonctions trilineaires :

$$V(2L, 3l, 2h) = 2 \times 3 \times 2 V(L, l, h).$$

Cette troisième conceptualisation permet de généraliser le raisonnement aux rapports non entiers, alors que le raisonnement par pavage mental ne le permet pas. En outre, il est généralisable à tous les produits de dimensions qu'on rencontre, notamment en physique. C'est un raisonnement tridimensionnel, en ce sens qu'il considère la variable volume comme une fonction des trois dimensions linéaires, alors que le premier raisonnement ne considère que des volumes, et demeure donc en un sens unidimensionnel.

...et les erreurs

Les raisonnements erronés pour leur part reposent sur des conceptualisations fausses : le volume varie comme les longueurs par exemple.

Parmi les systèmes de signifiants utilisés à l'école et au collège, figure évidemment la formule : $V = L \times l \times h$.

Mais on peut lire une telle formule à plusieurs niveaux :

- comme un moyen de calculer le volume, connaissant les trois dimensions (usage direct) ;

- comme un moyen de calculer l'une des dimensions, connaissant les deux autres et le volume (usage indirect) ;

- comme une triple proportionnalité : le volume est proportionnel à la longueur quand la largeur et la hauteur sont tenues constantes ; il est de même proportionnel à la largeur et à la hauteur. Comme ces trois dimensions peuvent varier de manière indépendante, le volume est proportionnel au produit des trois.

Cette dernière lecture est peu fréquente, et peu enseignée, alors qu'elle est essentielle. Le théorème $V(2L, 3l, 2h) = 2 \times 3 \times 2 V(L, l, h)$ n'est pas non plus enseigné. Il reste en outre implicite pour

les enfants qui l'utilisent. C'est en fait un théorème-en-acte. Son utilisation n'est spontanée que pour des rapports simples. Sa généralisation à des rapports complexes et à des produits de dimensions quelconques devrait être prise en charge dans l'enseignement.

Il existe un système de signifiants non algébriques qui permet de rendre ce théorème accessible aux enfants, du moins à certains d'entre eux, dès la fin de l'école élémentaire et le début du collège, c'est le tableau de double proportionnalité.

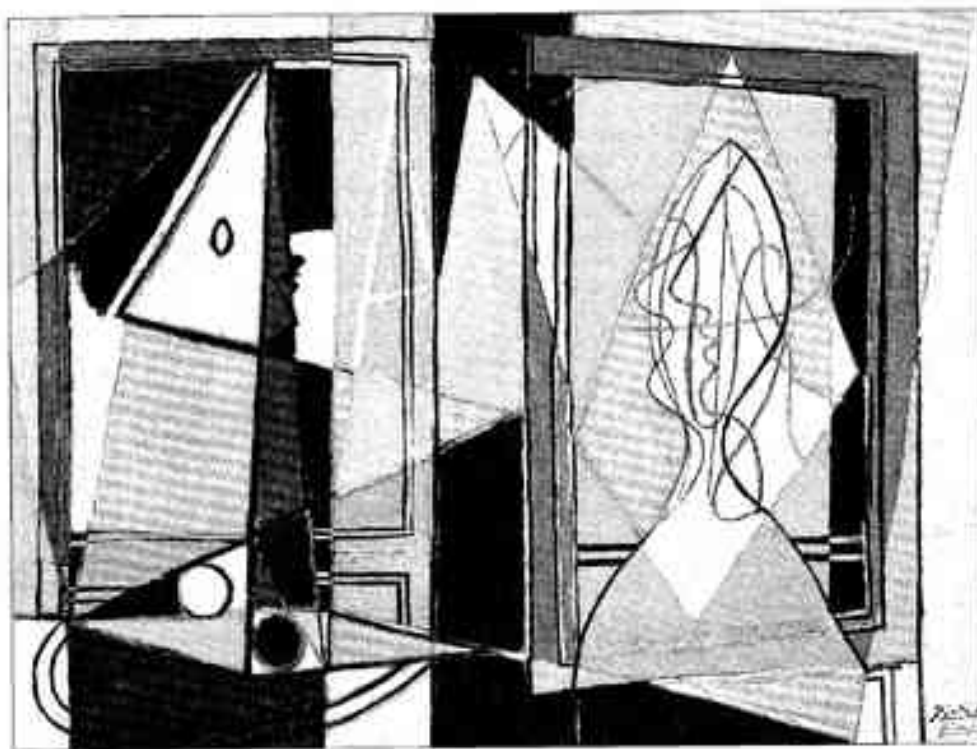
La logique n'est pas la conceptualisation

Le concept de volume se forme sur une longue période du développement cognitif et de l'apprentissage : depuis la comparaison des quantités d'orangeade dans deux verres, à 5 ou 6 ans, jusqu'aux intégrales triples à l'université, en passant par des étapes assez différentes comme le pavage de l'espace, la trilinearité du volume du parallélépipède, ou la bilinéarité du volume du prisme droit. Certaines propriétés du concept sont acquises pour les besoins de l'action en situation de résolution de problème et demeurent éventuellement implicites. Leur explicitation dans le langage naturel, dans le symbolisme algébrique, ou dans tout autre système de signifiants constitue à la fois une aide à la conceptualisation et une source de difficultés propres. La conceptualisation du volume met en jeu plusieurs champs conceptuels (géométrie, structures additives et multiplicatives, algèbre) et plusieurs sortes de signifiants mathématiques. La logique n'est pas d'un grand secours pour modéliser la formation des invariants opératoires (concepts-en-acte et théorèmes-en-acte) qui jalonnent ce parcours. Le raisonnement est conceptuel, ou il n'est pas.

REASONING AND CONCEPTUALIZATION
The concept of volume is progressively shaped by different types of concepts and reasonings. Logic cannot account for this diversity. Conceptualization processes are therefore an essential element in the study of reasoning.

■ Gérard Vergnaud, directeur de recherche au CNRS, directeur du GDR Didactique, Laboratoire de psychologie du développement et de l'éducation de l'enfant (URA 1353 CNRS), Université René Descartes, 46, rue Saint-Jacques, 75003 Paris.

De la perception à l'action



Picasso, Deux femmes à la fenêtre (1927), Houtbois, Museum of fine Arts (© SPADEN Paris 1992, Graudon).

Les processus qui permettent de prendre connaissance du monde, de transformer ces connaissances mémorisées et d'utiliser les références spatio-temporelles qu'elles fournissent pour mener les actions grâce auxquelles un individu s'adapte à son environnement en le modifiant, constituent, à l'évidence, quelques uns des objets d'étude privilégiés des sciences cognitives. Les perceptions sont, en effet, des élaborations actives du cerveau, sélectionnant, traduisant et intégrant les sensations élémentaires fournies par les mécanismes de la transduction sensorielle au niveau des récep-

teurs périphériques. De même, la biomécanique musculaire qui entraîne le déplacement de tout ou partie du corps n'est que la phase ultime d'un long processus de planification qui implique d'extraire d'un réseau de représentations hiérarchiquement organisées les informations pertinentes, en fonction du contexte dans lequel se déroulera l'action, pour spécifier les caractéristiques du mouvement. Enfin, ce sont les processus qui conduisent à associer un stimulus sensoriel à une réponse motrice qui, au-delà des stéréotypies de caractère réflexe empruntant des circuits rigides où un stimulus donné appelle

toujours la même réponse, permettent de réaliser des associations arbitraires qui contribuent à la plasticité comportementale telle qu'elle se manifeste dans l'apprentissage.

Les spectaculaires progrès réalisés au cours de la dernière décennie dans la connaissance des processus perceptifs et moteurs sont, pour une large part, les fruits d'une double évolution, au niveau de la démarche scientifique d'abord, au niveau des moyens d'analyse dont celle-ci dispose, ensuite. Aucune recherche dans ce domaine ne peut plus, en effet, être conduite à l'écart d'une approche multidis-

ciplinaire étendue, qui va bien au-delà de la combinaison, aux plans théorique et méthodologique, de la psychologie cognitive et des neurosciences fonctionnelles, pour tirer maintenant parti de l'armature conceptuelle apportée par la physique et les mathématiques et intégrer les avancées rapides des sciences de l'ingénieur, au premier plan desquelles l'informatique, la robotique et la modélisation du fonctionnement des systèmes de traitement naturels par des réseaux de "neurones" formels. Par ailleurs, l'étude de la sensorimotricité reste étroitement tributaire de la mise en œuvre d'outils d'investigation puissants des fonctions du cerveau, comme les techniques d'enregistrement de l'activité neuronale chez les primates non-humains éveillés et actifs, les différentes techniques d'imagerie cérébrale reposant sur l'application des principes de la physique de la matière aux tissus vivants, de même que les techniques électroencéphalographiques de plus en plus précises s'appuyant sur les méthodes de traitement des signaux biologiques.

Dans le domaine du codage sensoriel et des processus d'élaboration perceptive, les recherches conduites avec les méthodes des neurosciences cognitives ont permis de dégager deux principes d'organisation des systèmes visuel, auditif et olfactif. Il s'agit, d'une part, de la modularité du traitement des différents attributs des stimuli, entraînant la multiplicité des "cartes" sous-corticales et corticales aux compétences différenciées et, d'autre part, de la bidirectionnalité, ascendante et descendante, des connexions qui structurent en un réseau dense cette cartographie hiérarchisée. Modularité et bidirectionnalité se combinent dans

une organisation fonctionnelle où la synthèse perceptive résulte de la convergence et de l'intégration de processus se déroulant de manière massivement parallèle.

Les travaux menés récemment dans le champ des neurosciences comme dans celui des sciences cognitives ont confirmé, par ailleurs, la difficulté d'établir une frontière précise entre perception et action; même la notion d'*interface*, qui implique la différenciation discrète de deux sous-ensembles fonctionnels contigus, se révèle inadéquate pour décrire la transition graduelle entre processus perceptifs et moteurs, que caractériserait mieux la notion de continuum perceptivo-moteur. La mise en évidence de l'importance des rétroactions sensorielles, en particulier proprioceptives, nées de l'action, dans la représentation du corps en mouvement et dans la régulation d'une motricité oculaire au service de la perception visuelle, achève de discréditer l'introduction de toute solution de continuité dans le fonctionnement sensorimoteur.

Enfin, plusieurs problèmes s'inscrivent au cœur des programmes de recherche sur la motricité volontaire. Ce sont les problèmes que pose la chronologie, ou le parallélisme, de la mise en activité des structures cérébrales, en particulier les régions corticales associatives, préfrontales et pariétales, prémotrices et motrices, aux responsabilités différenciées dans la spécification progressive des caractéristiques spatio-temporelles de l'acte moteur; c'est aussi le point d'impact des processus attentionnels et anticipateurs qui modulent les étapes de cette construction en fonction des contraintes et des demandes de l'environnement, voire les mécanismes intimes grâce auxquels ces processus cognitifs

s'inscrivent dans la micro-organisation modulaire du tissu neuronal. Ce domaine est maintenant profondément investi et stimulé par le point de vue dit "écologique", qui conteste radicalement le rôle traditionnellement dévolu à une instance centrale omnipotente contrôlant de manière pointilleuse l'activité motrice, au profit de phénomènes d'auto-organisation dont l'émergence et les principes de régulation relèvent de la théorie des systèmes dynamiques non-linéaires.

Une faible spécialisation des unités de traitement élémentaires, une large distributivité des compétences fonctionnelles dans les systèmes de traitement, une organisation structurale (temporelle) de ceux-ci plutôt continue que discrète, le parallélisme et la redondance des opérations sont ainsi quelques-uns des concepts qui ont progressivement émergé de l'analyse des systèmes sensorimoteurs, modifiant ainsi profondément nos conceptions dans ce domaine. Ils ouvrent une perspective, peut-être décisive, aux modélisations connexionnistes dans leur double tentative de réduire les architectures cognitive et neuronale à quelques principes communs d'organisation fonctionnelle. Parallèlement, les connaissances accumulées sur les systèmes naturels de traitement de l'information sensorimotrice, en révélant les solutions que l'évolution a sélectionnées sous la pression des contraintes biologiques, sont à l'origine de modèles de plus en plus directement utilisables dans la conception et la mise au point de systèmes sensorimoteurs artificiels, contribuant ainsi au renouvellement et à l'essor actuel de la robotique.

 Jean Requin, directeur de recherche au CNRS.

LA DYNAMIQUE DU TRAITEMENT VISUEL

En combinant des méthodes de psychologie expérimentale, de neurophysiologie et de modélisation, on tente de répondre à une question centrale : celle de la nature des traitements effectués par le système visuel pendant l'identification d'une image.

■ Simon Thorpe,
Michel Imbert

Voir est une activité particulièrement complexe, et la plupart des chercheurs intéressés par la vision décomposent ses mécanismes en sous-unités moins complexes, correspon-

dant chacune à un traitement spécialisé portant sur un aspect isolé du stimulus visuel. Il est ainsi démontré que, dès la rétine, les différents aspects de l'image oculaire, notamment ceux qui concernent les formes, le mouvement ou encore la couleur, sont filtrés par des mécanismes neuronaux appropriés, avant d'être transmis en parallèle par des canaux séparés à diverses structures cérébrales qui en poursuivent l'analyse.

De nombreuses étapes anatomiques sont aujourd'hui décrites : de la rétine vers le cortex visuel primaire ou V1, via le corps genouillé latéral, puis par des connexions cortico-corticales de V1 vers des aires visuelles secondaires hiérarchiquement disposées : V2, V3, V4, MT, IT, etc., une bonne vingtaine en tout, pour ne citer que la voie visuelle principale qui va sans détour de la rétine au cortex cérébral. Une caractéristique remarquable de l'organisation anatomique et fonctionnelle du système visuel est que chaque étage du traitement, non seulement relaie l'information vers l'étage ou les étages suivants, mais reçoit en retour des signaux issus de ces étapes ultérieures, donnant au cortex cérébral visuel une structure en réseau de connexions réciproques enchevêtrées. On peut donc s'interroger sur les caractéristiques du flux d'information dans ce système pendant l'analyse d'une image. Est-ce que le flux d'information est essentiellement unidirectionnel (*feed-forward*), allant de la rétine vers les aires visuelles à haut niveau d'intégration, ou est-ce que le traitement fait appel à des boucles de rétroaction entre différents niveaux ?

VISUAL PROCESSING DYNAMICS - Psychological and neurophysiological data can be used to constrain models of how information is processed in the primate visual system. The speed of visual processing indicates that a large part of the process involves essentially feed-forward mechanisms.

Une démarche interdisciplinaire

Pour répondre à ce type de question, une démarche interdisciplinaire nous semble indispensable. D'une part, des expériences en psychologie expérimentale permettent de démontrer la rapidité et la robustesse des processus d'identification visuelle. En effet, la capacité de sujets humains à identifier des images naturelles, même avec une durée de présentation brève (par exemple 20 msec), est remarquable. Par ailleurs, des enregistrements par microélectrodes chez le singe vigile, dans le cortex visuel primaire, permettent d'analyser la dynamique du traitement au niveau neuronal. Ce type d'expérience montre que la sélectivité d'un neurone à une dimension spécifique d'un stimulus visuel (comme son orientation ou sa profondeur stéréoscopique) est présente dès les premières millisecondes de la réponse. Ces résultats indiquent qu'il n'est pas nécessaire de faire appel à des retours d'informations venant de régions hiérarchiquement plus élevées. De plus, ces contraintes temporelles mises en évidence par des résultats psychologiques et neurophysiologiques incitent enfin à élaborer des modèles qui, d'une part, soulignent l'importance des processus ascendants et qui, d'autre part, utilisent pour transmettre l'information visuelle un autre code que la fréquence de décharge moyenne des neurones. Plus particulièrement, le délai relatif entre les moments d'activation des différents neurones d'une population donnée pourrait servir de support à ce code.

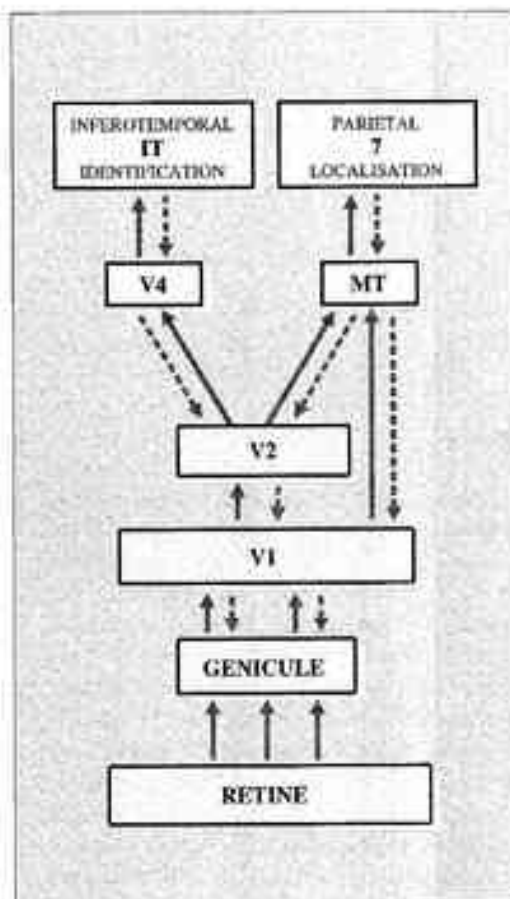


Schéma simplifié du système visuel chez le primate. Les informations partant de la rétine doivent traverser plusieurs structures sous-corticales et corticales avant d'arriver dans les aires temporales et pariétales, impliquées respectivement dans l'identification et la localisation des objets. À chaque étape (sauf entre la rétine et le corps genouillé), il existe des boucles rétroactives. Quelle est la fonction de ces voies descendantes ?

■ Simon Thorpe, chargé de recherche au CNRS, département des Neurosciences de la vision active, Institut des neurosciences (URA 1488 CNRS).

■ Michel Imbert, professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, directeur du département des Neurosciences de la vision active, Institut des neurosciences (URA 1488 CNRS), Université Pierre et Marie Curie, 9, quai Saint-Bernard, Bât. B, 75252 Paris Cedex 05.

L'AUDITION ORGANISATRICE

Le système auditif doit organiser l'information acoustique qui lui parvient en sorte que les événements sonores perçus comme séparés correspondent à ce qui a été effectivement produit par des sources distinctes dans la réalité extérieure.

■ Laurent Demany,
Stephen McAdams

En 1923, la revue *Psychologische Forschung* faisait paraître un très remarquable article de Max Wertheimer, intitulé "Recherches sur les Lois de la Forme". On y trouve l'énoncé de règles (loi de proximité, de similarité, du destin commun, ...) que suit le système visuel humain pour organiser un champ optique, autrement dit pour partitionner ses éléments, distribués spatialement, en sous-ensembles unitaires. Il a fallu attendre plusieurs dizaines d'années avant que les aspects organisationnels de l'audition humaine puissent – et soient – étudiés eux aussi de façon systématique. Aujourd'hui, c'est un thème majeur des travaux sur la psychologie de l'audition, et la France prend une part notable aux progrès dans ce domaine.

Deux étapes du traitement des sons

Le système auditif périphérique est essentiellement un analyseur de spectres. Ainsi, au niveau du nerf auditif, un son tel qu'une voyelle se trouve décomposé spatialement : ses composantes spectrales de basses fréquences n'excitent pas les mêmes fibres que les composantes de hautes

fréquences. Pourtant, nous percevons une voyelle comme un seul son plutôt que comme un accord. De plus, à l'audition de deux voyelles simultanées d'intensités comparables, nous parvenons sans effort à percevoir deux sons, même lorsque l'écoute est monaurale. Pourtant, les deux ensembles correspondants de composantes spectrales s'entremêlent complètement à la périphérie auditive. Tout cela implique que doivent intervenir, à un niveau plus central du système, des processus sophistiqués et largement automatiques de groupement et de ségrégation.

Quelques indices de groupement

On sait maintenant qu'un des indices de groupement utilisés par le "cerveau auditif" est l'existence de relations harmoniques entre composantes spectrales. Deux composantes spectrales dont le rapport fréquentiel est simple ($2/1$, $3/2$, ...) seront en général groupées et fusionneront perceptivement. Cependant, il est apparu récemment que la reconnaissance des relations harmoniques s'évanouit rapidement lorsque les fréquences dépassent environ 1000 Hz. On s'interroge actuellement sur les relations existant entre le mécanisme de "fusion par l'harmonicité" et le mécanisme calculant la hauteur tonale d'un son à multiples composantes spectrales : plusieurs expériences donnent à penser, contre-intui-

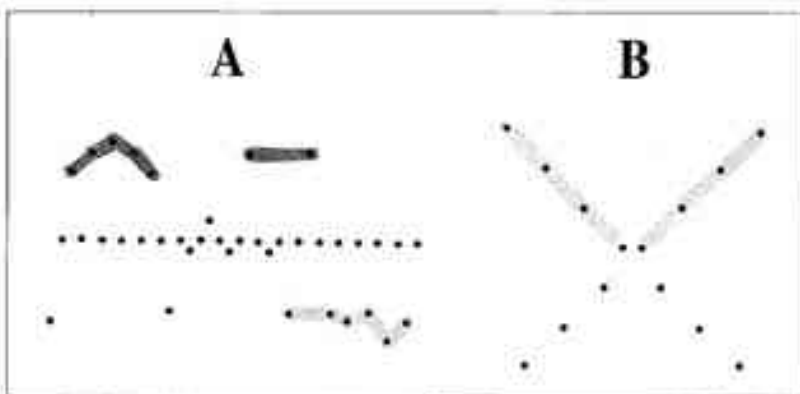
THE ORGANIZATION OF HEARING - The hearing system organizes incoming acoustic data so that separately perceived sounds correspond to what was actually produced by distinct sound sources in the outside world. In the first place, sound waves undergo spectral analysis; then the spectral components are grouped and segregated according to automatic rules.

vement, que ces deux mécanismes ne sont pas parfaitement couplés.

La loi visuelle du "destin commun", énoncée par Wertheimer en 1923, est-elle vraie pour l'audition ? On sait en tout cas qu'une même modulation d'amplitude appliquée à deux sons purs séparés périphériquement les fait nettement fusionner, et qu'au contraire une différence de phase ou de fréquence entre les deux modulations conduit à une ségrégation. Cependant, un débat reste ouvert sur la sensibilité auditive à l'incohérence de modulations de fréquence : une telle incohérence n'est peut-être perceptible que par ses effets sur l'harmonicité des relations fréquentielles.

Du simultané au séquentiel

L'audition organise en événements sonores des informations spectrales simultanées, mais aussi des séquences d'événements, et ceci de façon parfois inattendue. Ainsi, une séquence rapide de notes peut être perçue non pas comme une seule mélodie (ce qu'elle est physiquement), mais comme une polyphonie. Ce phénomène de "fission mélodique" obéit à un principe de proximité spectrale. Il dépend en partie du bon vouloir de l'auditeur, et les processus sous-jacents sont donc mi-automatiques, mi-contrôlés. L'organisation de champs sonores complexes peut être contrôlée sur la base de connaissances auditives. Cependant, beaucoup de ses aspects automatiques reposent probablement sur des mécanismes neuronaux précablés, assez serviables pour nous faire percevoir comme un son, ou une mélodie, ce qui a été effectivement produit par une source sonore dans la réalité extérieure.



Deux exemples de fusion mélodique.

A - Extrait de la troisième sonate pour violon seul de J.S. Bach (BWV 1005, Allegro assai). Cette séquence isochrone de 35 notes, qui doit être jouée à un tempo rapide, est perçue comme polyphonique : les notes s'organisent en groupes séparés, sur la base de leurs proximités relatives en hauteur tonale (l'extension verticale). B - Deux lignes mélodiques orthogonales, l'une montante et l'autre descendante. Chacune est isochrone et comprend 7 notes. À un tempo rapide, il est impossible d'écouter l'une ou l'autre des deux lignes : on entend soit la mélodie colorée en jaune, soit celle colorée en vert.

■ Laurent Demany, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire d'audiologie expérimentale (unité 229 INSERM), Hôpital Pellegrin - Bât. P, Place Amélie Raba Léon, 33076 Bordeaux Cedex.

■ Stephen McAdams, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de psychologie expérimentale (URA 316 CNRS), Université René Descartes, 28, rue Serpente, 75006 Paris.

TRAITEMENT ET STOCKAGE DE L'INFORMATION OLFACTIVE

Le système olfactif a une façon originale de recueillir et traiter l'information sensorielle. Son étude et sa modélisation doivent être intégrées dans une approche comparative des architectures de traitement sensoriel et perceptif.

■ André Holley

De très nombreuses substances ont une odeur. Il suffit généralement qu'elles soient assez volatiles, c'est-à-dire que les molécules qu'elles laissent diffuser, entraînées par le courant aérien produit par la respiration ou le flâirage, atteignent avec une concentration suffisante la partie de la cavité nasale où se trouvent les cellules réceptrices. L'odeur est caractéristique de l'espèce moléculaire qui la produit, ce qui confère à l'odorant un pouvoir de discrimination élevé, associé à une remarquable sensibilité. L'impression sensorielle est bien souvent globale, peu décomposable en traits indépendants, et marquée par une tonalité affective positive ou négative, rarement neutre.

Les ensembles neuronaux qui traitent l'information olfactive ont une architecture relativement simple. Les millions de cellules réceptrices, qui sont des neurones, convergent fortement à l'entrée du bulbe olfactif vers quelques dizaines de milliers de neurones relais dont les axones se projettent sur le cortex olfactif. Très peu de synapses séparent les neurones récepteurs des aires hypothalamiques, limbiques et néo-corticales où l'information olfactive s'insère dans les circuits neuronaux qui contrôlent le comportement et élaborent la perception.

Nous avons montré que les neurones récepteurs répondent chacun à un pourcentage élevé des substances utilisées comme stimulus, distinguant parfois des molécules chimiquement très voisines, comme les isomères optiques, confondant en revanche des molécules de familles chimiques très différentes. L'interprétation en est que chaque neurorécepteur porte plusieurs types de récepteurs moléculaires, chacun de ces récepteurs étant lui-même assez peu sélectif quant à ses ligands. La sélectivité de réponse des neurones du bulbe olfactif et du cortex est également faible.

Représenter l'identité de l'odeur

En termes de codage sensoriel, il apparaît clairement que l'information relative à

une odeur particulière est répartie, à chaque niveau, sur un grand nombre d'unités neuronales. Cette représentation distribuée possède une dimension spatiale. Dans l'épithélium olfactif, comme dans le bulbe, les neurones recrutés lors d'une stimulation ne sont pas disséminés de façon homogène dans la structure, mais se trouvent en plus grande densité dans certaines aires, dessinant un motif spatial caractéristique, révélé par la méthode de marquage de l'activité métabolique à l'aide du désoxyglucose radioactif. Le stimulus olfactif n'ayant pas, à la différence du stimulus visuel, de dimension spatiale intrinsèque, le système olfactif paraît utiliser son propre espace essentiellement pour représenter l'identité de l'odeur.

La représentation distribuée de l'information, le caractère global de la perception, sa grande résistance aux lésions des structures nerveuses, sont des propriétés qui évoquent fortement un type de fonctionnement analogue à celui des réseaux de neurones formels. L'étude du système olfactif est donc un champ privilégié d'application pour les modèles dits connexionnistes de traitement de l'information sensorielle. Certains de ces modèles prédisent que le bulbe olfactif, si proche qu'il soit de l'étage de réception, n'est pas un simple relais de transmission ou de pré-traitement de l'information, mais intervient de quelque manière dans sa conservation. Notre équipe "neurobiologie de la mémoire olfactive" a recueilli plusieurs preuves de cette intervention. Ainsi l'anesthésie locale du bulbe olfactif dans l'heure qui suit un apprentissage de nature olfactive chez le rat perturbe la rétention ultérieure de cet apprentissage. Il se trouve que le bulbe est innervé par plusieurs catégories de fibres nerveuses d'origine centrale. Certaines de ces efférences, celles qui libèrent de la noradrénaline notamment, paraissent jouer un rôle dans la formation

durable d'un réseau de neurones liés par des connexions synaptiques renforcées. Chaque nouvelle odeur perçue dans des conditions d'apprentissage qui mobilisent l'attention sélective de l'animal serait ainsi représentée par un réseau neuronal défini et apparemment stable sur une durée encore mal connue. Nos travaux montrent également que l'acétylcholine libérée dans le bulbe olfactif par d'autres fibres est nécessaire à la rétention à court terme de l'information olfactive.

PROCESSING AND STORING OLFACTORY DATA - Studies on odour perception along with anatomical and neurophysiological olfactory system research have disclosed organizational and functional properties resembling those of neural networks. They may therefore be of great value for research on sensory data processing and storing.

■ André Holley, professeur à l'Université Claude Bernard, directeur du Laboratoire de physiologie neurosensorielle (URA 180 CNRS), 43, boulevard du 11 novembre 1918, 69622 Villeurbanne Cedex.



Dispositif pour l'étude de l'olfaction chez l'homme.

À LA RECHERCHE DU SIXIÈME SENS

Les muscles sont aussi des organes des sens auxquels nous devons en grande partie la connaissance consciente de la posture de notre corps et des mouvements que nous exécutons.

Jean-Pierre Roll

La réussite de la moindre de nos actions est directement liée à la représentation que chacun d'entre nous a nécessairement de son propre corps, qu'il soit en mouvement ou figé dans des attitudes. Sur la base de quels messages nerveux s'élabore cette connaissance corporelle ? Peut-on parler à son sujet d'un "sixième sens" ? Et si oui, quelle est son origine et comment le doter d'un contenu précis en ce qui concerne les récepteurs impliqués et les opérations de traitement central des informations qu'il collecte ?

Il s'agit en fait de ce qu'il est convenu d'appeler la sensibilité proprioceptive dont la très grande familiarité nous masque à la fois la complexité des mécanismes nerveux qui la sous-tendent et son extrême importance pour le contrôle et l'organisation de la motricité. Qu'une atteinte neurologique périphérique interdise aux informations proprioceptives d'atteindre leur destination corticale, et le corps ou les membres sont privés de tonus et deviennent des objets étrangers.

Si l'évidence s'impose à tous que les muscles sont les moteurs du mouvement, les instruments ultimes de toute relation entre le sujet et le monde, peu connu est le fait qu'ils sont aussi des organes des sens, au même titre que l'œil par exemple. Mais il s'agit dans ce cas d'une "vision

intérieure", à la source même de la connaissance de soi.

Les récepteurs musculaires sont aujourd'hui bien décrits, au plan morphologique comme en ce qui concerne leur distribution dans les muscles qui peuvent dans certains cas en contenir plusieurs centaines par gramme. Les signaux sensitifs émanant de ces capteurs peuvent être recueillis chez l'homme lors de l'exécution de mouvements ou du maintien d'une attitude, à l'aide de micro-électrodes de tungstène insérées dans un nerf à proximité d'une fibre sensorielle. Ces messages proprioceptifs, qui procèdent de l'action et qui la signalent au plan sensoriel, renseignent le système nerveux central sur la direction, la vitesse ou le point d'arrêt terminal d'un mouvement.

Induire l'impression de mouvement

Un artifice expérimental permet d'activer de manière sélective, et en l'absence de mouvement, les capteurs musculaires en les stimulant à des fréquences allant de 20 à 100 Hz. Il s'agit de vibrations mécaniques de faible amplitude appliquées au niveau des tendons musculaires. Ce leurre sensoriel est capable de générer des messages proprioceptifs si proches de ceux évoqués au cours d'un mouvement naturel qu'il induit, chez un sujet parfaitement immo-

THE QUEST FOR THE SIXTH SENSE - Muscles are also sense organs which convey data on body posture and motion. Experimental manipulation of tendon by vibration transmits false data to the brain and produces kinesthetic illusions, the analysis of which should lead to a better understanding of the nervous mechanisms underlying motion perception.

bile, une sensation illusoire de mouvement dont on peut analyser les paramètres à l'aide des méthodes de la psychophysique. Argument décisif en faveur d'un traitement de la sensibilité musculaire par les centres supérieurs et de sa contribution majeure au sens du mouvement et de la position.

En multipliant le nombre des muscles vibrés et en calquant les variations de fréquence de chaque vibreur sur celles enregistrées préalablement au niveau des fibres sensitives au cours d'un mouvement réel et volontaire, on est en mesure d'évoquer, chez un sujet immobile, des sensations de mouvements complexes et prévisibles. Véritables formes motrices qui sont réellement perçues, mais néanmoins imaginaires puisqu'aucun mouvement n'a réellement été exécuté : le sujet bouge alors sans bouger ; il s'agit de sensations illusoires de mouvement.

La connaissance acquise des règles lexicales qui président, au cours d'un mouvement, à l'organisation des messages sensoriels issus des muscles, et la compréhension des mécanismes nerveux centraux de décodage de ces messages permettent, en vibrant les tendons des muscles du poignet d'un sujet dont la main ne bouge pas, d'évoquer chez lui la sensation claire et puissante qu'il dessine un carré ou un rectangle qu'il distingue entre eux et, a fortiori, d'une ellipse ou d'un triangle (voir figure). Là encore, le sujet écrit sans écrire.

Ces expériences permettent aujourd'hui de fournir un contenu neurobiologique précis à des notions issues du répertoire psychiatrique, comme celles de "schéma corporel" ou d'"image du corps". Elles réhabilitent la vieille notion Sherringtonienne de sixième sens, principalement localisé dans les muscles, qui nous informe du fait que l'on habite un corps qui lui-même nous habite et que nous le savons.

Jean-Pierre Roll, professeur à l'Université de Provence, directeur de l'Unité Intégration et adaptation sensorimotrices et comportementales (URA 372 CNRS), Université de Provence, Centre Saint Jérôme, avenue Escadrille Normandie-Niemen, 13397 Marseille Cedex 13.



Sentir que l'on dessine sans dessiner. Quatre vibreurs activent les tendons des muscles de la main suivant un patron fréquentiel prédéterminé. Le sujet, dont la main ne bouge pas, perçoit que celle-ci dessine une figure géométrique dont il rend compte à posteriori en la reproduisant sur une table à digitaliser. (© Laboratoire de neurobiologie humaine, Roll, Gilhodes & Huet, 1992.)

DU STIMULUS AU MOUVEMENT

La remarquable plasticité comportementale des mammifères supérieurs est en partie due à la capacité de leur système nerveux central de former des associations nouvelles entre une entrée sensorielle et la réponse motrice adaptée.

Alexa Riehle,
John Seal

Du point de vue de la psychologie cognitive comme des neurosciences, ce sont les mécanismes transformant l'information apportée par un changement du monde extérieur en une réponse motrice qui assurent la plasticité comportementale des mammifères supérieurs. Les conceptions dans ce domaine ont longtemps reposé sur la notion d'un fonctionnement "sériel". L'information transformée au sein d'une aire corticale serait transmise à une autre région, responsable d'une transformation plus élaborée, et ainsi de suite. Les opérations de traitement qui conduisent de la perception d'un stimulus à l'exécution d'un mouvement se déroulent-elles en stricte succession, ou peuvent-elles être menées simultanément ?

Une expérience simple éclaire cette question. Un singe doit soit fléchir, soit étirer le poignet à la suite d'une discrimination perceptive simple, donc rapide, entre deux signaux lumineux, l'un à droite, l'autre à gauche. De plus, l'exécution du mouvement dépend d'une discrimination difficile, donc lente, entre deux intensités possibles du signal : le mouvement est exécuté si l'intensité est élevée et retenu si elle est faible. Le système moteur commence-t-il à programmer la réponse sur la base de la première information concernant la direction (flexion ou extension) du mouvement du poignet, et attend-il l'instruction indiquant de l'exécuter ou non, ou n'entreprend-il cette programmation qu'en possession de ces deux informations ?

Un traitement parallèle

L'activité du cortex moteur confirme l'hypothèse d'un traitement parallèle : les neurones impliqués dans la spécification de la direction du mouvement sont activés dès que celle-ci est connue, la décision d'exécuter ou non le mouvement n'ayant pas encore été prise. Cette mise en chan-

tier précoce de la réponse sera poursuivie si celle-ci doit être fournie, et annulée dans le cas contraire ; elle concerne les neurones dits sensoriels (S), activés par la présentation du stimulus, et non les neurones moteurs (M), activés par l'exécution du mouvement ; une troisième population de neurones, dits sensorimoteurs (SM) parce qu'ils présentent une composante sensorielle et l'autre motrice, jouent un rôle crucial dans le transfert de l'information sensorimotrice (Fig. 1).

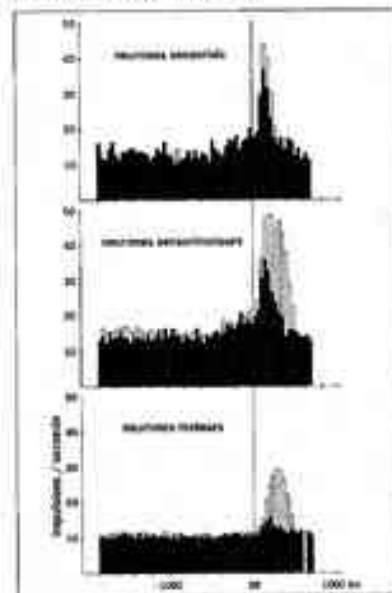


Fig. 1 - Activité des trois populations de neurones du cortex moteur quand le mouvement est exécuté après le signal de réponse (RS) (en jaune) : les trois types de neurones sont activés et quand il ne l'est pas (en bleu) : seuls les neurones S et la composante sensorielle des neurones SM sont activés.

Assurer la versatilité des liaisons sensorimotrices

Cette trilogie neuronale, qui caractérise l'organisation des régions corticales impliquées dans la sensorimotricité, constituerait un module de base assurant, grâce au rôle d'interface joué par les neurones SM, la versatilité des liaisons sensorimotrices. L'étude des aires associatives, lieu privilégié pour la formation des liaisons entre informations perceptives et commandes motrices, a permis de préciser le fonctionnement de ce module d'association et de décrire le mécanisme de la trans-

formation sensorimotrice par un modèle à seuil variable (Fig. 2).

Le signal sensoriel associé au mouvement modifie l'activité des neurones SM qui excitent les neurones M. Une rétroaction positive sur les neurones SM tend à augmenter leur taux de décharge. Si le

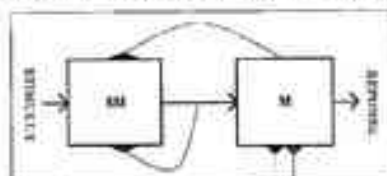


Fig. 2 - Le seuil d'activation des neurones moteurs (M) est modulé par des influences extérieures facilitatrices et inhibitrices. Les neurones sensorimoteurs (SM) sont soumis à une rétroaction négative (en rouge) provenant des neurones moteurs et à une rétroaction positive (en vert) exercée par leur propre signal de sortie.

seuil d'activation des neurones M est bas, ces neurones sont alors excités par les neurones SM, et une commande est rapidement adressée aux structures motrices : les neurones M étant de plus en plus excités, la rétroaction négative exercée sur les neurones SM augmente et prédomine sur la rétroaction positive ; le taux d'augmentation d'activité des neurones SM tend alors à rester faible. Ainsi, quand une facilitation s'exerce sur les neurones M, le temps de réaction est court et l'augmentation de l'activité neuronale est faible. Si le seuil des neurones M est élevé, leur activation par les neurones SM est moindre et la transmission d'information est ralentie : la rétroaction négative issue des neurones M sur les neurones SM est réduite et la rétroaction positive n'est pas freinée. L'activation des neurones SM peut alors atteindre le seuil des neurones M, mais après un temps plus long. Ainsi, le taux d'augmentation d'activité des neurones SM est d'autant plus élevé, et le temps de réaction d'autant plus long, que le seuil d'excitabilité des neurones M est plus élevé.

Il reste à confirmer qu'un tel mécanisme caractérise le fonctionnement intramodulaire des différentes régions du cortex impliquées dans la sensorimotricité. La voie serait alors ouverte à une modélisation de la circulation, au sein de réseaux neuronaux largement distribués dans le tissu cortical, d'informations qui perdent progressivement leurs caractéristiques sensorielles pour acquérir des propriétés motrices.

Alexa Riehle, chargée de recherche au CNRS, Laboratoire de neurosciences cognitives (UPR 9012 CNRS).

John Seal, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de neurosciences cognitives (UPR 9012 CNRS), 31, chemin Joseph Aiguier, BP 71, 13402 Marseille Cedex 09.

FROM STIMULUS TO MOTION - The remarkable adaptability of mammalian behaviour is partly due to their ability to establish new links between relevant sensory input and motion. Evidence suggests that data processing operations between perception and motion are organized in parallel and follow a common pattern.

L'INTELLIGENCE VISUO-MOTRICE

Les mécanismes complexes de traitement du signal à la base des actions sensori-motrices gagnent à être considérés sous un aspect fortement multidisciplinaire où la neurobiologie, la psychophysique, l'intelligence artificielle et la robotique ont leur mot à dire.

■ Nicolas Franceschini

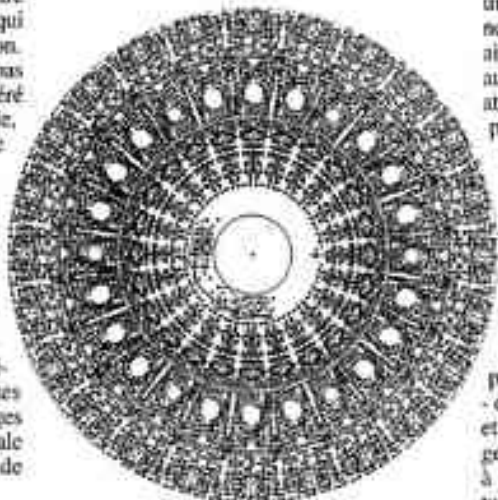
De nombreux agents mobiles autonomes tels que l'homme, le chat, la mouche, sont capables de se guider dans les environnements les plus imprévus, sans utiliser ni radar ni sonar et sans être reliés par un omphalos à quelque supercalculateur. Pour contrôler finement leur navigation et éviter les obstacles, ces "véhicules" font appel à un système visuel embarqué, dont les capteurs sont passifs et dont les processeurs neuronaux répétitifs effectuent en parallèle et de manière asynchrone des milliers de calculs sur le flux visuel, c'est-à-dire sur l'image rétinienne mouvante qui accompagne en particulier la locomotion.

A tout organisme qui ose faire un pas en avant se pose le problème, considéré comme ardu en intelligence artificielle, d'élaborer rapidement une commande motrice à partir des maints signaux de réafférence visuelle. Extraire l'information utile du flux visuel impose l'existence, dans les systèmes visuels animaux, d'un gigantesque réseau de neurones détecteurs de mouvement. On sait, depuis une trentaine d'années, que de tels neurones existent non seulement dans le système visuel des vertébrés, mais aussi dans celui des insectes qui présente par ailleurs des avantages certains pour l'analyse comportementale de contrôles visuo-moteurs savants et de leurs bases neuronales.

Quand l'œil à facettes de la mouche...

La mouche est un aéronef agile dont les yeux composés sont de véritables joyaux d'optique et de neurologie intégrées. Ils abritent un réseau cristallin de neurones chargés du traitement parallèle de signaux électriques analogiques (0-100 mV) issus de 6000 pixels. Fort d'environ un million de neurones, ce réseau envoie des "commandes électriques de vol" à 17 paires de muscles actionneurs qui ajustent en temps réel l'amplitude, la fréquence et l'angle d'attaque des ailes, permettant ainsi à l'animal de redresser son vol, d'éviter les obstacles et de garder le cap. Contrôles en roulis, tangage et lacet sont gérés par des lots spécifiques de neurones dont la forme et la réponse électrique sont

aujourd'hui connues avec précision. Mais les 48 000 capteurs opto-électroniques que renferme le cockpit de la mouche ne sauraient assurer leur fonction correctement s'ils n'envoyaient pas eux-mêmes des commandes électriques à 21 paires d'actionneurs assurant le positionnement dynamique de la tête, porteuse de ces mêmes capteurs. Un microscope de stimulation spécial exploitant l'une des 6000 facettes de l'œil comme objectif (diamètre: 25 µm, distance focale: 50 µm) nous a permis récemment de stimuler une à une les cellules photoréceptrices de la mosaïque rétinienne



Routage des composants analogiques constituant l'algorithme parallèle du contrôle visuo-moteur dans le troisième ganglion optique du robot mobile autonome (Photo: Christian Biales et Nicolas Franceschini).

(diamètre: 1 µm) et de découvrir la logique cachée d'un neurone détecteur de mouvement, élément de base pour le contrôle de la navigation aérienne.

... guide les pas du robot

Les principes de traitement du signal relatif aux neurones détecteurs de mouvement chez la mouche ont pu être transposés en opto-électronique et incorporés au système visuel d'une créature terrestre artificielle. Cette créature expérimentale, dont l'œil composé est équipé d'une centaine de facettes et de plusieurs ganglions optiques, apprécie la distance des obs-

SMART VISUOMOTOR CONTROL. - Recent understanding of signal processing in the fly compound eye has led to the design of a sighted mobile robot. This AI approach to the study of sensorimotor control shows how an array of motion sensitive neurons on-board a vehicle (living or non-living) can solve obstacle avoidance tasks in complex environments.

tacles à partir du flux visuel et réussit à les contourner à haute vitesse (50 cm/s). Tant la conception que la réalisation électronique (parallèle et analogique) de cette créature s'inspirent des réseaux neuronaux naturels, avec certaines de leurs contraintes.

Cette synthèse d'un système visuel partiel a montré que, copié à un circuit visuo-moteur simple basé sur l'établissement d'une carte locale de l'environnement, un réseau de neurones détecteurs de mouvement est suffisant pour permettre à un véhicule de circuler dans un environnement encombré tel qu'une forêt. Par ailleurs, l'adjonction d'un système visuel auxiliaire chargé de détecter la cible à atteindre, nous a permis de faire une première incursion dans cet art, propre aux systèmes nerveux naturels, de la "fusion multisensorielle" à base de réseaux de neurones analogiques.

Construire un agent mobile autonome doué d'intelligence visuo-motrice en s'imposant délibérément des contraintes biologiques permet:

- d'apprécier la raison d'être, voire l'ingéniosité des solutions que nous propose l'évolution;
- de guider la recherche neuroanatomique et neurophysiologique en prédisant le genre de circuits que l'on peut s'attendre à découvrir dans le cerveau d'une créature mobile vivante;
- d'apporter du même coup à la robotique mobile des solutions de contrôle visuo-moteur "bas niveau", robustes et bien éprouvées, susceptibles de compléter harmonieusement l'exécution de tâches de plus haut niveau, telle la planification de trajectoires.

Si cette approche de type "intelligence artificielle" s'est révélée riche en retombées physiologiques, c'est parce qu'elle nous a contraints d'examiner de sérieux problèmes déjà résolus par le système nerveux des mobiles vivants les plus humbles qui, dès le Cambrien, savaient transporter leur œil dans les environnements les plus complexes.

■ Nicolas Franceschini, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de neurobiologie (UPR 27 CNRS), 31, chemin Joseph Aiguier, BP 71, 13402 Marseille Cedex 9.

PERCEPTION DU MOUVEMENT ET REPRÉSENTATION DE L'ESPACE

La fusion des informations sensorielles est utilisée par le cerveau pour la perception des propriétés des objets, le contrôle postural et la mémoire spatiale.

Alain Berthoz,
Isabelle Israël,
Sidney Wiener

La perception du mouvement des objets et du corps dans l'espace exige une intégration d'informations en provenance de divers capteurs et la comparaison des données multisensorielles avec des prédictions internes faites par le cerveau. La vision, le système vestibulaire et la proprioception articulaire et musculaire contribuent à une perception cohérente des mouvements.

L'analyse du flux optique chez l'homme, c'est-à-dire de la distribution des vitesses rétinienues produites par un objet en mouvement ou une scène visuelle animée, révèle que la cohérence des vitesses perçues est exploitée par le système nerveux pour identifier les objets et en extraire des caractéristiques tridimensionnelles, telle la courbure locale*. Des simulateurs optiques, créant des images synthétiques, permettent d'étudier la validité de modèles théoriques qui prédisent le rôle d'indices visuels comme le gradient de texture, la disparité binoculaire, etc. pour la reconnaissance des propriétés 3D des objets. Des mesures faites en microgravité permettent d'évaluer l'effet de la gravité sur la perception visuelle et sa manipulation mentale.

Le système vestibulaire mesure les mouvements de la tête dans l'espace pour diriger des réflexes oculaires et de stabilisation posturale. Il a aussi un rôle de "guidage inertiel" dans la navigation au cours de la locomotion, qui est étudié par des expériences faites sur des sujets sains ou porteurs de lésions vestibulaires ou corticales. Ces travaux démontrent que la stabilisation de la tête dans un plan qui positionne les canaux semi-circulaires et les otolithes dans une orientation pré-

férentielle au cours de mouvements complexes est un facteur important de ce rôle de guidage.

Intégrer les trajets

Mais le système vestibulaire peut aussi participer à la perception et à la mémoire des déplacements en effectuant une "intégration des trajets" qui permet de mesurer la distance parcourue par la tête et le corps. Un paradigme fécond consiste à déplacer passivement ou activement le sujet dans le noir, après lui avoir montré une cible visuelle : il doit ensuite reproduire son trajet par des pointages oculaires,



Expérimentation faite en vol parabolique concernant le rôle de la gravité sur le contrôle des mouvements oculaires (coopération avec le CNRS). ID LPV/CNRS/CNRS.

manuels, ou une locomotion. Le rôle des lobes frontaux dans cette mémorisation des mouvements propres du corps a ainsi été montré. La contribution respective des informations vestibulaires et proprioceptives a été étudiée chez des sujets porteurs de lésions du système vestibulaire. Ces expériences révèlent l'importante contribution de ce système à la mémoire spatiale et les mécanismes de sa coopération avec la vision dans cette fonction. Des contacts avec les roboticiens qui rencontrent des problèmes semblables (fusion de capteurs) pour le guidage des robots mobiles sont établis (programme ESPRIT II).

Les bases neurales de cette mémoire spatiale du mouvement propre sont aujourd'hui accessibles à l'expérience. Des découvertes récentes ont révélé l'existence de centres corticaux (cortex pariéto-insulaire, cortex pariétal) impliqués dans l'intégration multimodale (visuelle, vestibulaire, somato-sensorielle) des déplacements de la tête. Les représentations hippocampiques de l'espace pourraient aussi être réorganisées par les informations vestibulaires sur le mouvement propre et participer donc à l'intégration des trajets. Une attention particulière est portée aux neurones dits "de placement" qui semblent coder la localisation de l'animal dans un espace appris. Cette hypothèse est testée chez le rat libre de ses mouvements, au cours d'une tâche de navigation dans un labyrinthe. Les neurones de l'hippocampe et du noyau caudé sont enregistrés en même temps que les mouvements de l'animal. En bref, ces études montrent que le codage neuronal de la position du corps est sensible aux informations vestibulaires. Des études semblables menées à Oxford, dans le cadre d'une coopération avec E. Rolls, montrent que les neurones de l'hippocampe chez le primate ont une sensibilité au mouvement du corps, liée au contexte dans lequel se fait ce mouvement (par exemple déplacement le long d'une paroi, ou vers un coin précis de la pièce, etc.).

* Travaux de J. Drulot et V. Cornilleau-Perès.

MOTION PERCEPTION AND SPATIAL REPRESENTATION - The fusion of sensory information is a fundamental operation of the brain. It is used in perceiving properties of objects, in controlling posture and in memorizing paths during locomotion. Both sensory-motor transformations as well as internal manipulations of the representations of body and objects are involved.

Alain Berthoz, directeur de recherche au CNRS, directeur du Laboratoire de physiologie neurosensorielle (UPR 2 CNRS).

Isabelle Israël, chercheur au CNRS, Laboratoire de physiologie neurosensorielle (UPR 2 CNRS).

Sidney Wiener, boursier Fondation Fyssen, Laboratoire de physiologie neurosensorielle (UPR 2 CNRS), 15 rue de l'École de médecine, 75270 Paris Cedex 06.

LA REPRÉSENTATION CORTICALE DE L'ESPACE 3-D

Le simple geste de saisir un objet dans l'espace est le résultat d'une série de traitements et de transformations effectués par le cerveau, opérations encore très mal comprises et même difficiles à reproduire de façon artificielle.

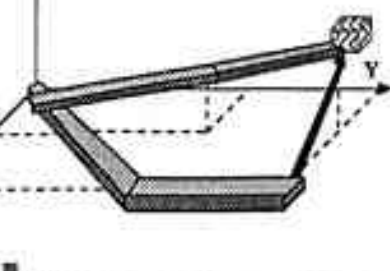
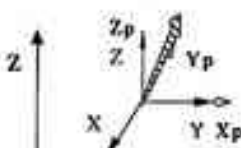
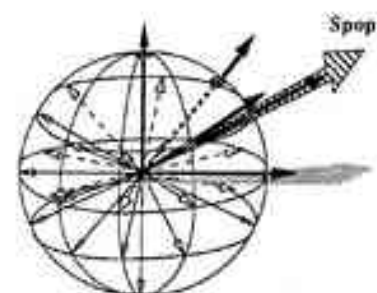
Yves Trotter,
Yves Burnod

Percevoir la troisième dimension, c'est apprécier les positions relatives des objets entre eux ainsi que les distances qui les séparent de l'observateur. On sait analyser l'activité des neurones du cortex, non seulement en réponse à des stimulations visuelles contrôlées, mais également en relation avec l'exploration motrice. Un type de stimulus visuel particulièrement adapté à l'étude de la troisième dimension est le stéréogramme qui, à partir de deux images planes identiques projetées indépendamment sur les deux rétines, génère une sensation de profondeur lorsque ces images sont légèrement décalées (ce décalage angulaire est appelé disparité rétinienne). Les neurones de l'aire visuelle primaire (aire V1 ou cortex strié) sont en majorité sensibles à cette disparité rétinienne et sont capables de localiser avec une grande précision la position d'un objet devant ou derrière un autre objet. En revanche cette propriété neuronale ne permet pas de comprendre comment le système nerveux analyse la distance qui sépare ces objets de l'observateur. Nous venons de mettre en évidence chez le primate que dans cette même aire visuelle (V1) considérée classiquement comme "primaire", les neurones individuels intègrent le message visuel en provenance des deux rétines avec une information extra-rétinienne fournie par l'angle de convergence X des deux yeux.

L'objet est vu, il faut le saisir

À l'autre extrémité de la chaîne de transformation visuo-motrice, on a pu aussi quantifier de façon très précise les activités des neurones des aires corticales motrices qui commandent le mouvement en 3-D vers l'objet. Cette commande est

due à l'interaction entre l'information d'origine visuelle indiquant la position de l'objet dans l'espace et l'information proprioceptive signalant la position initiale du bras par rapport au corps. Grâce à la modélisation, nous avons montré que l'information visuelle peut être projetée sur un système de



Calcul de la commande du mouvement de la main vers un objet par les neurones du cortex cérébral (cortex moteur) : modélisation à partir des données expérimentales. Chaque neurone donne la solution dans une direction de l'espace (un vecteur), dans un repère lié au bras, l'ensemble des directions possibles étant ici représenté sur une sphère. La description de la trajectoire de la main est prédite par l'activité sommée de la population de neurones corticaux (vecteur S_{prop}). Le calcul fait par le réseau cortical revient à projeter l'information visuelle dans un repère tournant avec le bras.

CORTICAL SPATIAL REPRESENTATION - The understanding of how the brain reconstructs and processes 3-D visual and motion data requires close collaboration between neurophysiological and computational sciences. Recent research have quantified interactions between visual and somato-motor data from primary visual cortex to motor cortex at neural level, thus providing a better understanding of the representation of 3-D space.

coordonnées lié au bras et tournant avec l'articulation de l'épaule. Or c'est précisément cette projection qui permet la commande musculaire la plus appropriée pour amener le bras vers la cible. Toutefois, chaque neurone individuel ne "calcule" pas la bonne solution dans l'ensemble de l'espace 3-D, mais seulement dans des sous-espaces limités. Ce n'est qu'au niveau de la population de neurones que la solution correcte est apportée.

Ces études de neurosciences, étroitement associées à des modélisations et simulations par réseaux de neurones, fournissent une description fine de la façon dont l'espace en trois dimensions est représenté au niveau des aires corticales visuelles et motrices. Il reste à déterminer le chaînon manquant, c'est-à-dire l'interface entre les deux mondes, visuel et moteur. Par l'utilisation de méthodes anatomiques, les régions associatives qui sont le siège de cette interface ont été mises en évidence. Nous allons donc pouvoir interroger les neurones dans ces aires en combinant les informations multi-sensorielles (visuelles et motrices), de manière à comprendre comment s'effectue l'ensemble de ces transformations dans le domaine tridimensionnel.

Yves Trotter, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire des neurosciences de la vision, Institut des neurosciences (URA 1199 CNRS).

Yves Burnod, directeur de recherche à l'INSERM, Institut des neurosciences (URA 1199 CNRS), Université Pierre et Marie Curie, 9, quai Saint-Bernard, 75252 Paris Cedex 05.

LE SYSTÈME FRONTO-STRIATAL ET LE RAISONNEMENT SPATIAL

Les activités neuronales observées pendant l'exécution de séquences spatiales chez le singe sont le témoin d'opérations mentales complexes.

Jean-Paul Joseph

Nos actions s'inscrivent dans la durée. La réalisation d'un objectif lointain ou complexe nécessite l'élaboration d'un plan où sont définies, dans un ordre logique, les actions élémentaires qui y concourent. Par la neurophysiologie, on peut tenter d'élucider les mécanismes unitaires de la construction et de l'exécution des plans, en particulier des plans spatiaux.

Les études cliniques et expérimentales ont conduit à rechercher ces mécanismes dans le cortex préfrontal et dans le striatum. Un protocole d'étude chez le singe incluait une tâche (voir figure) dans laquelle des cibles lumineuses étaient allumées dans un ordre aléatoire : après un délai de quelques secondes, l'animal devait frapper ces cibles en séquence, dans l'ordre de leur apparition. Cette tâche spatiale nécessitait l'intégration d'informations complexes données par l'environnement (la position et l'ordre des cibles) ou générées par l'animal lui-même au cours de l'exécution de la séquence (par exemple la position et l'ordre des cibles déjà frappées).

Le cortex préfrontal organise le plan...

Dans le cortex préfrontal, des neurones de l'aire arquée supérieure stockent, sous forme d'une décharge tonique, la position et l'ordre d'apparition des cibles. Au cours de l'exécution a été mise en évidence, dans la même aire, une population de neurones dont le niveau d'activité dépend des positions spatiales et temporelles d'une partie - ou de l'ensemble - des cibles frappées et/ou non frappées. Cette population de neurones semble être le support d'un véritable raisonnement spatial, caractérisé par des associations spatio-temporelles à deux ou à trois éléments. Ce modèle d'associations pourrait être également valable pour les opérations mentales faites sur des données non-spatiales, actuelles ou mémorisées. Au terme de ce raisonnement est donnée à

l'animal, à chaque étape de la séquence, la localisation de la prochaine cible, probablement sous la forme d'une image mentale spatiale.

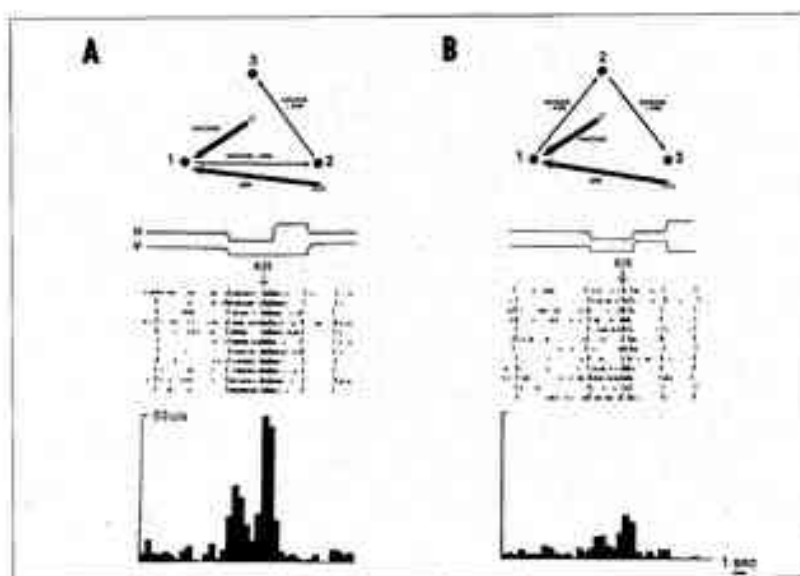
... et le noyau caudé l'exécute

Dans le noyau caudé (NC), des neurones sont activés par l'apparition des cibles et par l'exécution des mouvements du regard ou des bras. Le caractère phasique des décharges des neurones liés à la tâche suggère que le NC est moins impliqué dans l'élaboration du plan spatial que dans son exécution. Dans une majorité de cellules, l'activation ne dépend pas seulement de la position rétinienne des stimuli ou des paramètres spatiaux des mouvements, mais dépend également des séquences particulières où

THE FRONTO-STRIATAL SYSTEM AND THE SPATIAL REASONING - The execution of spatial sequences involves neural mechanisms for "spatial reasoning" based on complex spatio-spatial associations in the superior arcuate area of monkeys. These associations may serve as the pattern of mental operations on non spatial data.

les cibles sont allumées et où les mouvements sont effectués (voir figure). Ces données suggèrent que le contrôle exercé par le NC sur le mouvement en cours (saccades ou mouvements du bras) contient une information concernant le mouvement suivant : cette information pourrait être dirigée vers les centres moteurs ou oculomoteurs.

Jean-Paul Joseph, directeur de recherche au CNRS, détaché au Laboratoire de neuropsychologie (Unité 94 INSERM), 16, avenue du Doyen Lépine, 69500 Bron.



Effets de séquence dans le noyau caudé.

Décharge d'un neurone du noyau caudé pendant l'exécution de deux séquences spatiales, "gauche, droit, haut" (A) et "gauche, haut, droit" (B). Dans les figures du haut, les nombres 1, 2 et 3 désignent les étapes dans l'exécution des séquences, et les flèches, les mouvements du regard et du bras d'une cible à l'autre. Les épreuves sont alignées sur le début du mouvement du bras droit vers la première cible (la gauche dans les deux cas). On constate dans la séquence A que la cellule est activée après la saccade d'orientation et pendant le mouvement du bras vers la cible gauche. Dans la séquence B, la même saccade et le même mouvement n'activent pas la cellule.

L'ALGORITHMIQUE DU MOUVEMENT

La planification de trajectoires sans collision est un des problèmes les mieux formalisés de la robotique. Le raisonnement géométrique sur lequel elle s'appuie est très éloigné du raisonnement humain.

Jean-Paul Laumond

Considérons le bras manipulateur de la figure 1, chargé d'aller saisir un cube dans un environnement encombré d'obstacles. Ce robot est constitué de cinq corps : un socle et quatre corps articulés autour de quatre axes de rotation, les positions relatives des corps étant commandées par quatre moteurs. Pour le guider dans sa tâche, un opérateur humain précéderait par tâtonnements en contrôlant directement dans l'espace physique l'effet de ses actions. Il

n'est pas sûr qu'il puisse trouver une solution ou parvenir à se convaincre qu'il n'en existe pas.

Formaliser le problème du déménageur de piano

L'algorithmique du mouvement s'intéresse à la résolution automatique de ce type de problème. Le problème dit "du déménageur de piano" reçoit une formalisation rigoureuse à la fin des années 1970. Il constitue depuis un axe de recherche très actif en robotique.

ALGORITHMIC ACTION PLANNING - Planning collision-free paths is one of the best formalized problems in robotics. It is based on geometrical reasoning which is definitely different from human reasoning.

évoluant dans l'environnement de la figure 1. Dans cette figure, nous n'avons pas considéré le quatrième paramètre spécifiant la position du poignet du bras manipulateur, tant il est difficile de représenter un espace de dimension 4 sur une page de revue !... En revanche, c'est bien sur un tel espace que la machine "raisonne" pour planifier ses mouvements.

Une trajectoire du robot dans l'espace réel correspond à un chemin dans l'espace des configurations. Ainsi, il existe une solution au problème du déménageur de piano si — et seulement si — les configurations initiale et finale sont deux points d'une même composante de l'espace des configurations admissibles. Pour trouver une solution, il s'agit de représenter l'espace des configurations admissibles et d'explorer ses différentes composantes. Cette formulation générale peut être instantiée de diverses manières suivant le mode de représentation géométrique des corps physiques et le mode d'exploration de l'espace des configurations. La figure 2 a été produite par un logiciel calculant une approximation de l'espace des configurations admissibles par des parallélépipèdes (de dimension 4) ; cette approximation est obtenue à partir de calculs de distance entre les polyèdres modélisant les corps du robot et les objets dans l'espace réel. Les parallélépipèdes structurent l'espace des configurations admissibles. Pour un problème donné, on recherche en premier lieu une séquence de parallélépipèdes adjacents entre les deux parallélépipèdes contenant les configurations de départ et d'arrivée ; il est alors possible de construire un chemin continu à l'intérieur de cette séquence. Ce chemin correspond à des variations continues des valeurs des différents paramètres de configurations ; ces variations constituent les consignes envoyées aux moteurs actionnant les différentes articulations. Une trajectoire sans collision est ainsi produite. De fait, cette dernière phase nous fait sortir de l'algorithmique géométrique pour entrer dans la commande du robot, ce qui est encore une autre histoire.

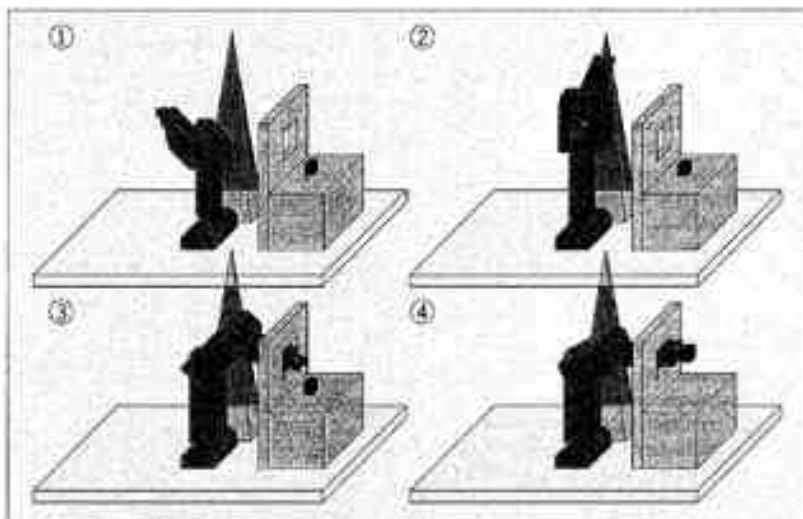


Fig. 1 - Le bras manipulateur évite les obstacles pour aller chercher le petit cube rouge.

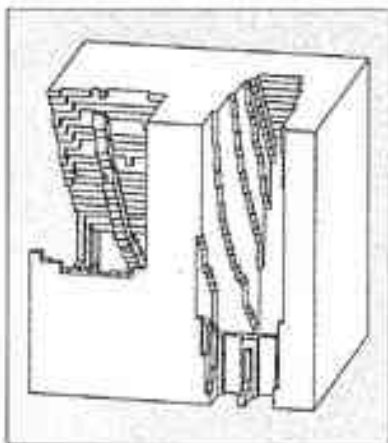


Fig. 2 - L'espace des configurations admissibles du robot dans la scène de la figure 1 (figure produite par un logiciel développé au LAAS/CNRS par T. Siméoni).

Le principe général de résolution tient dans sa formulation géométrique : il consiste à transformer le problème du déplacement de corps dans l'espace réel en un problème de déplacement d'un point dans un certain espace appelé espace des configurations. Une configuration du bras manipulateur que nous considérons est constituée de quatre paramètres spécifiant l'orientation des corps autour de leurs axes respectifs. L'espace des configurations est ici un espace de dimension quatre.

Une configuration est admissible si elle correspond à une situation où les corps du robot n'entrent pas en collision avec les objets de l'environnement. La figure 2 représente l'espace des configurations admissibles du bras manipulateur

Jean-Paul Laumond, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire d'automatique et d'analyse des systèmes (UPR 8001 CNRS), 7, avenue du Colonel Roche, 31077 Toulouse Cedex.

LES BASES NEURALES DU CONTRÔLE OCULOMOTEUR

Apparus très tôt au cours de l'Évolution, les mouvements d'orientation et de stabilisation du regard sont des éléments essentiels du répertoire de comportements des organismes vivants. Leur étude requiert la convergence de plusieurs approches, tant expérimentales que théoriques.

■ Jacques Droulez
Alexej Grantyn
Pierre-Paul Vidal

Deux sortes de mouvements coordonnés des yeux et de la tête permettent d'atteindre ou de suivre une cible. Les premiers sont constitués par les saccades, mouvements d'orientation très rapides des yeux et de la tête. Ils permettent au regard de "capturer" rapidement une "proie" visuelle. Les seconds sont des mouvements de compensation ou de stabilisation du regard. Ils ont pour tâche de réduire le glissement des images sur la rétine, et assurent ainsi une meilleure acquisition des informations, grâce à des mécanismes de contrôle de l'oculomotricité d'origine visuelle, vestibulaire ou proprioceptive. L'orientation comme la stabilisation sont finalement produites par la contraction des six muscles extraoculaires responsables des mouvements de rotation en trois dimensions de l'œil dans l'orbite. La rapidité des mouvements de l'œil (jusqu'à 800 degrés par seconde) et leur précision (quelques minutes d'arc), la multiplicité des sources d'informations (visuelle, vestibulaire, proprioceptive) aux caractéristiques géométriques et dynamiques variées et la nécessaire coordination spatiale et temporelle des commandes motrices requièrent des mécanismes neurologiques extrêmement complexes dont l'étude constitue l'un des principaux thèmes des recherches menées au laboratoire.

De la localisation de la cible à sa capture par le regard

Le colliculus supérieur et ses voies éfferentes (voie tectoro-tectale-spinale) sont des structures nerveuses du tronc cérébral directement impliquées dans la genèse des mouvements d'orientation de l'œil et de la tête. Nous enregistrons l'activité des neurones tectaux et réticulo-spinaux chez le chat et nous analysons les relations entre cette activité, les mouvements oculaires et la contraction des muscles du cou. L'injection dans le neurone d'une substance marquée permet de reconstituer la morphologie complète du neurone

enregistré, depuis l'arbre dendritique jusqu'aux terminaisons des collatérales de son axone. Nous avons développé au laboratoire un modèle de type réseau de neurones formels pour rendre compte des principales transformations spatio-temporelles requises pour passer d'un signal codant la position d'une cible dans une carte visuelle bi-dimensionnelle aux séquences de commandes motrices délivrées aux six muscles extra-oculaires permettant d'effectuer la saccade de saccade (voir figure). Chez l'homme, l'activité des diverses structures cérébrales lors de l'exécution de saccades volontaires dans le noir peut être analysée grâce aux techniques d'imagerie par émission de positons (PET) et par résonance magnétique (IRM). La mesure simultanée des mouvements des deux yeux permet d'analyser le rôle de la vision binoculaire dans l'adaptation plastique du regard.

Stabiliser les images

L'importance de la fonction de stabilisation des images se manifeste notamment lorsque l'on demande aux sujets des tâches d'identifications visuelles complexes. Ainsi, la capacité à déterminer la forme tri-

NEURAL BASIS OF EYE-MOTION CONTROL

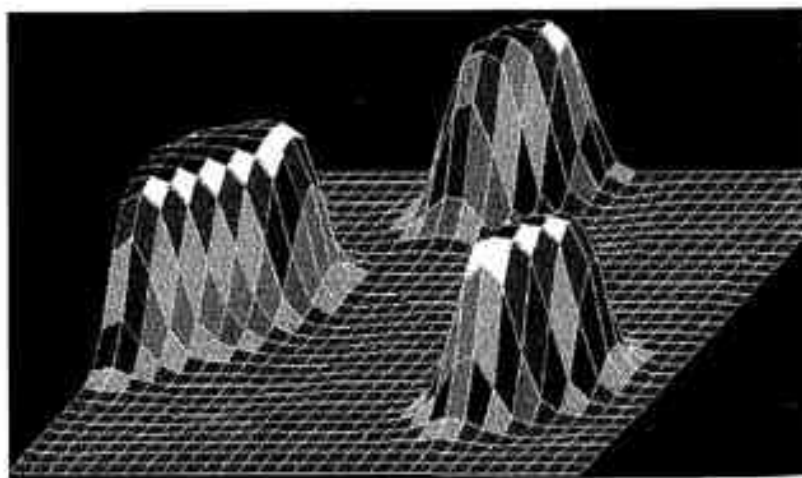
The understanding of gaze orientation and stabilization requires the contribution of various approaches ranging from the study of neuronal intrinsic properties and morphology to visual psychophysics and mathematical modelling. The results obtained recently have made oculomotricity one of the best known sensory-motor functions.

dimensionnelle d'un objet à partir de la distribution des vitesses sur la rétine produite par le mouvement de l'observateur exige une parfaite stabilisation du regard sur l'objet observé. Cette stabilisation est assurée par la coordination des mouvements de poursuite et des réflexes d'origine vestibulaires et proprioceptifs. Les bases biologiques de la stabilisation oculaire sont explorées au laboratoire grâce à une combinaison d'approches in vivo et in vitro : enregistrement de l'activité des neurones vestibulaires secondaires lors des mouvements de la tête de l'animal, étude sur tranche des propriétés intrinsèques et neuropharmacologiques des neurones vestibulaires.

■ Jacques Droulez, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de physiologie neurosensorielle (UPR 2 CNRS).

■ Alexej Grantyn, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de physiologie neurosensorielle (UPR 2 CNRS).

■ Pierre-Paul Vidal, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de physiologie neurosensorielle (UPR 2 CNRS), 15, rue de l'École de médecine, 75270 Paris Cedex 06.



Modèle d'assemblée neuronale ayant des capacités de miroir prédictive permettant d'actualiser en permanence la position d'une cible codée en coordonnées rétino-oculaires grâce à une copie éfferente de la vitesse du regard. (© J. Droulez, A. Barthod).

LE CONTRÔLE DU MOUVEMENT HUMAIN

La théorie des systèmes dynamiques non linéaires ébranle l'hypothèse classique d'une causalité endogène du mouvement biologique. L'hypothèse nouvelle est celle d'un contrôle, par le système nerveux, de processus largement autonomes.

Yves Guillard,
Jean Pailhoux

Le mouvement biologique présente simultanément des aspects d'intentionnalité et d'automatisme. Pleinement compatible avec l'arbitraire relatif des formes observées, l'idée classique que le système nerveux calcule librement le mouvement paraît contredite par l'absence d'un lien entre l'aisance avec laquelle les mouvements sont exécutés et le nombre des degrés de liberté musculosquelettiques mis en jeu.

A la lumière de la théorie des systèmes dynamiques non linéaires

aujourd'hui en plein développement dans diverses branches de la biologie, il apparaît de plus en plus clairement que l'idée d'une causalité endogène du mouvement est problématique. Dans les systèmes ouverts complexes maintenus hors-équilibre, les interactions dynamiques entre sous-systèmes font émerger une vaste diversité de formes en l'absence de toute représentation interne. Est-il dès lors raisonnable d'attribuer à l'instance centrale la responsabilité entière de la morphogénèse motrice ? Les esprits convergent vers une vision plus parcimonieuse dans laquelle l'intentionnalité gouverne l'ordre spatio-temporel du mouvement, opérationnalisé en termes de paramètres d'ordre, à travers la manipulation de paramètres de contrôle.

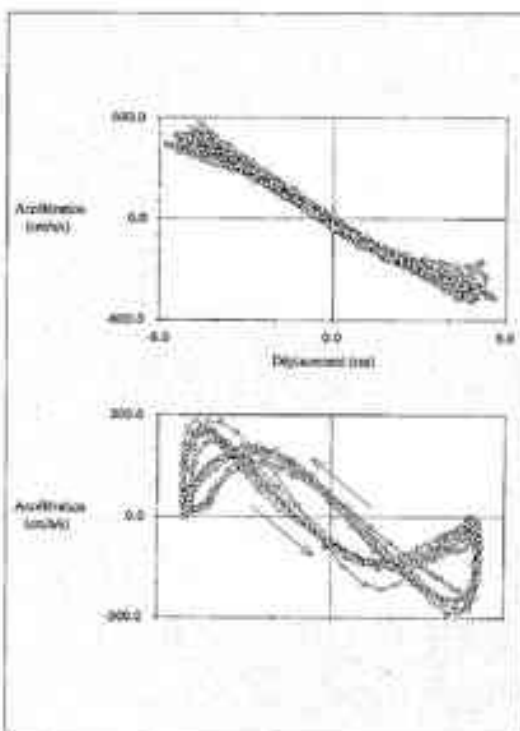
S'agissant de la locomotion, par exemple, on dispose de modèles du système effecteur musculo-squelettique, sous forme d'équations de Newton-Euler, qui produisent des comportements rythmiques spontanés. Ce cadre théorique permet de caractériser le rôle de l'intentionnalité. Par exemple, l'intention de marcher plus vite modifie la trajectoire dynamique du système. Du fait de l'existence d'attracteurs dans l'espace de phase considéré, une modification volontaire minime de la valeur d'un paramètre de contrôle peut suffire à entraîner le basculement d'un régime stable de locomotion à un autre. Cette approche permet de comprendre d'une façon opérationnelle comment un mouvement s'organise macroscopiquement, sans postuler le contrôle analytique d'innombrables degrés de liberté.

HUMAN MOTION CONTROL. - In the light of the nonlinear dynamical systems theory, in rapid development throughout the various branches of biology, the classical notion according to which movements of living organisms have an endogenous causality becomes questionable. New evidence points to the more parsimonious view that intentionality controls motor processes which are basically autonomous.

Modéliser les mouvements automatiques

S'il est acquis que les mouvements rythmiques automatiques tels que ceux de la locomotion sont modélisables avec succès en termes dynamiques, cette modélisation ne paraît pas s'accommoder aisément d'une motricité moins stéréotypée. Ainsi a-t-on encore peu étudié, dans la perspective dynamique, les mouvements naturels du membre supérieur, mouvements souvent non périodiques et généralement guidés par la vision, comme c'est le cas dans un geste isolé de pointage vers une cible.

Considérant le mouvement discret comme un cas limite du mouvement périodique, on peut montrer, dans une expérience de pointage visuo-manuel, que le mouvement discret est réductible au mouvement cyclique. Si l'on augmente graduellement la difficulté de la tâche en réduisant la largeur des cibles, on observe que les oscillations produites, harmoniques (sinusoïdales) pour un niveau de difficulté réduit, deviennent assez rapidement anharmoniques, jusqu'à reproduire très exactement le cas d'une concaténation de mouvements discrets. Il y a donc transition possible entre un régime conservatif du type mouvement harmonique simple et le régime totalement dissipatif qui caractérise le mouvement discret, concaténé ou non (voir figure).



Représentation dans le plan accélération-déplacement d'un mouvement cyclique de pointage visuo-manuel. A un niveau de difficulté modérée (cibles larges), le tracé quasi-harmonique est caractéristique d'un régime oscillatoire conservatif (en haut). Si l'on réduit la largeur des cibles, le tracé devient de moins en moins linéaire, jusqu'à reproduire la concaténation de mouvements discrets totalement dissipatifs (en bas).

Yves Guillard, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de neurosciences cognitives (UPR 9012 CNRS), 31, chemin Joseph Aiguier, BP 71, 13402 Marseille Cedex 09.

Jean Pailhoux, directeur de recherche au CNRS, directeur du Laboratoire Cognition et mouvement (URA 1166 CNRS), Bât IBHOP, 5, traverse Charles Savini, 13388 Marseille Cedex 13.

DES RÉTINES EN SILICIUM POUR UNE VISION DES ROBOTS

Des rétines électroniques intelligentes, réunissant en un même circuit intégré les détecteurs photoélectriques, les codeurs analogiques/numériques et le calculateur de reconnaissance des formes, rendent plausible la vision des robots.

Bertrand Zavidovique

Il n'y aura pas de robots sans perception. Au sein de la perception, la vision est fondamentale par son caractère passif et général. Mais que serait un robot dont l'œil pèserait autant que le bras ou qui consacrerait toute sa vie à analyser une seule situation ? Il faut donc réussir à construire des "rétines électroniques", c'est-à-dire des dispositifs qui concentrent, en un seul circuit intégré de quelques millimètres carrés, le capteur et une partie du traitement d'image jusqu'à la reconnaissance de formes. Ces micro-systèmes sont de vrais calculateurs hyperparallèles à entrée optique. Ils sont capables d'accélérer les réactions d'une machine à son environnement jusqu'à la rendre adaptée aux tâches qu'on lui assigne, grâce à leurs propres aptitudes à la discrimination rapide de formes simples ou à la poursuite de cibles, leur adaptabilité instantanée aux conditions d'éclairage ou à la nature des scènes.

Le principe d'une vision fruste des robots a donc été défini, qui fonde une théorie et des réalisations effectives : dans l'état actuel de la technologie, on sait construire une rétine silicium de 5000 cellules ("neurones") permettant d'acquérir une image et de la transformer plusieurs milliers de fois par seconde en une image plus simple, binaire d'abord, symbolique ensuite. Si inspiration animale il y a, elle vient plus de la grenouille que des animaux supérieurs, par référence à des opérateurs spécialisés pour des classes générales d'application comme la détection d'objets convexes en mouvement, de changement de luminosité moyenne dans une partie compacte de la scène et plus généralement une vision d'alerte autonome.

Transformer des données en actions

Cette recherche est fondamentale en ce que, au-delà de ses résultats mathématiques et électroniques, elle permet une meilleure compréhension de la vision, considérée ici en tant que phénomène physique, débarrassée de toute connotation anthropomorphique, si ce n'est pour

d'éventuelles inspirations. Et il s'agit d'une physique de l'artificiel puisqu'ici des machines doivent voir et agir. Au sens où l'intelligence peut être artificielle, la physique et ses méthodes doivent aider à maîtriser des systèmes dont l'énergie est information et qui transforment des données en actions.

Exploiter le contexte

Noas avons donc développé des circuits intégrés à la fois pour l'expérimentation et comme présomptions de la validité de notre théorie. Pour ne pas a priori définir des niveaux dont les interfaces consomment beaucoup d'énergie (changement de représentation) ni restreindre les applications, nous exploitons la contrainte universelle qu'est l'existence du contexte dans la perception.

Contexte logiciel d'abord, lié à l'action envisagée du robot : il impose qu'abstraction faite de la sémantique définie par cette action, le plus clair de la reconnaissance intéresse la structure des formes avant toute autre caractéristique (Fig. 1). Contexte matériel ensuite : les opérateurs et autres processeurs suggérés par la représentation mathématique de la vision ainsi construite sont à concrétiser avec les moyens que la microélectronique nous propose. Ceci incite à identifier en une quête systématique, les "opérativités" naturelles et fondamentales supportées par le silicium, les transistors, leurs assemblages, etc. Ces opérativités vont en effet contribuer plus efficacement aux fonctions

SILICON RETINA FOR ROBOT EYESIGHT - The concept of "rough vision" was elaborated when looking for natural silicon functionalities to support image processing. It focuses on pattern structures, excluding any action-related semantics. It is integrated as binary coding followed by boolean processing, the map-product of which implements, both programming and learning.

de vision pressenties grâce au modèle théorique. Dans la confrontation, ces mêmes fonctions sont modifiées, prouvant à nouveau le caractère fondamental de la démarche, car leurs avatars sont souvent optimaux au sens de critères non pris en compte auparavant, d'où une régularisation progressive de bon augure pour l'avancement de la connaissance.

Formaliser la vision fruste

Le processus de vision fruste est complet, c'est-à-dire susceptible, pour un contexte bien délimité, de permettre jusqu'à la reconnaissance ou la poursuite. Il présente les caractéristiques suivantes :

- les images sont représentées par des images binaires, où une répartition locale de 0 et de 1 retrace le niveau de gris (c'est-à-dire l'intensité lumineuse en un point) avec une perte d'information paramétrable ;
- les images sont traitées par la famille unique des fonctions booléennes de voisinage. L'unité de représentation des données et des opérateurs conduit à une manipulation efficace ;
- la programmation s'opère selon un mécanisme unique qui est la composition au sein des fonctions (Fig. 2). On peut ainsi atteindre avec une remarquable économie de mémoire des opérations puissantes car de très large support ;
- une forme dégénérée d'apprentissage est associée à cette vision : la construction

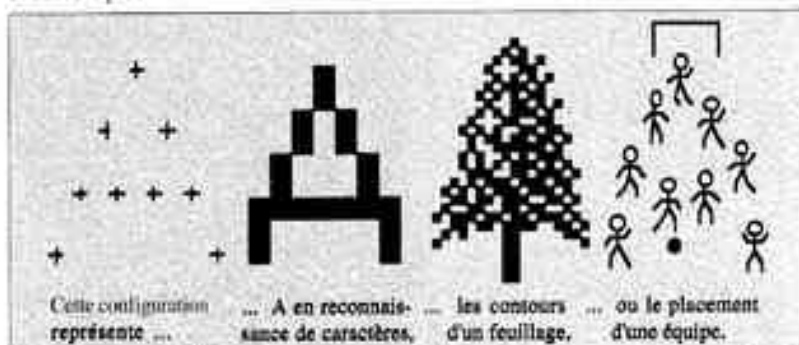


Fig. 1 - Structure, Sémantique et Multirésolution...

automatique de la sous-classe de fonctions reconnaissant une forme étiquetée intéressante.

Adapter le codage

On peut imaginer plusieurs procédés de codage plus ou moins aisément implantés sous forme microélectronique. Par exemple, pour essayer de rendre optimal au sens de la théorie de l'information le couple codage - traitement, on en arrive à minimiser à la manière neuromimétique une distance entre l'image initiale (analogique) et l'image codée (binaire) (Fig. 3). Cette distance est paramétrée par une mesure d'intégration (mathématique) que l'on est conduit à modifier pour une

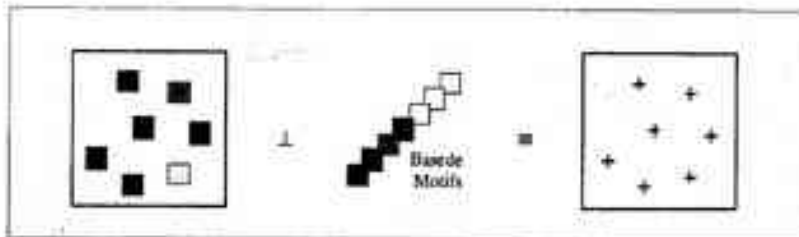


Fig. 2 - Le traitement repose sur un agencement de motifs de plus en plus globaux

métrie. Le dernier prototype de rétine, effectivement intégré, testé et mis en œuvre par F. Devos et T. Bernard, offre désormais une résolution de 64 x 76 pixels, donc acceptable en tant que sys-

pixel se résume à trois cellules logiques, trois points mémoire et un réseau de communication, le tout en vingt-huit transistors et six fils de commande.

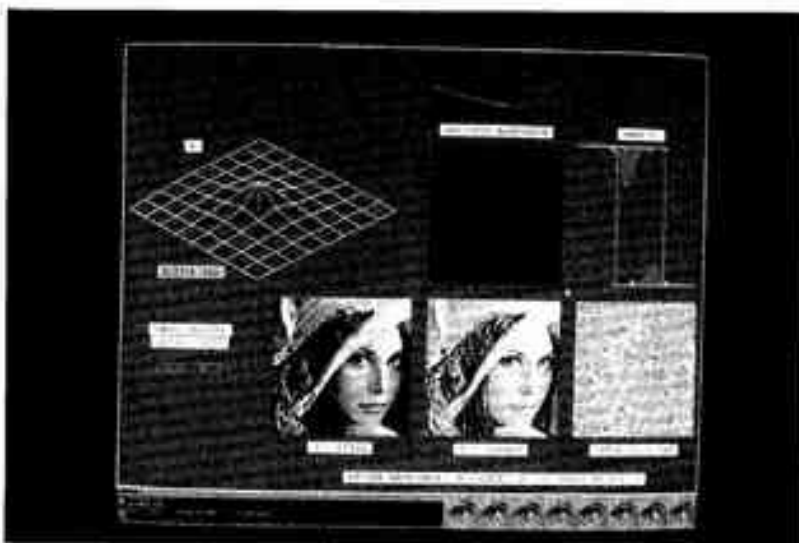


Fig. 3 - "Lena" en cours de codage par le simulateur, à mi-chemin de l'optimum d'information encore distincte dans l'image la plus à droite retrace les neurones encore actifs.

meilleure densité d'intégration (microélectronique). Il se trouve alors que le nouveau codage a des qualités accrues. Ceci confirme un caractère fondamental de la pensée analogique : une implantation physique plus naturelle et dense améliore le traitement de l'information.

Reconnaître et poursuivre

Pour ce qui est de la reconnaissance, un simulateur fonctionnel de rétine, bâti sur un procédé de décomposition formelle, supporte la construction progressive du traitement adapté. Des applications de poursuite ont été ainsi menées à bien (Fig. 4).

Parallèlement, l'architecture binaire de la rétine est définie, compromis entre technologie VLSI et vision souhaitée, de mieux en mieux révélé par ces applications et par des essais en vraie grandeur comme une rétine spécialisée en écarto-

tème, au moins pour l'expérimentation, quand on sait que les expériences sur la vision de voitures automobiles autonomes ou de missiles se contentent de capteurs 32 x 32, également suffisants en lecture automatique. Le processeur d'un

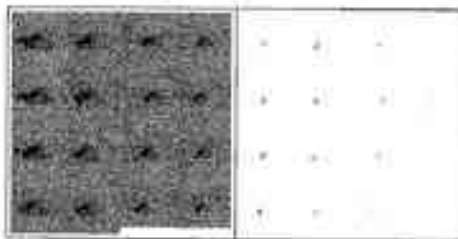


Fig. 4 - À gauche : en colonne seule image "intra-rouge" d'un char s'éloignant. À droite : les marqueurs de poursuite dans le même ordre. La rétine poursuit le char en appliquant le traitement construit pour reconnaître la forme initiale de la séquence. Sans rafraîchissement (apprentissage), la reconnaissance devient hasardeuse au troisième échantillon.

Rendre la rétine opérationnelle

Les recherches portent maintenant sur :
- la mise en œuvre de cette dernière rétine, notamment l'étude de son contrôleur, à la faveur de l'installation effective d'algorithmes sur elle ;
- l'exploitation de la théorie de l'information dans la génération automatique des traitements par la rétine elle-même, d'après les formes qu'elle enregistre (à ce jour une *connection machine* est mobilisée !);
- l'implantation d'une couche de prétraitements analogiques au plus près du codage neuronal, sur un procédé silicium de qualité analogique.

Sans attendre leur aboutissement, des applications sont d'ores et déjà envisageables dans tous les contextes de vision qui sont restreints ou peuvent le devenir. Citons par exemple l'analyse industrielle et la caractérisation automatique de processus par l'image (contrôle de déplacement, de positionnement) ou le contrôle qualité de produits (mesure de dimensions, comptage sélectif d'objets), l'analyse de composition biochimique (numération, formes pathologiques), la surveillance automatique, l'identification, la reconnaissance de caractères (saisie, transmission, codage et compression), la détection/poursuite (très actuelle dans les préoccupations de défense mais qui est aussi une base de la vision temps réel puisqu'elle permet d'augmenter le temps laissé à la reconnaissance), l'assistance à la microchirurgie (exploration, accélération du geste, prévention d'accidents), l'aide à la conduite automobile (détection d'obstacles, asservissement sur la route).

Bertrand Zavidovique, professeur à l'Université de Paris-Sud, Institut d'électronique fondamentale (URA 22 CNRS), Université Paris-Sud, Bât 220, 91405 Orsay.

Mémoire et représentation



u'ils soient produits par la nature ou bien construits par l'ingénieur, les systèmes cognitifs sont des systèmes dotés de mémoire, créateurs et manipulateurs de représentations. La mémoire est assurément une propriété essentielle des systèmes auxquels s'intéressent les sciences de la cognition. La notion de représentation est elle-même fortement présente, même s'il lui arrive d'être "interrogée", comme c'est le cas de la part de certains théoriciens d'une "intelligence sans représentations". Pour ce qui concerne la psychologie, il faut rappeler que celle-ci a vécu pendant des décennies sans recourir à la notion de représentation, avant que ne s'impose l'idée qu'il est impossible d'expliquer le comportement des organismes vivants sans prendre en compte les représentations qu'ils ont intériorisées de leur environnement.

Pourquoi les sciences cognitives font-elles jouer un rôle si important, parfois même central, au concept de représentation ? D'abord, sans doute, parce que les représentations existent dans le monde et que la cognition quotidienne s'y applique. Ainsi en est-il des représentations manu-



R. Magritte, *La mémoire II* (1948), collection de l'État belge (D'ADAGP Paris 1992, Photothèque René Magritte - Graudon).

facturées – icônes, portraits, cartes routières, fichiers de données – dont la vocation, pour un utilisateur potentiel, est de tenir lieu d'autres objets et de supporter des traitements au moins en partie analogues à ceux qui devraient normalement s'appliquer à ces objets. Ces entités, qui assurent une fonction de substitution, sont porteuses d'une valeur symbolique authentique, même si celle-ci reste limitée aux opérations que ces entités sont appelées à supporter.

Les représentations construites par l'homme, le plus souvent soumises à des exigences de rationalité, sont à distinguer des représentations que l'on qualifie parfois de "naturelles", comme celles qui émergent du fonctionnement des systèmes biologiques, ceux d'entre eux tout au moins qui sont pourvus de la

capacité de traiter l'information extraite de leur environnement et de conserver les traces de ces traitements sous une forme utilisable pour des objectifs comportementaux ultérieurs.

La notion de représentation, comme entité qui se substitue à une autre (absente) pour servir des fonctions similaires, est par ce fait même étroitement apparentée à la notion de mémoire, comme lieu de préservation de l'expérience, et en particulier de l'expérience cognitive. Si toutefois la mémoire est interprétable comme un répertoire de représentations, il faut également admettre que certaines représentations puissent ne pas être directement accessibles au système qui les porte et ne soient pas susceptibles de faire l'objet de sorties comportementales directement observables. Cependant, le caractère interne des représentations naturelles n'invalide pas l'effort des chercheurs en vue de produire à leur sujet des assertions scientifiquement fondées. Les représentations internes d'un système vivant sont à un certain degré connaissables par la mise en œuvre d'hypothèses appuyées sur l'analyse d'observables comportementaux. En outre, l'infrastructure sur laquelle s'inscrivent

les mécanismes de la mémoire est accessible aujourd'hui à la connaissance scientifique. Un éventail de techniques de plus en plus sophistiquées permet d'identifier les entités physiques qui sont actives lorsqu'un système construit ou manipule de nouvelles représentations.

Dans les représentations dont traitent les sciences cognitives, certains traits importants valent d'être relevés. En particulier, une représentation n'a pas d'existence sans un système de traitement capable de la manipuler. Les représentations – qu'elles aient été délibérément construites ou qu'elles soient naturelles – ne sont pas créées pour constituer, au sein du système qui les accueille, des copies dormantes d'une réalité extérieure. Une représentation tire son statut de représentation du fait que sa valeur informationnelle (sa sémantique) est exploitable et effectivement exploitée. Ces aspects sont spécialement saillants dans les situations où des individus utilisent leurs représentations avec une visée prospective, lorsqu'ils créent mentalement des états virtuels, non encore réalisés du monde, en vue d'anticiper des événements ou de visualiser des hypothèses. La possibilité de faire face cognitivement à des questions nouvelles, impliquant l'agencement original d'informations puisées dans la mémoire, dépend évidemment de la capacité qu'ont les individus de créer et de manipuler des représentations. Aussi, lorsque l'intelligence artificielle se propose de simuler les processus de la pensée humaine, c'est à travers sa capacité de transformer des représentations ou d'en créer de nouvelles que se manifeste l'intelligence des systèmes ainsi créés. Cette "intelligence" est étroitement liée aux capacités

des systèmes d'utiliser leur mémoire (en l'activant, mais aussi parfois en l'étendant ou en l'actualisant).

Les représentations dont dispose un système à mémoire ne peuvent être complètement comprises sans que soit pris en compte le support sur lequel elles s'inscrivent. Ce support confère aux représentations une forme et une structure interne et, par ce fait même, détermine les processus qui vont s'appliquer à elles. C'est ce type de considération qui a fait franchir aux chercheurs le pas qui mène des approches purement computationnelles aux approches incorporant des préoccupations relatives à l'architecture des systèmes. Alors que les approches computationnelles se donnent pour objectif de définir, dans le fonctionnement des systèmes, les produits de calculs appliqués à des données, sans considérer comment ces calculs sont effectués, l'approche en termes d'architecture fonctionnelle tient compte, pour sa part, des contraintes attachées à l'exécution des traitements. Ainsi se trouve renforcée la nécessaire distinction entre les représentations, comme structures porteuses d'information, et les supports sur lesquels les représentations s'inscrivent. L'idée introduite est qu'il existe des supports différents pour recevoir différents types d'information (analogique, linguistique, etc.) en fonction de leur type de structuration, et que ces supports imposent des contraintes spécifiques sur les opérations de traitement.

La prise en charge de ces questions par les sciences cognitives implique une démarche modélisatrice, et donc le recours à des formalismes adaptés, qui n'appauvrissent pas les structures et les processus modélisés et rendent effectivement possibles le

calcul et la simulation. Dans le domaine de la mémoire, certains formalismes ont été largement exploités, comme les réseaux sémantiques ou les scripts. D'autres catégories de modèles, associées à des conceptualisations plus réticentes à l'égard de l'approche symbolique, se signalent néanmoins aujourd'hui à l'attention des chercheurs. Ainsi les modèles connexionnistes présentent-ils, pour les chercheurs concernés par la question des représentations, l'intérêt de permettre la simulation de mécanismes automatiques, indépendants des représentations préalables dont dispose un système cognitif, mais néanmoins capables de faire émerger des organisations présentant certaines propriétés des représentations (comme, par exemple, les représentations prototypiques). Ce qui, au total, rend inévitable – et heuristique – la prise en compte des concepts de mémoire et de représentation par les chercheurs en sciences cognitives, c'est que ces concepts sont indispensables pour rendre compte de la capacité qu'ont les agents cognitifs d'échapper aux déterminismes immédiats de leur environnement. Mémoire et représentation constituent des processus par lesquels un système remplace une information externe absente par une information qu'il a conservée à l'intérieur de lui-même. A partir de cette restitution d'une information absente, la possibilité de substituer aux actions sur le réel des actions symboliques, purement internes, constitue une extension significative des capacités d'adaptation des systèmes à leur environnement.

■ Michel Denis, directeur de recherche au CNRS.
■ Joël Quinqueton, directeur de recherche à l'INRIA.

LA MÉMOIRE, FORME DE LA COGNITION

Un système cognitif, c'est d'abord un système à mémoire. Il n'est donc pas surprenant que la mémoire soit un objet d'étude prioritaire des sciences cognitives.

■ **Guy Tiberghien**

La mémoire a été très longtemps considérée comme une simple forme de la cognition, spécialisée dans la représentation du passé. Le développement des sciences cognitives, depuis deux décennies, a démontré que cette conception était erronée ou, à tout le moins, partielle. La mémoire, c'est probablement la forme même de la cognition. En effet, les processus mnésiques ne déterminent pas seulement les possibilités d'accès aux représentations des événements du passé, mais les propriétés des mémoires transitoires et permanentes déterminent aussi notre présent psychologique et ce qui sera encodé, représenté et stocké dans notre environnement immédiat. De plus, la mémoire oriente nos anticipations cognitives, influence la répartition de nos ressources "attentionnelles" et engendre ces surprises potentielles qui jouent un si grand rôle pour l'éveil de notre conscience et pour nos capacités d'apprentissage. La mémoire, ce n'est donc pas seulement le passé... c'est aussi le présent et le futur de la cognition.

Mais, dans une perspective plus essentielle encore, on peut affirmer que la façon dont la mémoire est théoriquement conçue et décrite détermine entièrement la nature des opérations cognitives qui seront rendues possibles. Dis-moi comment tu conçois la mémoire d'un système et je te dirai de quelles acquisitions ce système est capable et quelle est la nature exacte de son "intelligence". Le concept de mémoire est peut-être encore plus primitif que celui de cognition ou, si l'on préfère, un système cognitif ne peut émerger que du fonctionnement d'un système "à mémoire".

Les méthodes d'étude de la mémoire humaine

Notre connaissance des lois structurales et fonctionnelles de la mémoire a connu une forte progression au cours de la période récente. Prolongeant les méthodes directes d'étude de la mémoire (rappel et reconnaissance), de nouvelles méthodologies sont apparues dans ce domaine : méthodes indirectes et simulation. Données expérimentales, observations cliniques et modélisations ont profondément modifié nos conceptions théoriques de la mémoire humaine (par exemple, réévaluation de la dichotomie mémoire à court terme / mémoire à long terme).

Une ou plusieurs mémoires ?

Sur le plan expérimental, d'importantes dissociations ont été mises en évidence, en particulier dans le domaine neuropsychologique. A titre d'illustration, les capacités de rappel sont très perturbées chez les patients amnésiques, mais ceux-ci ne diffèrent pas des sujets normaux quand leur rappel a lieu en présence d'un indice sémantique ou quand leur mémoire est étudiée par des méthodes indirectes. La contribution fonctionnelle de certaines régions cérébrales (cortex frontal, diencéphale, hippocampe) aux processus mnésiques est explorée dans des protocoles de plus en plus rigoureux. Enfin, les recherches expérimentales, neurophysiologiques et cliniques, ont fait émerger d'importantes distinctions fonctionnelles : mémoire sémantique vs mémoire épisodique, mémoire déclarative vs mémoire procédurale, mémoire explicite vs mémoire implicite.

La dernière distinction oppose ainsi une forme de mémoire impliquant un souvenir conscient (mémoire explicite : rappel classique, par exemple) à une forme de mémoire où un épisode précédemment encodé s'exprime dans une situation sans souvenir conscient (mémoire implicite : accès lexical par exemple). De nombreux facteurs expérimentaux exercent des effets différents sur la mémoire implicite et la mémoire explicite : l'intervalle de rétention atténue ainsi les performances en mémoire explicite, mais n'a pas ou peu d'effet sur la mémoire implicite. Les patients amnésiques (lésions cérébrales des régions médio-temporale ou diencéphalique) ont une mémoire explicite très perturbée, alors que leur mémoire implicite est normale. Le débat théorique porte ici sur les mécanismes cognitifs susceptibles d'expliquer de telles dissociations (activation, traitement piloté par les données ou les concepts) et sur le caractère unitaire de la mémoire humaine.

Modèles de mémoire

La modélisation de la mémoire humaine a, sans aucun doute, bénéficié des recherches en intelligence artificielle. Des langages de description rigoureux de l'information symbolique et de son organisation ont permis un meilleur contrôle expérimental et le développement de modèles computationnels de la mémoire permanente. Des modèles de simulation se sont développés au niveau

MEMORY, A FORM OF COGNITION - Memory is not only a specific form of cognition of previously encoded events. Rather, it is the basis of cognition. Every cognitive system is basically a memory system. This paper presents a short report on the methodology of memory studies, clinical and experimental data on the topic, models of memory and locus of memory studies within the field of cognitive science.

des représentations symboliques et de leur organisation syntaxique en mémoire permanente, mais aussi au niveau subsymbolique (réseaux connexionnistes, neuro-mimétiques ou psycho-mimétiques de la mémoire).

Mémoire et sciences de la cognition

Quelques lignes de force émergent de cette brève description :

- 1) l'articulation entre les processus centraux et les processus sensoriels est sans doute une question critique de l'exploration des processus mnésiques ;
- 2) la relation entre le niveau d'explication symbolique et le niveau d'explication subsymbolique soulève des problèmes théoriques, méthodologiques et techniques dont les solutions sont encore en débat ;
- 3) le progrès des connaissances dans ce domaine de recherche va également dépendre, en partie, de la capacité des chercheurs à préciser leurs analyses cognitives à l'aide de nouveaux indicateurs (association de l'analyse chronométrique à l'enregistrement des potentiels évoqués et aux technologies d'imagerie cérébrale) ;
- 4) la simulation computationnelle des processus mnésiques est une pièce stratégique dans le développement des sciences de la cognition et elle devrait continuer à se développer en liaison étroite, évidemment, avec l'investigation expérimentale ;
- 5) pour toutes les raisons précédentes, la recherche cognitive sur la mémoire humaine ne pourra se développer, de façon optimale, sans une approche pluridisciplinaire et coordonnée impliquant l'informatique fondamentale, la linguistique, les neurosciences et la psychologie cognitive. C'est précisément l'objectif du programme scientifique des sciences de la cognition.

■ **Guy Tiberghien**, professeur à l'Université Pierre Mendès-France, directeur du Laboratoire de psychologie expérimentale (URA 663 CNRS), 1251, avenue Centrale, Domaine universitaire, BP 472, 38040 Grenoble Cedex 9.

L'ATTENTION SÉLECTIVE

Devant une scène visuelle complexe, on ne peut pas identifier tous les éléments à la fois ; l'attention sélective va permettre de faire un choix.

■ **Eric Siéroff**

■ L'attention est une instance de contrôle de notre activité mentale, et chacun connaît les conséquences d'une attention dirigée sur un événement : meilleure clarté de cet événement, prise de conscience, meilleure mise en mémoire.

Il y a deux aspects fondamentaux dans le déroulement de l'attention : le maintien non sélectif du niveau d'attention (ou vigilance : par exemple lorsqu'on attend des événements rares) et la sélection de l'information. L'attention sélective est bien illustrée dans la modalité visuelle. Devant une scène visuelle, il est rarement possible de reconnaître tous les éléments à la fois et il faut choisir, sélectionner.

L'émergence de l'approche cognitive a donné un vif intérêt aux mécanismes de l'attention sélective. Il a été ainsi démontré expérimentalement que l'on peut porter son attention vers des positions sélectionnées de l'espace en l'absence de mouvements oculaires, grâce à des indices spatiaux. Cette sélection a des effets qui peuvent être mesurés en bénéfices et en coûts. Le traitement de toute information apparaissant dans cette position sera meilleur (mesuré en temps de réaction ou sur l'acuité de la réponse) que si aucun indice n'avait été présenté (donc sans sélection). En revanche, toute infor-

mation apparaissant dans une autre position que celle qui a été sélectionnée sera moins bien traitée (Fig. 1).

L'information visuelle est traitée en deux temps

Il est important de comprendre comment interviennent des mécanismes attentionnels dans la reconnaissance des formes. La perception subjective d'un ensemble signifiant semble précéder celle de ses constituants. En fait, il y aurait deux étapes dans le traitement de l'information visuelle. A une première étape, le traitement du message visuel s'effectue automatiquement, sans que le sujet lui porte une quelconque attention. Selon cette procédure automatique, plusieurs éléments de l'information peuvent être traités simultanément. A une seconde étape, certains aspects de l'information requièrent une attention focalisée. Selon cette procédure attentionnelle, plusieurs éléments nécessiteront d'être traités séquentiellement.

Ainsi, des caractéristiques visuelles simples, comme l'orientation de lignes ("L" ou "T"), l'intensité ou la couleur sont traitées automatiquement. Des modifications uniques de ces caractéristiques "sauteront" aux yeux, par un phénomène automatique. En revanche, la combinaison de ces caractéristiques simples ("L" ou "T") nécessite plus d'attention. Des modifications de ces combinaisons sortiront moins bien du fond et nécessiteront une certaine attention pour être détectées (Fig. 2).

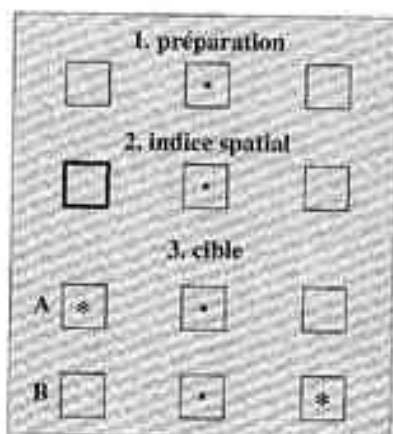


Fig. 1 - Dans cette expérience, le sujet fixe le carré central et un autre carré d'allure attirant son attention (indice). Une cible apparaît dans ce carré (A) sera mieux détectée (même si le sujet ne bouge pas les yeux) qu'une cible apparaissant dans le carré opposé (B).

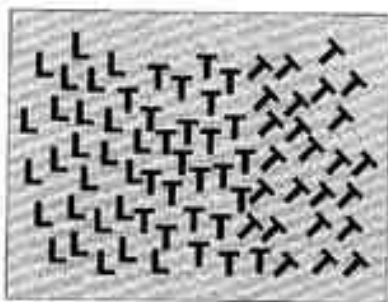


Fig. 2 - Dans cette expérience, il s'agit de localiser d'éventuelles frontières entre les régions de diverses figures. Certaines frontières sautent aux yeux, par exemple quand une seule caractéristique change (l'orientation du T). D'autres sont peu évidentes et nécessitent plus d'attention, quand c'est la combinaison des caractéristiques qui change (L et T).

SELECTIVE ATTENTION - One cannot simultaneously identify every single element of a complex visual scene. A choice needs to be made : this is the role of selective attention. The effects of selective attention on information processing can be measured in cost-benefit terms. The role of attention in the identification can also be evaluated.

L'influence des connaissances

L'attention est aussi un phénomène dynamique qui est influencé par nos propres connaissances. Ainsi, on sait que le besoin d'attention pour identifier un mot connu comme *montagne* est moins fort que pour identifier un stimulus nouveau comme *manquine*. Si les lettres du premier stimulus peuvent être intégrées quasiment en parallèle parce que leur combinaison est déjà représentée dans notre mémoire, les lettres du second stimulus devront être sélectionnées pratiquement une à une. Dans le cas du mot, nos connaissances vont suppléer le besoin d'attention.

L'attention a aussi eu beaucoup d'écho en neurosciences. Les mécanismes précédemment décrits ont été reliés à différentes structures du cerveau. Par exemple, le lobe pariétal a un rôle fondamental dans les mécanismes de l'attention visuelle. De plus, les structures intervenant dans l'attention seraient organisées en un véritable réseau, très complexe anatomiquement et fonctionnellement. Actuellement, l'attention est un des domaines où l'interaction entre les approches cognitives et neuroscientifiques est une des plus fortes.

■ **Eric Siéroff**, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de psychologie expérimentale, psychologie cognitive et sciences de la cognition (URA 665 CNRS), Université Pierre Mendès France, Bât. Sciences humaines et mathématiques, BP 47X, 38040 Grenoble Cedex 9.

LES APPRENTISSAGES NON-CONSCIENTS

Chacun s'accorde à reconnaître l'influence inconsciente de l'expérience antérieure sur l'activité cognitive. Mais cette influence est-elle médiatisée par l'abstraction de régularités formelles dans notre interaction avec l'environnement, ou est-elle la conséquence directe d'événements spécifiques ?

■ Pierre Perruchet

L'homme est immergé depuis sa naissance dans un environnement structuré par un ensemble de lois physiques, sociales, linguistiques, et autres. Son adaptation à cet environnement, associée à son incapacité à en verbaliser la plupart des lois, suggère que celles-ci sont apprises et mises à profit de façon non intentionnelle et inconsciente. Dans quelle mesure cette intuition est-elle scientifiquement confirmée ?

Une approche possible consiste à reproduire les conditions naturelles dans des situations contrôlées et miniaturisées. Des sujets adultes ont à réaliser une tâche impliquant le traitement d'un matériel structuré, à leur insu, par des règles arbitraires trop complexes pour être découvertes durant les quelques minutes ou quelques heures de l'expérience, même en cas de recherche active.

Par exemple, les sujets ont à mémoriser des chaînes de lettres dont l'ordre, apparemment aléatoire, respecte en fait une "grammaire miniature". Les sujets acquièrent, dans ces conditions, la capacité de juger du caractère "grammatical" ou "non grammatical" de nouvelles chaînes, bien qu'ils restent incapables de verbaliser les règles abstraites de la grammaire.

L'interprétation des données expérimentales

L'interprétation conventionnelle de ces données, et des nombreuses données similaires, est que les sujets abstraient inconsciemment les règles structurantes, et les utilisent, également inconsciemment, pour s'adapter à une nouvelle situation.

Mais une interprétation alternative est possible. Elle repose, d'une part, sur la découverte de l'extrême sensibilité du comportement à l'influence d'événements passés spécifiques, même s'ils ne sont pas, ou plus, accessibles à la conscience (voir encadré), et, d'autre part, sur la mise en évidence du fait que l'adaptation à des situations nouvelles peut naître de la généralisation liée à une similarité de surface des situations anciennes et des situations nouvelles, sans qu'une quelconque communauté de structure soit abstraite. Ainsi

dans notre exemple, des chaînes de lettres jamais présentées antérieurement peuvent-elles être jugées grammaticales simplement parce qu'elles ont une apparence similaire à des chaînes ou des fragments de chaînes grammaticales antérieurement perçus.

Cette interprétation alternative permet non seulement de rendre compte des mêmes données que l'interprétation conventionnelle, mais se révèle en meilleur accord avec les résultats expérimentaux lorsque le plan d'expérience a été élaboré pour opposer les prédictions (généralement très proches) des deux modèles.

Le retour aux conditions naturelles

Si l'on confère quelque pertinence à ces données vis-à-vis de nos questions initiales en dépit de la distance séparant les situations expérimentales du monde réel, ces résultats invitent à renoncer à l'hypothèse d'un agent inconscient qui, à l'instar du physicien, du sociologue, du linguiste,

UNCONSCIOUS LEARNING - Artificial grammar-learning paradigms as well as a number of other rule-governed experimental settings are devised to observe in controlled conditions what people learn implicitly in real world situations. Recent research shows that performance, once thought of as attesting of the unconscious abstraction of the deep structure of experimental material, is better accounted for by simple generalization processes operating on the implicit memory of specific events.

ou plus généralement de l'adulte exerçant consciemment une activité de logicien, abstrait les régularités de l'environnement, et utilise ces connaissances abstraites. L'influence inconsciente du passé sur nos comportements pourrait s'exercer grâce à l'application de processus de généralisation relativement simples, prenant pour matière la mémoire implicite d'une multitude d'événements ayant conservé leur individualité.

■ Pierre Perruchet, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de psychologie différentielle (URA 316 CNRS), Université René Descartes, Centre Henri Poincaré, 28, rue Serpente, 75006 Paris.

LA MÉMOIRE IMPLICITE

Lorsque l'on parle de mémoire, référence est faite habituellement à la fonction permettant de rappeler ou reconnaître explicitement un événement passé. Mais l'influence à long terme d'un événement peut être observée autrement.

Supposons par exemple que l'événement cible initial soit la lecture du mot *saumon*. Cet événement aura pour effet d'augmenter la fréquence d'énonciation de *saumon* dans une tâche ultérieure consistant à compléter *sau* par le premier mot venant à l'esprit. Il en sera de même dans une tâche consistant à citer des noms appartenant à la catégorie des poissons, ou, de façon générale, dans toutes les tâches où *saumon* peut ou doit être produit ou identifié. Ces effets révèlent une mémoire implicite de la lecture initiale. Le terme implicite se réfère au fait que la performance observée n'est pas due à la mise en relation explicite et intentionnelle de la tâche actuelle à l'événement passé.

Les recherches récentes sur ce phénomène ont montré l'extrême sensibilité du comportement à des événements passés singuliers. Des effets peuvent être observés alors que l'information initiale a été présentée à l'insu du sujet, par exemple durant une durée trop brève pour autoriser son identification, ou encore, alors que le sujet était sous anesthésie générale pour une opération chirurgicale.

Lorsque l'événement initial est identifié consciemment, son influence sur le comportement ultérieur peut se prolonger bien au-delà de la mémoire explicite de cet événement. Une influence est encore détectable lorsque le souvenir est détérioré par l'âge, ou par diverses atteintes neurologiques. Des effets liés à une exposition unique à des stimuli persistent sans décroissance après plusieurs jours ou plusieurs semaines; certains effets ont été mis en évidence après plus d'une année, alors que les sujets étaient depuis longtemps incapables de rappeler ou reconnaître les stimuli.

LE MÉDICAMENT, UN OUTIL D'INVESTIGATION DES FONCTIONS COGNITIVES

Les médicaments modifient de façon spécifique certaines fonctions cognitives comme la mémoire. Ils peuvent donc être utilisés pour mettre en évidence les processus neurobiologiques impliqués.

Jean-Marie Danion,
François Sellal

Les pathologies perturbent certaines fonctions cognitives et en épargnent d'autres. Les médicaments font de même. De ce constat découle l'utilisation du médicament comme un outil d'investigation de la cognition normale et pathologique. Cette approche, qui s'apparente à celle de la neuropsychologie cognitive, a des atouts spécifiques : la modification induite est expérimentale, réversible, et peut être rattachée à un mécanisme neurochimique.

Benzodiazépines et mémoire

Les études chez l'homme de l'effet amnésiant des benzodiazépines illustrent cette approche. Ces médicaments sont largement prescrits en pratique médicale courante pour leur activité anxiolytique et hypnotique. Prise à trop forte dose, toute benzodiazépine risque de provoquer une amnésie antérograde : le patient oublie au fur et à mesure les événements qui surviennent après la prise du médicament ; par contre, ceux survenus avant ne sont pas touchés, et l'amnésie est compatible avec la poursuite des activités habituelles. L'administration expérimentale de benzodiazépines à des volontaires sains confirme la sélectivité de l'effet amnésiant ; cet effet est lié à l'action de ces médicaments sur un neuromédiateur particulier, le GABA, car la prise concomitante d'un antagoniste des récepteurs des benzodiazépines prévient l'amnésie.

Tests explicites, tests implicites

Jusqu'il y a peu, l'effet amnésiant des benzodiazépines était étudié à l'aide des tests traditionnels de rappel et de reconnaissance. Ces tests sont explicites, car leurs consignes font explicitement référence au contexte d'apprentissage. La mémoire peut être également évaluée à l'aide de tests implicites, tels que le complément d'images ou de mots (voir encadré), qui partagent la caractéristique de ne nécessiter aucune remémoration

consciente de l'apprentissage. Ainsi, objective-t-on un phénomène mnésique particulier survenant à l'insu des sujets, l'amorçage de répétition : il s'agit de la facilitation qu'exerce l'exposition à un stimulus (l'image ou le mot) sur son traitement ultérieur, perceptif (complètement d'image) ou lexical (complètement de mot). Ce phénomène, qui dure de quelques heures à quelques jours, est préservé dans l'amnésie organique, ce qui justifie de le distinguer de la mémoire explicite ; en revanche, il est altéré chez certains patients atteints de la maladie d'Alzheimer. L'utilisation des seuls tests explicites pour caractériser l'effet amnésiant des benzodiazépines avait conduit à postuler que ces médicaments induisent le même profil de dysfonctionnement mnésique. Les tests implicites remettent en question ce postulat : le diazépam et l'oxazépam ne modifient pas l'amorçage de répétition, alors que le lorazépam l'altère.

Preuves de l'existence de différentes formes de mémoire

L'application des conceptions actuelles de la mémoire à l'étude des benzodiazépines apporte donc des arguments

DRUGS AS TOOLS FOR THE STUDY OF COGNITION - Drugs have specific effects on cognitive functions and are therefore valuable tools for the study of normal and pathological cognition. This is illustrated by studies on the amnesic effect of benzodiazepines on man through implicit memory tests which may have theoretical and therapeutic implications.

originaux en faveur de l'existence de plusieurs systèmes de mémoire. Elle montre que des médicaments appartenant à une classe pharmacologique considérée comme très homogène diffèrent par leurs effets mnésiques. Ceci conduit actuellement à rechercher en quoi ces médicaments sont pharmacologiquement différents. Il est par exemple possible que le lorazépam se fixe sur un sous-type particulier des récepteurs des benzodiazépines, ou sur des récepteurs autres. Les implications peuvent être réelles sur le plan thérapeutique, ainsi que sur le plan théorique, car la mise en évidence d'une particularité pharmacologique du lorazépam pourrait offrir une piste pour rattacher l'amorçage à certains des processus neurobiologiques qui le sous-tendent.

Jean-Marie Danion, professeur des universités, Département de psychiatrie d'adultes, Hôpitaux universitaires de Strasbourg.

François Sellal, chef de clinique des universités, Service de neurologie I, Hôpitaux universitaires de Strasbourg, 1, place de l'Hôpital, BP 426, 67091 Strasbourg Cedex.

Le test de complément d'images consiste à présenter au sujet des dessins d'objets courants et à lui demander de les dénommer. Après un délai de quelques minutes à quelques jours, les images lui sont à nouveau présentées, mélangées à d'autres, et fragmentées. Chaque image est disponible selon huit niveaux de fragmentation, le niveau le plus fragmenté (niveau 1) étant montré le premier. Si le sujet ne peut identifier l'objet, le niveau suivant lui est montré, et ainsi de suite jusqu'à l'identification de l'image. L'amorçage de répétition correspond à la facilitation qu'exerce la présentation préalable de l'image sur son niveau d'identification.

Dans le test de complément de mots, une liste de mots est présentée comportant par exemple (DEFENSE) puis, après un délai, le début de ces mots (DEF), mélangé à celui d'autres mots. Le sujet doit compléter chaque début de mot par le premier mot qui lui vient à l'esprit. L'amorçage correspond au complément préférentiel d'un début de mot par un mot perçus préalablement (DEF par DEFENSE plutôt que par DÉPALE, DÉFINI, etc.).

MODÈLES DE PLASTICITÉ SYNAPTIQUE DANS LE SYSTÈME VISUEL

L'étude des analogues cellulaires de l'apprentissage a pour but de comprendre les règles de formation d'une mémoire biologique liées à l'activité nerveuse.

Yves Frégnac

Une question, encore largement non résolue en neurobiologie du développement et de l'apprentissage, est de déterminer dans quelle mesure l'activité nerveuse (potentiels membranaires locaux, potentiels d'action propagés d'origine spontanée ou évoquée) participe à la régulation du pouvoir intégrateur des neurones centraux. Les neurones sont-ils préprogrammés pour effectuer le même type de traitement entrée/sortie au cours de la vie postnatale de l'organisme, ou bien sont-ils susceptibles d'adapter leur pouvoir de transmission en fonction de leur activité passée ? La connaissance des capacités d'apprentissage des neurones centraux n'est qu'une étape obligée dans la solution d'un problème central, au cœur des sciences cognitives : de simples changements de gains au niveau des liens fonctionnels unissant les différents éléments cellulaires composant le système nerveux central suffisent-ils à expliquer l'apprentissage d'un nouveau comportement, et pourquoi pas la naissance des idées ou de l'émergence du langage ?

Une analyse biophysique des traces mnésiques

Plusieurs équipes CNRS ont centré leur recherche sur la plasticité synaptique observée dans différentes conditions d'activité imposée dans diverses structures neuronales, comme l'hippocampe, le cortex visuel, le cortex frontal et le cervelet. Une approche dominante, centrée sur l'étude des effets à long terme induits par une activation répétée à haute fréquence des voies afférentes (tétanis) sur la transmission synaptique (potentialisation et dépression à long terme), a abouti à une analyse biophysique des mécanismes sub-cellulaires pouvant participer à la formation de "traces" mnésiques. Si les conditions d'induction et d'expression de tels changements commencent à être comprises au niveau de la synapse, la démonstration de leurs implications lors d'un apprentissage comportemental reste cependant indirecte.

Une approche complémentaire, moins réductionniste et plus phénoménologique, est inspirée du domaine de la physique théorique (mémoires holographiques, modèle d'Iaing en ferromagnétisme) : elle part de la définition a priori d'un nombre

limité de règles hypothétiques de plasticité synaptique, susceptibles d'expliquer la formation de mémoires associatives. L'utilisation de réseaux de neurones formels et des travaux de simulation numérique permettent de tester si de telles règles sont suffisantes pour rendre compte des processus d'autoorganisation observés dans les réseaux biologiques. Il est ainsi possible de proposer des conditions de fonctionnement imposé au niveau d'une synapse ou d'un réseau, où des prédictions théoriques pourront être directement confrontées à des observations électrophysiologiques. Cette démarche double, alliant théorie et expérimentation, a été appliquée afin de rendre compte de la plasticité fonctionnelle observée au cours d'une période critique du développement postnatal au niveau du cortex visuel des mammifères. On sait en effet que la mise en place des propriétés fonctionnelles des cellules du cortex visuel résulte de deux processus complémentaires : le premier, précoce, correspond à la réalisation d'une "enveloppe génétique" ; le deuxième se prolonge pendant la vie postnatale et dépend de la propagation de l'activité nerveuse dans les voies visuelles. Des protocoles de contrôle sélectif de l'environnement visuel accessible au cours du développement provoquent des réorganisations fonctionnelles importantes au niveau cortical.

Un exemple d'apprentissage supervisé au niveau cellulaire

L'approche électrophysiologique mise au point dans notre laboratoire met en évidence un rôle de la corrélation temporelle entre activités pré- et post-synaptiques dans l'induction d'une telle plasticité fonctionnelle. Elle consiste en une procédure d'apprentissage "supervisé", où l'expérimentateur aide artificiellement le neurone à répondre à certains stimuli et bloque sa réponse pour des stimuli réputés "différents" :

1) l'activité présynaptique est pilotée par la présentation successive de stimuli visuels dans la zone réceptrice de la rétine influençant l'activité du neurone cortical (appelée "champ récepteur"). Ces stimuli (typiquement une barre lumineuse contrastée) peuvent être différenciés par leur orientation, leur position dans le champ visuel, ou l'œil par lequel ils sont présentés ;

2) le niveau de décharge post-synaptique est contrôlé en fonction des stimuli présen-

SYNAPTIC AND FUNCTIONAL PLASTICITY IN VISUAL SYSTEM - Electrophysiological studies in vertebrate visual cortex have shown similar adaptive properties at cellular level in the developing and adult animal. These results suggest a possible link between functional plasticity observed during epigenesis and cellular plasticity involved during behavioral learning.

tés dans le champ récepteur, en modifiant rapidement l'environnement ionique extracellulaire (par iontophorèse) ou par l'application intracellulaire de courants dépolarisants ou hyperpolarisants.

Pendant la procédure de conditionnement, deux stimuli visuels différents sont présentés en alternance : un stimulus est associé à un niveau "haut" de réponse visuelle de la cellule, alors que l'autre est associé à un niveau "bas" de décharge. Quelques dizaines d'associations suffisent à modifier dans 30 % des cas les propriétés fonctionnelles des cellules conditionnées (changement d'orientation préférée, de dominance oculaire, ou de l'organisation spatiale du champ récepteur). Ces changements qui persistent pendant plusieurs dizaines de minutes ou plusieurs heures favorisent la réponse pour la caractéristique visuelle préalablement associée à un renforcement du niveau de décharge. Des travaux récents in vitro suggèrent par ailleurs l'existence de seuils du potentiel post-synaptique différents pour l'induction d'une potentialisation ou d'une dépression de la transmission synaptique.

Perspectives

Il paraît important de poursuivre dans le domaine des sciences cognitives une double approche des mécanismes cellulaires de l'apprentissage, en déterminant l'uniformité (ou la spécificité) des formes de plasticité démontrées au niveau de différents types de connexions synaptiques morphologiquement et fonctionnellement identifiées, ainsi qu'en comparant cette plasticité synaptique "forcée" aux capacités d'adaptation fonctionnelle exprimées au sein d'une assemblée neuronale intacte dans une situation naturelle. L'espoir à terme est de différencier la plasticité intrinsèque de l'efficacité de transmission d'une synapse (plasticité synaptique biophysique "réelle"), des modifications dynamiques du couplage fonctionnel entre neurones liées à l'architecture (cachée) du réseau (plasticité synaptique "apparente").

Yves Frégnac, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de physiologie nerveuse (UPR 2212 CNRS), Institut Alfred Fessard, avenue de la Terrasse, 91198 Gif-sur-Yvette Cedex.

LES SUPPORTS NEUROBIOLOGIQUES DE LA MÉMOIRE

La mémorisation correspond à la spécification de vastes réseaux de neurones au sein du cerveau, grâce au phénomène de potentialisation à long terme.

■ Bernard Soumireu-Mourat,
François Roman

L hypothèse actuellement la plus souvent avancée pour expliquer le support neurobiologique de la mémoire est la spécification de réseaux de neurones, vastes ensembles de neurones connectés entre eux, pour l'essentiel localisés dans les territoires corticaux, et correspondant à l'ensemble des traits élémentaires qui constituent un souvenir donné. Pour expliquer la modification des connexions entre neurones au sein d'un réseau, c'est-à-dire la facilitation de communication au niveau de certaines synapses, on a fait appel à des modifications durables de l'efficacité synaptique, sous-tendues par un phénomène appelé potentialisation à long terme (ou PLT). Celle-ci est une augmentation de la force de la transmission synaptique pouvant durer des heures, voire des semaines.

Des travaux récents ont ainsi étudié d'une part le lien entre la PLT et la mémorisation, et d'autre part les mécanismes du développement de la PLT, contrepartie décelable de la mise en place de réseaux spécifiques de neurones, dont l'organisation peut être très complexe, de type combinatoire ou matriciel, à la fois localisés (en relation avec des informations élémentaires spécifiques) et distri-

buis (dans le cas de souvenirs complexes, associations entre informations variées).

Le modèle de la discrimination olfactive chez les rongeurs

Un modèle intéressant pour une telle approche est celui, chez les rongeurs, de l'apprentissage d'une discrimination olfactive. D'une part, il fait appel à une modalité sensorielle primordiale chez ces espèces; d'autre part, il implique des voies anatomiques nerveuses relativement simples et très bien connues. En outre, il permet d'utiliser de nombreuses odeurs, associées ou non à un renforcement, présentées à l'animal d'une séance à l'autre, et de développer ainsi des modèles expérimentaux proches des épreuves cognitives utilisées chez l'homme et sensibles aux perturbations en pathologie. Brevement, lors de l'apprentissage d'une discrimination olfactive chez le rat, on voit se développer une potentialisation à long terme dans le cortex olfactif primaire (appelé cortex piriforme), dont l'importance est corrélée au niveau d'apprentissage.

Depuis plusieurs décennies, de nombreux travaux expérimentaux, comme l'étude de la pathologie humaine, ont mis en avant le rôle d'une structure cérébrale ancienne appartenant au système limbique : l'hippocampe. Des interventions

NEUROBIOLOGICAL BASES FOR MEMORY
It is now accepted that learning and memory involve changes in synaptic efficacy resulting in the specification of large neuronal networks, due to a phenomenon called long-term potentiation. Olfactory discrimination in rodents has led to the correlation of learning with potentiation in the olfactory cortex. Potentiation could arise due to the implication of the hippocampus, a brain structure responsible for initial information processing.

très variées sur cette structure modifient la mémorisation, et son atteinte en pathologie humaine est à l'origine d'amnésies. Or, il se trouve que le cortex olfactif primaire – ou cortex piriforme – se prolonge par le cortex entorhinal qui projette directement sur l'hippocampe par une voie qui constitue l'une des deux entrées de cette structure. Par des voies relativement simples, l'hippocampe à son tour projette sur le cortex olfactif. En outre, l'hippocampe est une structure où la PLT, qui y a été décrite en premier, est particulièrement facile à induire. On a pu ainsi envisager que l'hippocampe, fonctionnant comme un analyseur d'informations, détecterait les informations nouvelles et significatives, et induirait alors, par l'intermédiaire de la PLT, un marquage du réseau correspondant au souvenir considéré. Il a été montré que le blocage du retour hippocampique sur le cortex olfactif à la fois empêche la mise en place d'une PLT au niveau du cortex olfactif, et entraîne un déficit sévère d'apprentissage.

Ainsi, on peut concevoir la mémorisation d'informations comme le marquage durable d'un réseau spécifié de neurones, grâce à un phénomène de plasticité synaptique se traduisant de façon très spécifique à certaines synapses par une augmentation de leur efficacité de communication de transmission. Ce marquage serait sous la dépendance de l'hippocampe dont la fonction serait le traitement initial de l'information (à la fois sélection et analyse des informations en fonction de leur intérêt et de leur nouveauté, par rapport aux informations déjà mises en mémoire par le sujet).

■ Bernard Soumireu-Mourat, professeur à l'Université de Provence, directeur du Laboratoire de neurobiologie des comportements (URA 372 CNRS).

■ François Roman, maître de conférences à l'Université de Provence, Laboratoire de neurobiologie des comportements (URA 372 CNRS), traverse Charles Sautin, 13388 Marseille Cedex 13.



Les travaux récents portant sur les relations entre mémorisation et potentialisation à long terme ont été effectués sur le modèle de la discrimination olfactive chez les rongeurs. (© Giehl M. & J., J. Koch / Focus / Contrast).

CERVEAU ET ACTIVATION DES REPRÉSENTATIONS MNÉSIQUES

Le recueil simultané de données neurobiologiques et comportementales permet d'étudier les mécanismes des représentations mnésiques.

Vincent Bloch

Quand un objet est perçu, les différents éléments qui le constituent activent des ensembles spécifiques de neurones qui entraînent eux-mêmes l'activation d'éléments associés au cours de l'expérience passée. De telle sorte que chaque objet présent – ou évoqué – entraîne une configuration particulière d'activité au sein des réseaux nerveux. Le rappel de l'information mémorisée repose sur la probabilité accrue qu'un seul attribut de cet objet ou qu'un simple élément de son contexte entraîne la réactivation de la configuration d'activité initiale caractéristique. Le support de la représentation repose donc sur des modifications acquises des connexions du réseau nerveux selon des distributions topologiquement définies aboutissant à la formation de ce que Hebb appelait des assemblées cellulaires. Il a été montré, par exemple, que des neurones du relais thalamique de la voie auditive qui répondent préférentiellement à un son de fréquence particulière, modifient cette réponse après apprentissage au bénéfice de la fréquence tonale du stimulus conditionnel, alors que les réponses évoquées par les fréquences adjacentes au stimulus conditionnel diminuent parallèlement. Il ne s'agit donc pas d'une simple augmentation de réactivité du neurone enregistré, mais d'une évolution différentielle des connexions synaptiques qui convergent sur lui, d'un remaniement du réseau auquel ce neurone appartient.

L'apprentissage modifie l'efficacité de la transmission

Par ailleurs, nous avons constaté que, pendant l'apprentissage, les neurones de l'hippocampe augmentent leurs décharges en réponse aux éléments signifiants de la tâche. Ces réponses cellulaires associatives constituent un bon indice de l'état actif d'une représentation centrale de l'association acquise, car elles sont indépendantes du comportement exprimé par l'animal, et présentes même quand le stimulus est redondant au regard du comportement à effectuer. Or, il a pu être montré

que la construction de ces réponses cellulaires nécessite pendant l'apprentissage une modification de l'efficacité de la transmission, connue sous le nom de potentialisation à long terme, au niveau des synapses par lesquelles ces cellules reçoivent l'information sensorielle. C'est ce qui a pu être démontré en bloquant pharmacologiquement une catégorie de récepteurs membranaires du neurotransmetteur : ce blocage empêche la potentialisation de la synapse, mais préserve la transmission synaptique normale. Dans un apprentissage comportemental également, la variation provoquée du débit synaptique entraîne des variations dans le niveau des performances d'apprentissage. Enfin, le taux de déclin des modifications synaptiques induites lors de l'apprentissage est également fortement corrélié au taux d'oubli spontané lors de tests de rétention effectués jusqu'à trente jours après l'apprentissage initial. Par ailleurs, l'augmentation de l'efficacité synaptique corrélatrice avec les progrès simultanés de l'apprentissage a pu être observée par des mesures directes, soit électrophysiologiques, l'amplitude du potentiel post-synaptique, soit biochimiques, le taux de libération pré-synaptique du transmetteur. Ainsi, sur l'animal libre dans des situations réelles d'apprentissage, les variations de poids synaptique apparaissent clairement liées à la mémorisation et à l'oubli.

Expliquer la madeleine de Proust

L'examen simultané de plusieurs groupes de synapses appartenant à plusieurs structures cérébrales impliquées dans l'apprentissage en cours devrait à l'avenir fournir des indications sur la structure des représentations. Mais quel que soit le contenu principal des représentations mémorisées, celles-ci sont toujours composites, multi-dimensionnelles et par là-même multilocalisées. Des recherches sont consacrées à l'étude de l'efficacité des indices de rappel, c'est-à-dire des éléments même très partiels de la situation initiale susceptibles – telle la madeleine de Proust – de réactiver chez l'animal un souvenir apparemment oublié. Il a été montré

BRAIN AND ACTIVATION OF MEMORY REPRESENTATIONS - Perception triggers specific spatio-temporal patterned neural activity which corresponds to representation. Recall of representation is based on the probability of reoccurrence of a dynamic event organized in a similar pattern to the initial one.

que des indices tels que le décor des murs du labyrinthe, les objets extérieurs, etc. ne sont pas tous également efficaces, ce qui permet d'inférer, à partir de ceux qui le sont, le contenu de la représentation que le sujet a élaborée initialement. Plus frappant encore, l'efficacité des indices n'est pas la même en fonction des différents délais qui séparent l'acquisition de l'épreuve de rétention, ce qui montre que le contenu des représentations varie et que chacun de leurs constituants peut avoir une dynamique propre, ce qui devrait confirmer les données tirées des techniques de l'imagerie cérébrale.

Le sommeil paradoxal et l'acquisition

Il est probable que ces représentations sont périodiquement réactivées spontanément. Il semble qu'elles le soient systématiquement dans les périodes de sommeil paradoxal (SP) qui suivent les séances d'acquisition. En effet, on a observé que pendant ces périodes où les propriétés fonctionnelles du cerveau sont très semblables à celles de la veille, les souvenirs sont accessibles à diverses interventions expérimentales. En particulier, l'administration, pendant le SP, d'indices de rappel (signifiants mais non éveillants) a un effet facilitateur important sur la mémorisation. En outre, pendant ces phases de SP seulement, ces stimuli signifiants provoquent des réponses cellulaires identiques à celles de la veille. Ces faits conduisent à penser qu'au cours du sommeil paradoxal consécutif à l'acquisition, les motifs d'activité qui constituent, au sein des réseaux, le support des représentations sont rejoués, consolidés et éventuellement restructurés.

Vincent Bloch, professeur à l'Université Paris-Sud, directeur du Laboratoire de neurobiologie de l'apprentissage et de la mémoire (URA 1491 CNRS), Université de Paris-Sud. Bât. 446, 91405 Orsay Cedex.

DE L'ESPACE PERÇU À L'ESPACE REPRÉSENTÉ

Les modes de représentation de l'espace chez l'animal apportent de précieuses indications sur l'existence de différents niveaux de traitement cognitif.

■ Catherine Thinus-Blanc,
Bruno Poucet

L'espace est le théâtre omniprésent de notre vie quotidienne. Chacun de nos gestes, de nos déplacements s'y inscrit inéluctablement. Il importe de bien le connaître pour s'y déplacer de façon optimale quand le lieu à atteindre est situé hors de notre champ perceptif. Ceci est vrai pour l'homme comme pour l'animal. Le modèle animal permet d'aborder les mécanismes cognitifs impliqués dans la représentation de l'espace "à l'état pur", c'est-à-dire sans faire intervenir le langage et le symbolisme, si largement utilisés par le sujet humain.

L'étape initiale est celle de la constitution des représentations. Elle passe par l'extraction d'invariants spatiaux à partir de la variabilité des percepts. Les activités sensorimotrices, les multiples déplacements ont pour effet de multiplier les perspectives sous lesquelles peuvent être perçus les divers éléments qui structurent l'espace. Ce sont ces activités locomotrices, sensorimotrices, exploratoires qui conduisent au codage des lieux ainsi qu'à leur mise en relation spatiale, indépendamment de la perspective sous laquelle ils sont perçus, et indépendamment de la position du sujet à un moment donné. Les paramètres spatiaux qui sont spontanément intégrés par l'animal comme par le sujet humain sont les relations topologiques et géométriques au détriment des relations métriques absolues. L'expérience visuelle joue un rôle prédominant dans cette intégration, particulièrement l'expérience visuelle précoce. En effet, les non-voyants de naissance ont des déficits importants au niveau du traitement spatial d'informations non visuelles par rapport aux sujets ayant perdu la vue plus tardivement.

La plasticité des cartes spatiales

Une représentation est réellement spatiale si elle

est affranchie des contraintes temporelles qui prévalent au niveau de l'action. Cette caractéristique correspond à des propriétés qu'il est possible de tester en soumettant les sujets à des tâches où, par exemple, l'atteinte d'un but se fait à partir de points de départ différents. A ce niveau, la diversité des stratégies mises en œuvre par les sujets est considérable, ce qui suggère qu'il y aurait une multiplicité de niveaux d'organisation des informations spatiales.

Une autre façon de tester la plasticité des représentations spatiales est de soumettre le sujet à des problèmes spatiaux impliquant la ré-organisation des informations acquises antérieurement. En réponse à une situation inhabituelle (par exemple, un trajet plus court permet d'atteindre le but), le sujet doit trouver une solution nouvelle sur la base de ce qu'il connaît. Les comportements d'innovation observés traduisent le caractère plastique des représentations spatiales qui se prêtent à de multiples remaniements. Ces mécanismes sont très proches de ceux développés par la psychologie Gestaltiste au niveau perceptif.

Les supports neuronaux des cartes

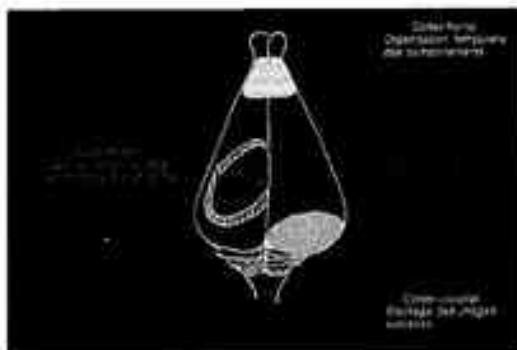
L'analyse des structures nerveuses qui sont impliquées dans les diverses phases du processus représente une autre façon d'analyser les représentations spatiales. L'hippocampe et d'autres régions du système nerveux (le cortex visuel, pariétal et préfrontal, notamment) sont impliqués

FROM SPACE PERCEPTION TO SPACE REPRESENTATION - Cognitive mechanisms involved in the multi-layer processing of spatial information are studied using both behavioral and brain approaches. Special emphasis is placed on spatial invariants extraction and on functional properties of spatial representations, connected with various brain structure functions.

dans les différentes étapes de traitement des informations spatiales. Chez l'animal, des lésions ou des inactivations de ces structures affectent aussi bien les activités qui participent à l'élaboration des représentations spatiales qu'à leur utilisation. A l'aide de multiples paradigmes expérimentaux nous recherchons actuellement quelle est la spécificité fonctionnelle de chacune de ces structures. Leur complémentarité telle qu'elle commence à apparaître de ces études est représentée sur la figure ci-contre.

La modélisation de la mémoire spatiale

La modélisation concerne le format sous lequel sont conservées les représentations spatiales, au niveau des processus psychologiques et neuronaux impliqués. Nous proposons un modèle de mémoire spatiale "distribuée" selon lequel des éléments de base des représentations seraient conservés séparément et organisés à différents niveaux pour constituer à la demande des représentations spatiales adaptées aux besoins spécifiques du moment. Les hypothèses et prédictions issues de ce modèle sont actuellement testées au moyen d'une approche pluridisciplinaire qui conjugue les méthodes de lésions et d'inactivations réversibles (induites par l'injection intra-cérébrale d'agents pharmacologiques bloquant temporairement l'activité nerveuse dans la structure-cible), la modélisation, les enregistrements électrophysiologiques et l'analyse comportementale chez l'animal, ainsi qu'une approche clinique du sujet humain.



Cerveau de rat montrant les différentes structures dont le rôle est complémentaire dans le traitement, la mémorisation des informations spatiales et la production des comportements orientés de cortex de l'hémisphère gauche a été retiré pour visualiser l'hippocampe.

■ Catherine Thinus-Blanc, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de neurosciences cognitives (UPR 9012 CNRS).

■ Bruno Poucet, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de neurosciences cognitives (UPR 9012 CNRS), 51, chemin Joseph Aiguier, 13402 Marseille Cedex 9.

IMAGE ET DESCRIPTION

L'homme est plongé dans un univers perceptif et il construit de celui-ci des représentations qui lui servent à préparer ses conduites. Mais comment le langage permet-il d'exprimer ces représentations ?

■ Michel Denis

Il n'est pas spécifique de l'espèce humaine est que ses membres, non seulement créent des représentations internes, mais développent également des conduites en vue de faire partager ces représentations par leurs congénères. Parmi la variété de systèmes disponibles à cette fin, le discours constitue un moyen largement utilisé d'extériorisation des représentations cognitives individuelles. Il est l'instrument privilégié par lequel nous donnons à autrui la possibilité de construire et de manipuler cognitivement des situations ou des objets absents de sa perception, mais qu'il peut intégrer à sa base de connaissances en dépit du fait que la prise de connaissance s'est faite de manière indirecte.

Choisir les chemins de la description

Le discours, par la linéarité de sa production, est un système de communication particulièrement approprié à la description d'entités contraintes par une organisation temporelle forte (séquence d'événements, itinéraires, procédures). Dans ce cas, la linéarité inhérente à l'activité discursive s'ajuste parfaitement à la séquentialité intrinsèque de l'objet à décrire. Cependant, il existe aussi des situations où le locuteur est amené à décrire des objets ou des représentations dépourvus de toute structure temporelle, même implicite. C'est le cas de nombre

d'objets ou d'entités spatiales de structure multidimensionnelle (territoires, scènes visuelles, objets tridimensionnels, plans, etc.). Il est alors à la charge du locuteur d'opter pour la séquentialisation qui, tout à la fois, sera la mieux ajustée à ses propres capacités descriptives et la mieux adaptée aux capacités de traitement de son interlocuteur.

Les stratégies descriptives

Il existe des cas où des impératifs externes viennent réduire le nombre de ces degrés de liberté. Tel est le cas lorsque le discours, appliqué à un objet multidimensionnel, doit tenir compte de certaines contraintes, comme par exemple les contraintes relatives au point d'initialisation de la description. Supposons que vous deviez décrire le plan urbain ci-dessous à une personne qui n'a pas ce plan sous les yeux et qui doit, à partir de votre description, reconstituer mentalement ou graphiquement la disposition exacte des différents sites. Supposons que vous ayez pour seule contrainte de commencer votre description en partant de la gare routière. Compte tenu que deux branches partent de ce site, le locuteur doit d'abord décider laquelle des deux branches il va décrire avant l'autre. On sait, depuis les travaux de Levelt, que la stratégie la plus appropriée consiste ici à décrire d'abord les éléments situés sur la branche linéaire, puis à décrire ensuite les éléments de la branche la plus complexe. C'est la seule stratégie qui, compte tenu de la contrainte relative au point de départ imposé, rend possible pour le locuteur (mais aussi pour l'auditeur) de ne jamais devoir maintenir en mémoire de travail plus d'un point de retour pendant la description. L'expérimentation atteste que ce choix descriptif a une probabilité d'occurrence plus élevée que l'autre choix. Ainsi peut-on dégager des stratégies lin-

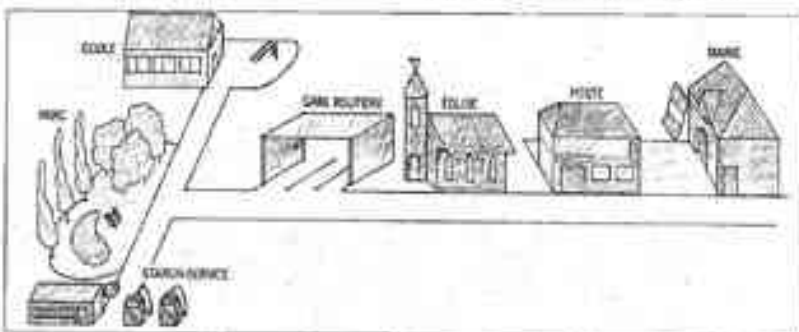
guistiques de minimisation de la charge cognitive attachée au maintien transitoire des informations en mémoire de travail. Ces stratégies, dans le même temps, s'avèrent être celles qui garantissent la meilleure convivialité cognitive pour l'interlocuteur.

Le point remarquable, ici, est que les régularités qui caractérisent le discours du locuteur mis en présence de l'objet à décrire sont retrouvées lorsque le locuteur décrit le même objet de mémoire. Ainsi, des expériences comparent la structure de discours appliqués soit à des objets perceptivement présents, soit à des représentations mémorisées. Ces expériences s'inscrivent dans le contexte plus général des travaux qui visent à mettre en évidence la similarité des processus perceptifs et des processus d'imagerie. Les résultats obtenus fournissent des arguments à l'hypothèse d'une similarité des processus mis en œuvre dans le traitement des événements perceptifs et des représentations mentales dérivées de la perception.

Description et génération automatique

Au total, la mise en œuvre de stratégies descriptives s'avère bien gouvernée par des facteurs cognitifs. L'occurrence de stratégies spécifiques peut être prédite à partir de la charge cognitive attachée au traitement des différentes parties de l'objet à décrire. A cet égard, la spécification des opérations discursives impliquées dans la description d'objets complexes est une tâche tout à fait pertinente pour les chercheurs en science cognitive qui visent à faire exécuter ces opérations par des systèmes de génération automatique. Une fois identifiées les procédures descriptives les plus propices à une communication efficace, cette analyse peut être mise au service de l'élaboration de systèmes automatiques de génération de textes. De tels efforts sont en cours, et l'on relèvera que les principes discursifs identifiés à partir de l'analyse des stratégies descriptives naturelles tendent de plus en plus à être pris en compte dans la conception des systèmes. Il s'agit d'un enjeu particulièrement important dans la mesure où l'objectif est de créer des systèmes artificiels adaptés aux caractéristiques cognitives de leurs utilisateurs et avec lesquels ces derniers soient en mesure d'interagir de manière efficace dans des procédures d'échange de représentations.

IMAGE AND DESCRIPTION - People create internal representations of their perceptual-spatial environment. Discourse is a privileged instrument for the externalization of these representations. What are the best strategies for describing them?



■ Michel Denis, directeur de recherche au CNRS, responsable de l'équipe Cognition humaine au Laboratoire d'Informatique pour la mécanique et les sciences pour l'ingénieur (I/PR 3251 CNRS), Université de Paris-Sud, Bât. 508, BP 133, 91403 Orsay Cedex.

LES REPRÉSENTATIONS COGNITIVES DANS L'ANALYSE DES LANGUES

Les langues engendrent des représentations symboliques décrites par des métalangages formels et des représentations cognitives qui entrent en interaction avec la perception et la planification.

Jean-Pierre Desclés

Chaque langue naturelle est un système représentationnel qui est à la fois compatible avec les phénomènes identifiés et organisés par les processus de perception, détachable du monde phénoménologique, autonome par rapport à l'environnement des utilisateurs (énonciateurs). En tant que système symbolique hautement structuré, une langue agence des signes au moyen de règles syntaxiques en vue de présenter des situations complexes (des états, des processus, des événements) et de désigner des entités stabilisées (objets individualisables, lieux, entités collectives...) localisés dans le monde externe. La détachabilité n'est pas réalisée dans les systèmes de signaux de communication entre animaux, puisque chaque signal est conditionné par un déclencheur tandis que la production d'un discours dans une langue n'est aucunement déclenchée par des stimuli. Quant à l'autonomie, elle ouvre la possibilité de créer des fictions exprimées par des représentations discursives sans corrélats dans le monde de l'utilisateur du langage.

Invariants du langage et variation au travers des langues

Si certains linguistes étudient les particularités irréductibles de chaque langue (approche contrastive), d'autre mettent en évidence les éléments qui sont nécessaires à l'engendrement des représentations symboliques assumées par les langues. Il faut donc isoler le niveau du "génotype" constitué par les invariants langagiers qui transcendent les variations spécifiques (morphologiques, syntaxiques, lexicales) des niveaux phénotypiques des diverses langues. Par exemple, les langues se différencient par l'ordre des mots ("Sujet Verbe Objet" en français, mais "Verbe Objet Sujet" dans d'autres langues ou ordre "libre" dans une langue comme le latin), par la présence ou l'absence de tel trait grammatical (comme : cas, articles, temps morphologiques, opposition entre les voix active et passive)... La description du génotype se ramène à un métalangage logico-sémiotique "idéel" (car dépouillé de tous les traits topologiques accidentels) dans lequel tous les agence-

ments linguistiques sont représentables. Les formules du "génotype" inscrivent dans des écritures formelles (éventuellement implantables sur des systèmes neurobiologiques naturels ou sur des systèmes artificiels comparables à des ordinateurs) les opérations "universelles" (comme : la prédication, la détermination, la quantification, la thématisation...) mises en jeu par les processus de compréhension et de production langagières : ces formules et leurs inter-relations sont donc des représentations métalinguistiques des discours et de leurs paraphrases.

Représentations sémantico-cognitives

La description sémantique d'un prédicat lexical (exprimé en général par un verbe ou par une préposition) conduit à une décomposition de ce dernier en micro-unités ou primitives cognitives, c'est-à-dire en unités abstraites, très souvent relationnelles, qui ne sont plus localisées dans une langue. Ces primitives sont éventuellement décomposables à leur tour en micro-unités plus élémentaires (éventuellement plus symboliques) d'un autre niveau de représentations. Ces primitives sont intégrées ensemble dans des schémas structurés qui représentent les significations des prédicats lexicaux. Chaque prédicat lexical tend alors à apparaître comme la "réunitarisation" intégrative d'un complexe de primitives cognitives définies à un autre niveau de représentations. Les schémas font eux-mêmes partie de réseaux sémantiques qui ont pour éléments génériques des schémas plus abstraits qui jouent le rôle d'archétypes cognitifs. Ces derniers sont à la source des diverses catégorisations sémantiques comme : repérage et localisation statiques d'un objet dans un espace, divers types de mouvements spatio-temporels, changements des qualités affectant un même objet, construction ou destruction dynamiques d'objets, transferts d'objets entre les participants d'une transaction, représentation d'actions plus ou moins contrôlées et intentionnelles... Des analyses théoriques émergent des primitives relationnelles de "mouvement" et de "changement", de "contrôle d'une action", de "visée téléonomique d'un but", de "capacité représentationnelle

COGNITIVE REPRESENTATIONS IN THE ANALYSIS OF LANGUAGES - Languages generate both symbolic representations described by formal metalanguages as well as cognitive representations which interact with perception and planning.

d'une action qui implique l'énonciateur lui-même"... Ces primitives sont étroitement corrélées aux domaines catégorisés par la perception visuelle et par les planifications d'actions enchaînées ; c'est par là que la linguistique rejoint directement les sciences cognitives.

Niveaux de représentations et interaction

Chaque système de représentations impliquées par l'analyse du langage est défini à un certain niveau de représentations ; il entretient des relations intégratives ("réunitarisations"), et décompositionalles avec des entités composantes et déterminées à un autre niveau. A un même niveau, chaque représentation cognitive construite à partir d'une production linguistique est susceptible de subir des opérations qui transforment cette représentation symbolique en une représentation analogique et iconique comparable aux représentations figurales (images) élaborées par la perception visuelle de l'espace environnant. La description des significations verbales sous forme de schémas aide alors à comprendre comment peuvent s'effectuer les transferts réciproques entre représentations symboliques et images et permet d'entrevoir une modélisation des interactions entre les facultés de langage, de perception, de planification des actions et de mémorisation.

Le programme de recherche des Grammaires Cognitives vise à décrire explicitement les correspondances entre les agencements formels exprimés par les langues et les différentes représentations cognitives, symboliques ou iconiques, moins accessibles à l'observation directe. Ces correspondances imposent la prise en compte de plusieurs niveaux de représentations intermédiaires insérés dans des architectures cognitives et des processus de changement de représentations.

Jean-Pierre Desclés, professeur à l'Université Paris-Sorbonne, directeur du GDR Sciences cognitives de Paris, Centre d'analyse et de mathématiques sociales (UMR 17 CNRS/EHESP/Paris-Sorbonne) 96, boulevard Raspail, 75006 Paris.

REPRÉSENTATIONS CATÉGORIELLES, PROTOTYPES ET TYPICALITÉ

La question des structures élémentaires de la pensée humaine n'est pas nouvelle; on peut même considérer qu'il s'agit d'un problème pivot et récurrent dans la tradition philosophique occidentale.

■ **Danièle Dubois**

La conception classique suppose que tous les exemplaires d'une même catégorie sont formellement équivalents (par exemple, tous les exemplaires de "pomme" sont également "pommes") et que pour être "pomme", il faut posséder les propriétés nécessaires et suffisantes qui définissent le concept de pomme : les propriétés générales (être un fruit) ainsi que les propriétés spécifiques qui permettent de distinguer les pommes des bananes par exemple ("être rondes", "avoir des pépins", etc.). Cette conception sémantique, fondée sur les notions de référence (au monde "réel") et de vérité, est actuellement remise en cause par les résultats de recherches sur la mémoire sémantique qui ont conduit à introduire trois concepts clés : celui de niveau de base, ceux de typicalité et de prototype.

Quelques données empiriques de psychologie cognitive

On a montré que la formation des concepts chez l'enfant, comme l'usage des mots par diverses cultures, intervient à un niveau particulier de l'organisation hiérarchique classique : l'enfant commence par dénommer cet objet qu'il croque "pomme", et non "fruit", ni "golden". Le concept de niveau de base traduit l'existence d'un niveau privilégié dans l'organisation hiérarchique de référence qu'est la taxonomie. En outre, et de manière peut-être encore plus décisive, il est maintenant fermement établi que les individus s'accordent à considérer certains exemplaires des catégories plus représentatifs que d'autres (la pomme rouge est plus typique des pommes que la Golden ou la Granny Smith, par exemple). Les exemplaires typiques sont appris les premiers, sont plus rapidement actualisés et mis en œuvre dans diverses activités cognitives (compréhension du langage, résolution de problèmes), même dans les tâches les plus abstraites et les plus formelles (arithmétique par exemple). Le

concept de typicalité traduit donc le fait que, en mémoire humaine, les représentations des différents exemplaires d'une catégorie ne sont pas identiques, mais se distribuent selon leur degré de représentativité par rapport à un exemplaire particulièrement typique ou représentatif, le prototype. La typicalité n'est pas adéquatement décrite par des conditions nécessaires et suffisantes d'appartenance mais en termes de distance au prototype, encore désignée par les notions de ressemblance, de similitude ou d'air de famille. En outre de nombreuses recherches (psycho) linguistiques identifient les effets de typicalité dans les mécanismes de production et d'interprétation du langage : ainsi une pomme atypique peut-elle être qualifiée de "drôle de pomme", de "genre de pomme". En contraste, l'illustration de Magritte manifeste l'incongruité (et donc l'invie) à refuser de

REPRESENTATIONS OF CATEGORIES, PROTOTYPES AND TYPICALITY - Cognitive psychology research empirically established that cognitive categories are organized according to prototypes and typicality. Similarity and family resemblance describe cognitive categories more adequately than required and sufficient conditions.

donner le nom de pomme à une représentation figurative conventionnellement typique d'une pomme typique.

A ces recherches descriptives, s'articulent des travaux qui s'attachent à identifier les processus cognitifs de catégorisation responsables d'une telle structuration catégorielle. Ces travaux portent d'une part sur la catégorisation perceptive (principalement auditive et visuelle) qui accordent à la similitude objective "du monde réel" un rôle déterminant en particulier dans la construction de prototype et d'autre part sur le rôle des "théories naïves" le plus souvent, liées à l'interprétation "commune" des mots désignant les concepts.

Un enjeu pour les sciences cognitives

De nombreuses recherches empiriques demeurent nécessaires pour étayer la généralité et la portée du changement de point de vue sur les structures catégorielles des connaissances humaines qu'introduisent les concepts de typicalité et de prototype. Au sein des sciences cognitives, ce domaine de la psychologie et de la linguistique cognitives se trouve en interaction dynamique avec le développement des formalisations mathématiques et de l'intelligence artificielle. L'identification des bases perceptives de la similitude et celle des contraintes des systèmes symboliques (telles les icônes, langues et langages) sur les structures catégorielles imposent à l'évidence des interactions avec les recherches tant en physiologie sensorielle qu'en linguistique, sémiotique et anthropologie.



L'illustration de Magritte manifeste l'incongruité et donc l'invie à refuser de donner le nom de pomme à une représentation figurative conventionnellement typique d'une pomme typique. René Magritte, 1964. Ceci n'est pas une pomme. Collection particulière. Protobèque Magritte/Graudon. © ADAGP Paris 1992.

■ **Danièle Dubois, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire d'ergonomie physiologique et cognitive (SDI 6322 CNRS), 41, rue Gay Lussac, 75005 Paris.**

MODÉLISATION INFORMATIQUE DES PROCESSUS DIDACTIQUES

A la charnière de l'intelligence artificielle et de la didactique, la didactique computationnelle aborde les problèmes de modélisation pour la réalisation d'environnements d'apprentissage informatisés.

■ Nicolas Balacheff,
Jean-Marie Laborde

La recherche en didactique a pour principal objet d'étude les conditions de la construction de connaissances complexes par des sujets humains, apprenants enfants ou adultes, dans des situations délibérément organisées à cette fin (situations d'enseignement ou de formation). L'originalité de ces recherches réside dans la prise en compte, tant au niveau méthodologique que théorique, de la spécificité des connaissances en jeu.

Un processus didactique est une séquence de situations organisant les interactions entre un apprenant et un certain milieu en vue d'un apprentissage déterminé. La conception et la régulation d'un tel processus requièrent la caractérisation des relations entre les comportements observables de l'apprenant et les significations qu'il élabore, ses conceptions. La modélisation cognitive des processus didactiques ne porte donc pas sur le seul sujet apprenant, mais sur le triplet en interaction : apprenant, connaissance, situation.

L'état de l'art actuel en intelligence artificielle permet d'aborder le problème du passage des modèles élaborés par la

didactique expérimentale à leur explicitation sous la forme de modèles symboliques computables. Ce projet fondateur de la *didactique computationnelle* pose des problèmes originaux de représentation des connaissances et de modélisation des interactions. Les travaux dans cette direction sont récents et contribuent d'abord au développement théorique de la didactique, mais on peut en percevoir l'importance pour la constitution de fondements pour le développement des environnements d'apprentissage informatisés.

Modéliser l'apprentissage de la géométrie

La constitution de l'équipe Cognidida (modélisation cognitive et informatique des processus didactiques) dans le cadre du pôle Cognisciences Rhône-Alpes, en réunissant didacticiens et informaticiens, a pour objectif de développer cette problématique dans le cas des mathématiques. Les travaux de modélisation des connaissances de l'apprenant ou de l'interaction didactique, conduits par cette équipe, s'appuient sur la réalisation d'un micromonde de géométrie élémentaire, *Cabri-géométrie*, qui constitue le milieu avec lequel interagit l'apprenant. Ce logiciel de simulation et de traitement

COMPUTATIONAL MODELLING OF DIDACTIC PROCESSES - The current state of the art in artificial intelligence makes it possible to approach the problem of passing from models as they are produced by experimental research in didactic to workable computational models. The teaching and learning of geometry offers a rich source for such modelling problems.

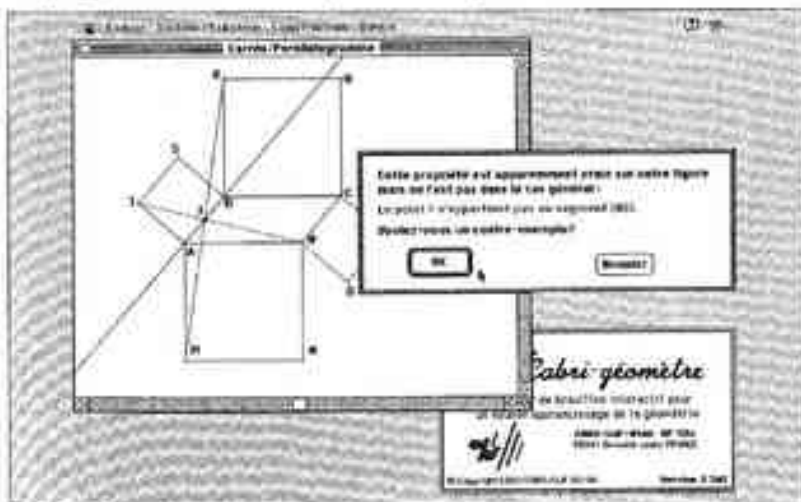
de figures géométriques permet à l'apprenant la "manipulation directe" de ces figures et l'observation expérimentale de ses invariants. Il assure la gestion en temps réel de toutes les relations fonctionnelles entre les composants de la figure spécifiés lors de sa construction.

La modélisation de l'apprenant par le système pose des problèmes difficiles de diagnostic dus à la nécessaire prise en compte des implicites de certaines de ses actions. C'est le cas, par exemple, lorsque pour tracer des droites parallèles, exploitant les possibilités de manipulation directe, l'apprenant recourt à un contrôle perceptif au lieu d'utiliser les primitives de construction de *Cabri-géométrie*. La part de ces implicites pourrait être réduite par des contraintes de communication, mais on hypothéquerait alors le caractère d'ouverture du micromonde, essentiel pour l'apprentissage.

L'interaction avec un environnement informatique repose sur la manipulation de systèmes de représentation symbolique qui ont leurs caractéristiques et leurs grammaires propres. Ces représentations ont souvent des effets sur les connaissances en jeu, elles peuvent, en particulier, provoquer une modification profonde de la complexité d'un problème et des moyens de sa résolution. Les conceptions construites par l'apprenant dans ce contexte sont susceptibles d'être significativement différentes de celles jusque-là identifiées dans des environnements "classiques". Pour cette raison, la didactique computationnelle est inséparable de la didactique expérimentale dont les méthodes rigoureuses peuvent seules garantir la pertinence et la validité de ses modèles.

■ Nicolas Balacheff, directeur de recherche au CNRS, responsable de l'équipe Cognidida, Laboratoire IMAG-LSO2 (URA 393 CNRS).

■ Jean-Marie Laborde, directeur de recherche au CNRS, responsable du projet IMAG "Cabri-géométrie", Laboratoire IMAG-LSO2 (URA 393 CNRS), BP 33X, 38041 Grenoble Cedex.



A la suite de l'observation d'une figure qu'il a tracée, l'apprenant propose une conjecture. *Cabri-géométrie* identifie l'évidence perceptuelle à l'origine de cette proposition et y fait référence dans sa réponse.

CONCEVOIR DES AGENTS RATIONNELS

La conception de systèmes intelligents autonomes, capables de raisonnement, suppose de doter ces derniers de la faculté d'argumenter leurs connaissances.

■ Jean Sallantin

Un agent rationnel est un système intelligent autonome, capable des raisonnements du sens commun que nous exerçons dans notre vie quotidienne, qui font intervenir des intentions, des croyances et des connaissances incomplètes et erronées.

La conception des agents rationnels suppose que, d'une part, les connaissances soient apprennables par une machine, d'autre part qu'elle soit falsifiable et révisable. Comme un agent rationnel interagit avec d'autres agents rationnels et des agents humains, ces opérations de falsification et de révision doivent pouvoir être accomplies tant par les uns que par les autres. Quand l'examineur est humain, il exige de comprendre les explications fournies par l'agent rationnel sur son raisonnement : il nous a donc fallu étudier comment doter ces systèmes de la faculté de produire des connaissances selon des raisonnements argumentables.

Nous étudions des protocoles de communications entre agents aptes à faire progresser les connaissances d'un agent rationnel : vont intervenir un maître, un oracle, une sonde, un client (voir figure).

La progression des connaissances d'un agent rationnel est déterminée par son aptitude à réagir à la critique d'un maître et à l'apport de nouveaux exemples et de nouveaux problèmes. Dans ce protocole, le client propose des problèmes et l'oracle des problèmes résolus. Le maître examine l'explication de la solution proposée par l'apprenti. Cette explication peut lui paraître selon les cas : vraie dans le cas général, vraie dans le contexte du problème posé. Il peut ne pas accepter l'explication sans cependant avoir de critiques à ce qu'elle soit utilisée dans le cas du problème posé. Il peut ne pas avoir de critiques à l'explication sans pouvoir l'accepter comme une preuve. Il peut enfin avoir des critiques et tenter de faire se modifier les explications ou les hypothèses de l'apprenti. Chaque situation est identifiée, elle correspond à une forme différente de raisonnement, on y retrouve les formes de raisonnements empiriques, analogiques. Comme le rôle du maître est, par la critique, de provoquer la révision des connaissances de l'agent

rationnel apprenti, s'il n'a pas de critiques, il doit se mettre en situation de critiquer. Pour cela, il examine les explications que l'apprenti va produire pour prouver ou réfuter la solution d'un problème, il identifie des raisons qui, par leur présence ou absence dans l'argumentation, l'affaiblissent. Puis il demande à la sonde de produire un problème pour contrer l'argumentation précédente, enfin il critique l'explication produite par l'apprenti sur ce nouveau problème. Dans une expérimentation que nous menons pour voir les capacités d'un agent rationnel à apprendre à résoudre des problèmes de construction de figures géométriques, l'oracle donne des exemples de bonnes et de mauvaises constructions de carré, le maître remarque que l'apprenti utilise le nom de l'auteur de la figure pour expliquer qu'une figure est un carré, il demande à la sonde d'envoyer à l'apprenti un exemple de bon carré dont l'auteur est inconnu, il peut alors critiquer l'apprenti s'il refuse d'admettre cet exemple, il conduit l'apprenti à réviser les hypothèses qu'il avait induites sur la nature des carrés.

Le statut philosophique des agents rationnels

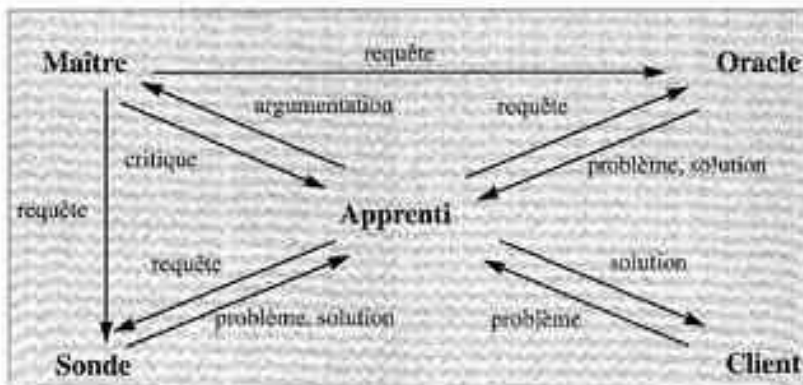
Pour concevoir des agents rationnels, nous expérimentons sur des problèmes de chimie, de biologie moléculaire, de géométrie. Dans l'état de nos travaux, seuls les rôles d'apprenti et d'oracle sont joués par une machine. Aussi avons-nous

DESIGNING RATIONAL AGENTS - A rational agent is an autonomous intelligent system capable of learning from examples and criticisms, and of arguing its knowledge with an human master. We discuss the philosophical foundations of the argumentation.

beaucoup travaillé sur la forme à donner aux explications pour qu'elles puissent fournir une connaissance et sa production par la machine. Comme ce travail porte sur le raisonnement lui-même, la conception des agents rationnels a un statut philosophique à développer en tant que tel.

La philosophie se rebelle contre toute réduction du contenu significatif de ses thèses à un fonctionnement proprement mécanique, sa confrontation à l'intelligence artificielle est fortement conflictuelle. Nous avons choisi d'organiser cet affrontement en posant un agent rationnel comme étant un système philosophique. Nous examinons dans le cadre de travaux pluridisciplinaires si l'argumentation des systèmes de la philosophie dite classique (Hegel, Kant, Spinoza) caractérise, dans l'analyse des connaissances, des thèses qui ne relèvent pas de l'argumentation réalisable par machine. Et réciproquement, nous avons examiné si les formes d'argumentations réalisables sur machine pouvaient caractériser l'argumentation des systèmes philosophiques.

■ Jean Sallantin, directeur de recherche au CNRS, responsable du département Acquisition, représentation de connaissance, LIRMM, 860, rue de Saint-Priest, 34090 Montpellier.



L'environnement permettant à un agent rationnel d'apprendre est constitué de cinq acteurs exerçant des rôles différents. Un apprenti construit des couples d'expression (une hypothèse et une argumentation) : l'argumentation étant pertinente pour le maître et l'hypothèse valable pour l'oracle.

L'APPRENTISSAGE PAR GÉNÉRALISATION

Sans généralisation, sans oubli, l'apprentissage n'est qu'un stockage d'informations, mais ni la généralisation, ni l'oubli ne se résument à une simple perte d'informations...

■ Jean-Gabriel Ganascia

Une machine intelligente doit, sans aucun doute, posséder des capacités déductives et des aptitudes à l'analyse et au raisonnement; mais le raisonnement nu, abstrait, sans connaissance sur le monde, s'avère vain. Outre ces facultés logiques, il faut donc doter les machines de facultés cognitives, du pouvoir de connaître, de se représenter et de se remémorer.

Cependant, tant la mémoire que les processus de réminiscence associés ne sauraient être assimilés à un simple stockage d'informations... Les connaissances ne sont pas réductibles à une multitude d'occurrences d'apparition de phénomènes; elles supposent qu'il existe, au-delà de la simple présentation d'expériences, une possibilité de réunification et de synthèse de la diversité.

Intelligence artificielle et apprentissage symbolique

Assimilant les connaissances à des descriptions structurées auxquelles sont associées des procédures de manipulation, l'intelligence artificielle ne saurait donc parvenir à ses fins sans prendre en compte ces différentes dimensions, sans se préoccuper des procédures par lesquelles ces descriptions structurées peuvent se regrouper pour donner naissance à de nouvelles descriptions ou à de nouvelles procédures. Sous-champ de l'intelligence artificielle, l'apprentissage symbolique se consacre à l'étude de ces mécanismes et, en particulier, à l'étude des procédures de généralisation formelle.

Généralisation inductive

La construction de descriptions structurées fait essentiellement appel à des généralisations inductives. Ces dernières

LEARNING BY GENERALIZATION - Generalization procedures play a central role in Machine Learning. They may use inductive or abductive inferences. In the first case, they are essentially used to build structural descriptions while, in the second, they transform or invent procedures manipulating the descriptions.

font intervenir deux opérations, la simplification et l'appariement.

La simplification opère sur des conjonctions de traits en éliminant les traits distinctifs. Ainsi, *rose & couleur-fleur-jaune* et *narcisse & couleur-fleur-jaune* se généralisent en *couleur-fleur-jaune*. Ce processus élémentaire se complique lorsqu'on désire prendre en compte l'implicite des descriptions, par exemple si l'on cherche à généraliser *jonquille et rose & couleur-fleur-jaune* en *couleur-fleur-jaune*. Par ailleurs, l'extension de ces procédures de simplification à de grands ensembles de descriptions nécessite le recours à des stratégies élaborées et à des formalismes algébriques.

L'appariement traite de descriptions structurées complexes faisant intervenir différents objets qu'il faut mettre en correspondance. A titre d'illustration, supposons que l'on ait deux bouquets de fleurs, un bouquet de jonquilles et de marguerites blanches, et un bouquet de narcisses blancs et de mimosas. Selon que l'on s'intéresse à la couleur des fleurs ou à leur famille, on fera correspondre les jonquilles aux mimosas ou aux narcisses... On le voit, l'appariement n'est jamais neutre; il est, lui aussi, lourd d'implicite.

Généralisation par abduction

En regard de la généralisation inductive, il existe une généralisation abductive destinée à la synthèse ou à la transformation de procédures de manipulation de descriptions structurées. Cette dernière a fait l'objet de nombreuses études pendant les années quatre-vingt, dans le cadre de "l'apprentissage par explication". En bref, il s'agit de considérer les "explications", c'est-à-dire tout ce qui, dans les traces d'exécution, s'est avéré utile à la résolution d'un problème, pour les généraliser en une procédure susceptible de résoudre des problèmes analogues sans avoir à reconstruire l'intégralité de la preuve; autrement dit, on a affaire à une compilation par évaluation partielle qui mécanise les phénomènes d'apprentissage par l'action.

■ Jean-Gabriel Ganascia, professeur des Universités, directeur de l'équipe "Apprentissage symbolique et acquisition des connaissances" du LAFORIA (URA 1095 CNRS), Université Pierre et Marie Curie, tour 46-0, 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05.



Correspondances : à quoi répondent les couleurs, le blanc, le jaune, le rouge ? à quoi répondent la rose et l'anémone ?... (V. Van Gogh, 1890, Nature morte avec vases japonais, roses et anémones, Musée d'Orsay, © J.-C. Vergé/ARTIPHOT).

Cognition et développement

Se représenter l'espace et les objets même s'ils ne sont plus visibles, reconnaître un visage, acquérir le langage, prêter à autrui des croyances, pouvoir penser "demain, peut-être", évaluer ses propres capacités... Ces compétences, au même titre que nos organes et leurs fonctions physiologiques, sont le fruit de mécanismes complexes de développement où contraintes génétiques et facteurs environnementaux sont intimement imbriqués. L'étude du développement cognitif vise à comprendre les mécanismes par lesquels s'exprime le patrimoine génétique de l'espèce humaine. Les recherches sur le développement cognitif humain prennent une importance croissante depuis une trentaine d'années. Plusieurs raisons sont à l'origine de cet effort dans un secteur de recherche qui se trouve au carrefour de plusieurs disciplines.

Premièrement, il est devenu évident que les bases biologiques de la cognition adulte demeurent opaques tant qu'on ne peut en déterminer les états et les composants initiaux ainsi que les mécanismes de transformation. Dans les trente dernières années, la mise au point de techniques fiables a permis de mesurer différentes réponses comportementales



J. Miro, *Ubu roy* - (plate IX) (1966), coll. part. (© ADAGP Paris 1992 - Estimodis)

du nouveau-né et du très jeune enfant humain. On put ainsi commencer à étudier les toutes premières interactions de l'individu avec les propriétés caractéristiques de l'environnement propre à son espèce (le milieu aérien, la gravité, les objets, les congénères humains, les voix, les visages, le langage, etc.) et avec les caractéristiques spécifiques de son environnement individuel (le désert ou la ville, le français ou le bambara, etc.).

L'étude du développement constitue une méthode d'approche des mécanismes cérébraux de la cognition. Elle permet en effet de mettre en rapport divers changements d'état du cerveau au cours du développement et les modifications fonctionnelles des compétences cognitives, d'étudier les réorganisations tant cérébrales que comportementales consécutives aux facteurs accidentels survenant à des âges divers, bref de

déterminer la part des facteurs génétiques et épigénétiques dans l'organisation fonctionnelle cérébrale. Plus récemment, les recherches en génétique des comportements ont fait apparaître que sans des connaissances solides sur l'état initial des compétences cognitives, on ne peut déterminer l'origine des différences interindividuelles telles que la rapidité

d'apprentissage, la préférence pour une mémorisation auditive ou visuelle, etc.

Deuxièmement, les progrès de la médecine infantile et de la néonatalogie ont considérablement augmenté les chances de survie des nourrissons. Mais dans certains cas, les pronostics concernant le développement cognitif à long terme des jeunes enfants cérébrolésés sont plus qu'incertains. L'effort de recherche sur le développement cognitif contribue à améliorer la précision des pronostics et des pratiques de rééducation, et à plus long terme, à déterminer les conditions et les conséquences de nouveaux moyens thérapeutiques tels que, par exemple, les transplants neuraux. Troisièmement, l'étude de la genèse du fonctionnement cognitif pourrait fournir de nouvelles hypothèses de travail pour la conception de machines adaptatives intelligentes.

La mise en évidence, à la naissance et dans les premiers mois de vie, de systèmes de traitement de l'information relativement sophistiqués et spécialisés, appuyés par des processus d'attention sélective et sensibles à la nouveauté, a apporté la preuve d'une organisation cognitive initiale présentant déjà certains aspects de l'organisation adulte. Par exemple, des principes d'organisation du monde physique que l'on avait cru acquis par le nourrisson grâce à une représentation mentale de ses actions sur les objets, sont en fait intégrés bien avant qu'il ait accès à ce type d'expérience. Ceci a conduit à ne plus considérer le savoir-faire manuel ou les déplacements comme les seuls générateurs de connaissances et à ne plus tenir ces compétences motrices pour des indicateurs fiables du développement cognitif. L'analyse des capacités perceptives occupe depuis une place importante dans l'étude de la cognition chez le nourrisson. Ce changement de perspective a plus récemment renouvelé l'intérêt pour l'étude des compétences cognitives des primates non-humains, qui apportent aujourd'hui des éléments de comparaison essentiels à notre compréhension de la spécificité de la cognition humaine.

Une deuxième idée qui émerge des recherches de ces dernières années est celle d'une certaine autonomie dans le développement entre diverses compétences cognitives. Le nouveau-né dispose de systèmes de sélection, de traitement et d'organisation des informations disponibles dans l'environnement. L'activité de ces systèmes d'acquisition et de traitement des données ne semble pas gérée par un processeur central, une sorte d'intelligence générale. Les différents systèmes ont leur propre mode de fonctionnement et vraisemblable-

ment, leur propre pattern de développement. Le développement cognitif est le résultat du développement "harmonisé" de ces différents "modules" cognitifs. L'acquisition de la syntaxe de la langue maternelle, par exemple, ne repose pas sur le même système cognitif que celui qui permet à l'enfant de compter, ou d'organiser le monde des objets ou des relations causales. Ceci n'exclut pas l'idée qu'il existe un processeur central qui assurerait la mise en relation des connaissances acquises dans des secteurs différents.

A divers niveaux de traitement et d'élaboration de l'information, les compétences cognitives semblent présenter une organisation modulaire. Par exemple, l'acquisition du lexique et la maîtrise de la syntaxe du langage gestuel par les enfants sourds élevés par des parents sourds utilisant ce langage, s'effectuent selon les mêmes étapes que l'acquisition du langage parlé chez les enfants entendants. Ceci montre que l'acquisition du langage repose sur des mécanismes de structuration des informations et d'interprétation des signaux à un niveau beaucoup plus abstrait que celui de la réception sensorielle, et signale vraisemblablement un mode de développement spécifique au module du langage.

Une grande partie de l'organisation du système nerveux dépend relativement peu de l'effet des stimulations de l'environnement extérieur sur les cellules nerveuses. Cependant certaines propriétés fonctionnelles ne sont pas entièrement déterminées par des facteurs internes, mais dépendent aussi des interactions avec les informations issues de l'environnement qui jouent alors un rôle critique. Le système nerveux est préparé à les organiser et son fonctionnement anticipe certaines classes de stimulations, y

compris des configurations particulières d'informations. Ces informations présélectionnées agissent en tant que signaux et contribuent à la sélection et à la stabilisation de certaines formes d'organisations neurales, qui déterminent à leur tour le traitement et l'apprentissage de certaines formes d'informations plutôt que d'autres. Dans les conditions normales, ces propriétés déterminantes de l'environnement sont universellement présentes, elles font partie de l'environnement caractéristique de l'espèce considérée.

Si l'environnement ne fournit pas les stimulations adéquates au bon moment du développement, ou si l'individu ne peut pas effectuer les conduites destinées à le mettre en présence de ces stimulations, alors des informations inadéquates peuvent engendrer, de façon irréversible, des organisations fonctionnelles neuronales inadéquates. Cette période est dite période sensible ou critique. La date et la durée des périodes sensibles varie selon les fonctions considérées. La complexité du système cognitif, comme celle de chacun des modules qui le composent, explique la difficulté de déterminer les périodes sensibles. De plus, dans bien des cas, on ne dispose pas de modèles animaux permettant d'explorer expérimentalement ces périodes critiques du développement.

Pour des raisons théoriques et méthodologiques, l'effort de recherche durant ces dernières années a porté plus souvent sur les phases très précoces du développement cognitif de l'enfant que sur des phases plus tardives. Les articles qui suivent reflètent cette tendance.

■ *Scania de Schonen, directeur de recherche au CNRS.*

■ *Josiane Bertoni, chargée de recherche au CNRS.*

COGNITION FŒTALE ?

Les processus cognitifs intervenant dans la perception et la mémorisation de stimulations spécifiques sont à l'œuvre dès la période prénatale.

Jean-Pierre Lecanuet,
Benoist Schaal,
Carolyn Granier-Deferre

La naissance introduit une discontinuité écologique majeure dans le cours du développement humain. On considère classiquement que le fœtus passe alors d'un milieu pauvre en stimulations sensorielles (semi-apesanteur, stabilité thermique, éclaircissement très faible) à un environnement qui en submergerait le nouveau-né (un environnement postnatal pour lequel il faut toutefois rappeler que les systèmes sensoriels du nouveau-né sont adaptés).

Les recherches prénatales des dernières décennies, conduites chez l'enfant humain ou sur des modèles animaux, ont suscité une révision décisive de la première partie de cette position. Elles ont montré que le milieu utérin est riche en formes sensorielles variées, en particulier chimiques et acoustiques. En ce qui concerne ces dernières, les recherches récentes montrent que l'intensité et la qualité des signaux sonores sont peu altérées par le franchissement des tissus maternels, sauf dans les composantes fréquentielles élevées (>2-3000 Hz). L'audition d'enregistrements réalisés *in utero* et leur analyse acoustique fine (voir figure) révèlent qu'ils émergent clairement du bruit de fond utérin. De même, l'analyse chimique (par chromatographie) permet de mettre en évidence la présence de nombreux composés odorants et sépiques dans le liquide amniotique.

Les études de la réactivité auditive et olfactive du fœtus montrent qu'il peut percevoir ces stimulations, au moins dans le dernier tiers de la gestation. Ainsi, de fortes stimulations acoustiques (>105 dB SPL, *ex utero*) induisent des accélérations du rythme cardiaque fœtal (RCF) et des mouvements réflexes de sursauts. Les sons moins intenses, présentés isolément ou répétés à un rythme lent (un toutes les 3 secondes), peuvent provoquer des décélérations transitoires du RCF. Le changement d'une caractéristique acoustique (hauteur ou timbre) du signal répété entraîne une nouvelle décélération du RCF qui en indique la perception. Cette méthode apparentée à la procédure d'habituation/déshabitude permet d'étudier les capacités de discrimination auditives du fœtus. Par ailleurs, à défaut de pouvoir la vérifier directement chez l'homme, l'aptitude à détecter un stimulus chimio-sensoriel a été examinée chez les fœtus de rat et de mouton. L'injection intra-orale ou intra-anales d'une odeur en solution déclenche ainsi des modifications immédiates du RCF.

Le nouveau-né a des préférences auditives et olfactives

Dans ces deux modalités – audition et olfaction – l'expérience sensorielle fœtale peut avoir des conséquences comportementales durables au-delà de la naissance. Ainsi, des études – encore controversées pour certaines – indiquent que l'exposition prénatale prolongée à la langue maternelle, à la voix maternelle, à des

FETAL COGNITION? - Recent trends in perinatal research have shown that human and mammalian fetuses are able to respond to acoustic and chemical stimuli during the last third of the gestation period. Prenatal experience with such stimuli can induce acquisitions pervading after birth, thus suggesting some form of transnatal continuity of sensory cues, perceptual abilities and mnemonic processes.

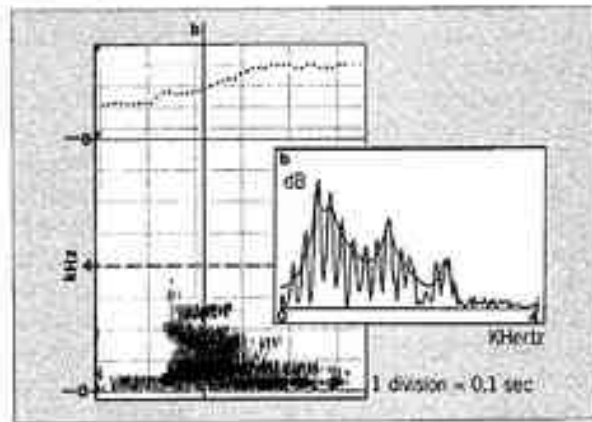
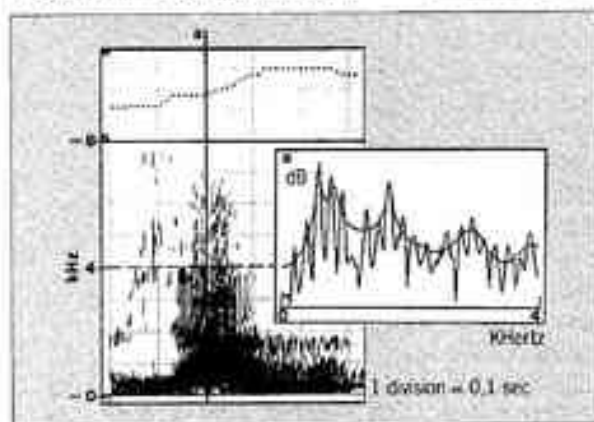
séquences de parole ou de musique particulières influence les préférences du nouveau-né envers ces stimuli. Dans une même perspective, l'odorisation expérimentale du liquide amniotique durant les derniers jours de gestation induit, chez le raton nouveau-né, une préférence marquée envers l'odeur familière par rapport à une odeur nouvelle. Des résultats similaires ont été obtenus chez le mouton.

Le cerveau fœtal paraît donc suffisamment mature pour discriminer et mémoriser certaines qualités de son environnement olfactif et auditif, et pour utiliser ces références sensorielles au cours de situations de choix dans la période postnatale. Ces acquisitions optimiseraient l'adaptation psycho-biologique du nouveau-né à l'environnement postnatal. On peut ainsi envisager l'existence d'une continuité écologique, perceptive et mémorique entre les périodes fœtale et néonatale.

Jean-Pierre Lecanuet, directeur de recherche au CNRS, directeur du Laboratoire de psychobiologie du développement (URA 315 CNRS/EPHE).

Benoist Schaal, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de psychobiologie du développement (URA 315 CNRS/EPHE).

Carolyn Granier-Deferre, assistante à l'Université René Descartes, Laboratoire de psychobiologie du développement (URA 315 CNRS/EPHE), 41, rue Gay-Lussac, 75005 Paris.



Analyses acoustiques (logiciel UNICE 1.72, coll. avec B. Gauthier) de l'enregistrement extérieur (à gauche) et dans l'utérus (à droite) d'un son d'homme. Les fréquences aiguës, visibles sur le sonogramme "extérieur" (jusqu'à 8 kHz) sont absentes *in utero*. Cependant, l'analyse spectrale (jusqu'à 4 kHz) des périodes harmoniques (a) et du murmure qu'il sous-tend, *in utero*, une part importante de l'énergie acoustique maternelle.

L'ACQUISITION DE LA PAROLE

Une capacité universelle à percevoir et à produire les sons d'une langue est mise en évidence dès les premiers mois de la vie.

■ **Josiane Bertoneini,**

Bénédicte de Boysson-Bardies

Les capacités précoces de traitement de la parole relèvent-elles de mécanismes auditifs généraux, ou témoignent-elles déjà du fonctionnement de mécanismes innés spécifiques ? Des méthodes expérimentales adaptées permettent d'examiner les réponses perceptives des jeunes enfants, afin de caractériser les mécanismes fondamentaux de notre système de traitement de la parole.

La parole est un signal continu et variable qui exige des opérations perceptives de segmentation et de normalisation pour que des unités (syllabes, mots...) puissent être reconnues automatiquement, en dépit de leur variabilité acoustique. Le nouveau-né dispose-t-il, avant même d'avoir été exposé à une langue particulière, de capacités perceptives aptes à segmenter, catégoriser et représenter de telles unités ?

Les capacités perceptives

Les capacités précoces de discrimination suggèrent que les processus de traitement s'amorcent sur des unités de l'ordre de la syllabe. Celles-ci sont mieux discriminées que des séquences non syllabiques, et servent à la base des premières représentations. Des séquences polysyllabiques peuvent être distinguées sur leur nombre de constituants syllabiques, et non sur le nombre de phonèmes. Certaines unités de parole sont traitées de façon privilégiée par le système perceptif initial, sans qu'une longue période d'exposition à l'environnement linguistique soit nécessaire.

De telles prédispositions révèlent les caractéristiques universelles de notre capacité innée à traiter la parole. Ainsi, l'enfant est sensible aux caractéristiques prosodiques de la parole (rythme et intonation). La reconnaissance de la voix maternelle, ou encore la discrimination entre une langue familière et une langue inconnue, reposeraient sur cette sensibilité aux informations prosodiques.

Néanmoins, les processus de traitement de la parole doivent très rapidement se conformer aux caractéristiques de la langue environnante. On constate ainsi qu'au début du développement, tout contraste phonétique peut être discriminé et que, sous l'effet de l'environnement linguistique, seuls les contrastes propres à la langue maternelle continuent d'être traités. Ce processus de sélection pourrait également opérer au niveau du développement des unités de traitement. On tente maintenant de déterminer s'il existe une unité perceptive universelle, disponible dès la naissance, à partir de laquelle le système perceptif peut extraire les propriétés particulières de l'organisation métrique d'une langue.

Le traitement perceptif, accompli au cours des premiers mois, doit permettre l'établissement des représentations nécessaires à la production des sons de la langue, dès que le système contrôlant l'appareil phonatoire aura atteint un état de maturation suffisant.

Du babillage à la parole

La production de syllabes articulées ne commence que vers 6 ou 7 mois. C'est une étape comportementale essentielle qui marque l'établissement d'un lien fonctionnel entre les processus de percep-

tion et la production de sons vocaux. Les premières productions de babillage dépendent essentiellement des mouvements articulaires fondamentaux. Ce n'est qu'à 9-10 mois que les capacités articulatoires s'organisent en fonction de la langue parlée dans l'environnement. Deux processus sous-tendent cet ajustement, l'un de sélection, l'autre de sémantisation : l'analyse acoustique des voyelles, ainsi que l'analyse fréquentielle du répertoire consonantique indiquent dès 9-10 mois une spécificité des distributions des sons produits, en rapport avec la langue maternelle, puis, vers 10-11 mois, l'enfant commence à attribuer une signification aux *patterns* sonores de la langue. L'analyse des productions bisyllabiques révèle alors l'établissement d'une structuration séquentielle qui annonce celle des premiers mots des enfants, reflétant ainsi le début d'une organisation systématique des représentations articulatoires.

Les premiers mots se distinguent cependant en ce qu'ils sont de véritables "cibles" articulatoires qui requièrent une programmation et un contrôle plus strict de la production. Les enfants, ne possédant pas encore la maîtrise de l'organisation temporelle des gestes articulatoires, doivent optimiser la qualité des productions en minimisant la complexité de réalisation. On voit à cet effet apparaître des stratégies individuelles pour adapter et systématiser les *patterns* élaborés pendant le babillage.

Quatre à six mois plus tard, une soudaine évolution du vocabulaire indique que la constitution du système phonologique de la langue maternelle permet à l'enfant d'organiser son lexique mental. En moins de deux ans, l'une des activités les plus complexes et les plus spécifiques à l'espèce humaine, la production de la parole articulée, sera devenue fonctionnelle.

LANGUAGE ACQUISITION - On the basis of their specific speech processing capacities, young infants can select relevant speech cues, and organize them into structured representations leading to the perception and production of the linguistic units of their mother tongue.



On examine les capacités de discrimination auditive des nouveau-nés en mesurant leur succion non nutritive pendant la présentation de différents sons de parole.

■ **Josiane Bertoneini**, chargée de recherche au CNRS, Laboratoire de sciences cognitives et psycholinguistique (URA 1198 CNRS/EHESS), 54, boulevard Raspail, 75270 Paris Cedex 06.

■ **Bénédicte de Boysson-Bardies**, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de psychologie expérimentale (URA 316 CNRS/EHESS), 54, boulevard Raspail, 75270 Paris Cedex 06.

LA RECONNAISSANCE DES VISAGES CHEZ LE NOURRISSON

A partir de la naissance, une succession de mécanismes cérébraux plus ou moins spécifiques et efficaces assure l'acquisition de représentations des visages.

■ Scania de Schonen,
Yves Burnod,
Christine Deruelle

Dès les premières minutes de vie, les propriétés des mécanismes visuels font que le nouveau-né est un peu plus attentif à certaines formes qu'à d'autres. Il fixe visuellement plus longtemps un schéma représentant un faciès humain qu'un schéma comportant les mêmes traits, mais formant une configuration différente de celle d'un faciès. Ce système d'attention sélective permet au cerveau d'acquiescer de l'information sur les formes spécifiques qui sont visuellement examinées.

En effet, dans les trois jours qui suivent la naissance, le nourrisson reconnaît certains aspects de la structure du visage de sa mère et distingue celui-ci, en l'absence de toute source d'information vocale ou olfactive, de celui d'une étrangère. Vers l'âge de 4 mois, on constate l'existence de deux systèmes de traitement des visages. Un groupe de systèmes contrôlés par l'hémisphère cérébral droit, très performant dans la reconnaissance des visages, traite les configurations, les relations spatiales entre éléments, mais non la forme de ces éléments. Un autre groupe de systèmes, contrôlé par l'hémisphère gauche, traite les éléments locaux des visages ; mais ce système est très peu efficace pour reconnaître des visages comparativement au système de l'hémisphère droit. On observe ce même type de différence entre hémisphères pour le traitement de *patterns* quelconques. Mais, contrairement au cas du traitement des *patterns* quelconques, le développement des traitements des visages diffère entre les populations de filles et de garçons, ce qui suggère qu'il dispose d'une certaine autonomie par rapport au développement des traitements des *patterns* quelconques. Les différences entre hémisphères cérébraux se retrouvent chez l'adulte. Ainsi, la dissociation entre deux modes de traitement et de représentation des visages et leur latéralisation hémisphérique est présente très précocement. Il faut donc chercher l'origine de

ces différences hémisphériques dans l'organisation neuronale des structures cérébrales concernées à cet âge.

Mimer le développement perceptif du nourrisson

A partir des résultats ainsi obtenus sur les capacités fonctionnelles du cerveau et la date de leur apparition, on peut tenter de comprendre les effets conjoints des facteurs internes de la maturation cérébrale et des facteurs environnementaux sur le développement de ces capacités. D'une part, les études de la maturation cérébrale fonctionnelle par tomographie d'émission de positons (voir l'article de B. Mazoyer) montrent une hétérochronie des rythmes de maturation



Vers l'âge de 4 mois, le nourrisson dispose de deux systèmes différents pour traiter les visages. L'hémisphère droit du nourrisson apprend et différencie deux visages sur la base des relations spatiales entre leurs éléments : il différencie le visage a du visage c qui ne diffère que par le positionnement des yeux dans le visage ; mais il ne peut pas différencier a de b. Inversement, l'hémisphère gauche ne peut pas différencier a de c, mais il peut différencier les visages a et b qui ne diffèrent que par la forme des yeux.

INFANT FACE RECOGNITION - Individual face recognition is a skill present in 3-day old infants. Other face recognition devices emerge later on. Successive events in brain maturation and experience guided by the early device, are considered as mechanisms involved in the organisation of the later face recognition devices. The study of these mechanisms requires the collaboration of several scientific disciplines.

entre régions corticales pendant la première année de vie. Cette hétérochronie pourrait être l'un des facteurs de spécialisations corticales. D'autre part, l'effet sérieusement perturbateur à long terme de certaines lésions cérébrales néonatales sur l'apprentissage des visages indique que la plasticité cérébrale pour ces compétences perceptivo-cognitives est de durée plus courte que pour l'acquisition du langage. Enfin, les études sur les changements avec l'âge de la micro-structure du tissu cérébral et sur les propriétés des neurones de différentes aires corticales visuelles commencent peu à peu à être intégrées dans des modèles de simulation. On développe à l'heure actuelle des modèles de type connexionniste, très simplifiés, qui simulent la réponse d'une population de neurones corticaux à un stimulus tel qu'un visage ou une figure géométrique. Cette modélisation permet de mieux comprendre quelles sont les propriétés minimales du réseau cortical, requises pour mimer le développement des capacités perceptives du nourrisson. Une meilleure compréhension du développement des compétences de reconnaissance perceptive et d'exploration peut inspirer en retour de nouveaux courants de recherche en intelligence artificielle.

■ Scania de Schonen, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de neurosciences cognitives (UPR 9012 CNRS).

■ Yves Burnod, directeur de recherche à l'INSERM, directeur du groupe Neurosciences computationnelles, Institut des neurosciences (URA 1199 CNRS), Université Paris VI, 9, quai Saint-Bernard, 75252 Paris Cedex 05.

■ Christine Deruelle, titulaire d'une bourse postdoctorale du PIR Cognisciences du CNRS, Laboratoire de neurosciences cognitives (UPR 9012 CNRS), 31, chemin Joseph Aiguier, 13009 Marseille.

LES DÉBUTS DE LA CONNAISSANCE DES OBJETS

Avant de savoir agir sur les objets et à partir de ses systèmes sensoriels et perceptifs, le bébé organise son environnement.

■ Arlette Streri,
Roger Lécuyer

Les activités perceptives ne consistent pas simplement à prélever des informations au moyen des systèmes sensoriels, mais aussi à mettre en relation ces informations. Par exemple, la situation d'habituation-réaction à la nouveauté qui semble simple puisqu'il s'agit d'une diminution des durées d'exploration pour l'habituation et d'une augmentation de ces durées pour la réaction à la nouveauté, repose sur des mécanismes cognitifs complexes (mémorisation, reconnaissance, comparaison, discrimination). Elle permet d'étudier les capacités de différenciation. L'activité perceptive du bébé implique qu'il structure son environnement.

La question très ancienne de l'unité ou de la séparation initiale des modalités sensorielles a reçu récemment une réponse. Dès 2 mois, les bébés sont capables de reconnaître visuellement la forme d'un objet qu'ils ont manipulé sans contrôle visuel. Les frontières entre objets, leur cohésion, les différences de poids, la texture sont des dimensions pertinentes pour les transferts intermodaux. Cependant, une reconnaissance tactile d'un objet préalablement regardé n'a pu être observée avant 5 mois. L'organisation perceptive tactile élaborée à partir de la manipulation d'un objet n'est pas la même que celle qui résulte du fonctionne-

ment visuel. Des contraintes à la fois motrices et perceptives limitent les échanges d'informations entre ces deux modalités au cours du développement.

Les bébés peuvent saisir des relations causales

Les bébés de quelques mois sont aussi capables d'organiser leur environnement en catégories. Par exemple, dans une phase de familiarisation, des figures géométriques différentes ayant un point commun (nombre d'éléments, position d'une découpe) sont présentées à des bébés de 3 et 5 mois. Dans la phase test qui suit, on présente alternativement une figure nouvelle appartenant à la catégorie et une autre n'y appartenant pas. Les durées de fixation augmentent sur la seconde figure et non sur la première : pour les bébés, cette seconde figure n'appartient pas à la même catégorie que les figures présentées dans la première phase, alors que la figure catégorielle de la phase test n'est pas traitée comme nouvelle.

Les bébés peuvent saisir des relations causales entre événements. Pour mettre en évidence cette capacité, la procédure d'habituation-réaction à la nouveauté est insuffisante (différencier un mouvement causal d'un mouvement non causal n'implique pas que la différenciation est basée seulement sur la relation causale). Avec des bébés de 3 mois, nous avons donc utilisé la procédure de catégorisa-

THE BEGINNINGS OF KNOWLEDGE - Habituation and novelty-reaction methods have furthered research on perceptual systems and cognition during infancy. Numerous studies of intermodal transfer, categorization activities and causal perception show evidence of young infants' capacities to organize their environment.

tion présentée ci-dessus. Dans la phase de familiarisation, des objets différant par la taille et la couleur se heurtent de manière causale (départ immédiat de l'objet heurté) ou non causale (départ différé). Dans la phase test, les bébés voient alternativement les deux types de mouvements. Ils regardent toujours plus longtemps le causal que le non causal.

L'ensemble de ces recherches montre que, avant la coordination de la vision et de la préhension, les bébés développent des capacités importantes de compréhension du monde. Leur organisation perceptive est opérationnelle bien avant leurs possibilités d'action sur l'environnement. Dès six mois, les bébés ont acquis les connaissances de base sur le fonctionnement de leur univers.

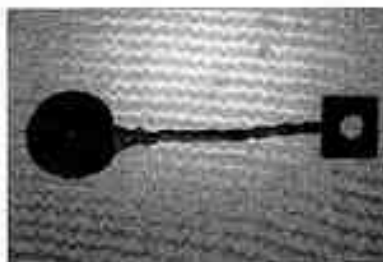
■ Arlette Streri, maître de conférences à l'Université René Descartes, Laboratoire de psychologie du développement et de l'éducation de l'enfant (URA 1353 CNRS).

■ Roger Lécuyer, professeur à l'Université René Descartes, Laboratoire de psychologie du développement et de l'éducation de l'enfant (URA 1353 CNRS), 46, rue Saint-Jacques, 75005 Paris.



Exploration bimanuelle d'un objet, sans contrôle visuel, par un bébé de 4 mois dans une expérience de transfert intermodal.

Objet à explorer visuellement.



LA RECONNAISSANCE DE SOI

Malgré les découvertes récentes concernant les compétences précoces des bébés, force est de reconnaître que tout n'est pas acquis dès la naissance. L'analyse du développement au cours de la prime enfance réserve des surprises.

■ Pierre-Marie Baudonnière,
Jean-Claude Lepecq,
François Jouen

De nombreux travaux attestent l'existence de compétences précoces chez le bébé humain. Cependant, celles-ci ne sont pas pour autant d'emblée intégrées dans des activités cognitives complexes. Le décalage qui existe entre, d'une part, la sensibilité précoce aux covariations qui résultent de l'activité propre du bébé, et d'autre part, la reconnaissance par l'enfant de son image spéculaire (dans le miroir) en constitue un bon exemple.

Le bébé humain, comme beaucoup d'autres animaux, est extrêmement sensible aux régularités environnementales ainsi qu'aux covariations qui résultent de sa propre activité. Ces covariations correspondent aux corrélations strictes qui existent entre des efférences motrices et des réafférences sensorielles. Ainsi, dans un monde visuel et sonore stable, une simple rotation de la tête se traduit-elle par des modifications continues et corrélatives des informations visuelles, auditives, vestibulaires et proprioceptives. Ces informations covariantes sont probablement à la base de l'élaboration cognitive par le bébé de certaines propriétés de son propre organisme et de l'environnement dans lequel se déploient ses activités.

L'émergence de la notion de sujet

L'existence de cette sensibilité aux covariations est attestée précocement au cours du développement. Cependant, la question est de savoir à partir de quand l'organisme identifie certaines covariations comme émanant de sa propre activité. Cette question, apparemment banale, ne pose rien moins que le problème de l'émergence de la "notion de sujet". Les travaux relatifs à la reconnaissance par l'enfant de son image spéculaire sont particulièrement illustratifs d'une telle question. Les résultats semblent indiquer que si la sensibilité à certaines covariations constitue sans doute une condition nécessaire à la reconnaissance de soi dans le miroir, cette sensibilité ne constitue pas pour autant une condition suffisante à la manifestation de cette reconnaissance.

Très précocement, le bébé est capable de tenir compte de covariations entre des informations visuelles et des informations proprioceptives. Ainsi, dès l'âge de 5 mois, le bébé semble détecter la covariation entre le mouvement de ses jambes non visibles et leur image vidéo en direct.

Pourtant, avant 19-20 mois, la plupart des enfants sont incapables de reconnaître leur image spéculaire. Le test le plus couramment admis pour tester cette reconnaissance est l'épreuve dite de la "tache" (voir figure). Elle consiste à maculer, à son insu, la joue de l'enfant au moyen d'une tache de couleur, puis de le placer devant un miroir et d'attirer son attention sur le reflet de son visage. L'enfant qui se reconnaît porte alors très rapidement la main à son visage. Cette épreuve n'est réussie que vers 19-20 mois, que les enfants aient été ou non antérieurement confrontés à des surfaces réfléchissantes.

Comment expliquer un décalage de 15 mois entre la réussite à ces deux épreuves ? Face à l'image spéculaire, l'enfant est aussi dans la situation de mettre en relation ses mouvements visuellement perçus dans le miroir et les informations proprioceptives corrélatives de ces mouvements. La reconnaissance de l'image spéculaire semble donc nécessiter d'autres compétences que la seule sensibilité aux covariations entre des mouve-

SELF-RECOGNITION - Some complex cognitive activities, such as child self-recognition, cannot be explained simply by early sensori-motor competence. Although capable of detecting synchrony between proprioception and vision as early as 5 months old, a child cannot recognize his own mirror image before 19/20 months of age.

ments segmentaires visuellement perçus et les informations proprioceptives correspondantes. L'hypothèse actuellement la plus plausible est que la reconnaissance de l'image spéculaire serait corrélative de l'accès à la "fonction symbolique" ou "sémiotique". Cette fonction, considérée comme spécifique de l'espèce humaine, renvoie à la capacité à manipuler des symboles et non plus seulement des indices ou des signes. Cette forme de représentation est peut-être la condition pour que l'enfant admette qu'il est simultanément "devant" et "dans" le miroir.

■ Pierre-Marie Baudonnière, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de psychologie cognitive, psychopathologie psychiatrique et neurologique (URA 654 CNRS).

■ Jean-Claude Lepecq, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de psychologie cognitive, psychopathologie psychiatrique et neurologique (URA 654 CNRS).

■ François Jouen, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de psychologie cognitive, psychopathologie psychiatrique et neurologique (URA 654 CNRS), Hôpital de la Salpêtrière, 47, boulevard de l'Hôpital, 75651 Paris Cedex 13.



Lorsque l'enfant se reconnaît, il est surpris et rapidement porte la main à son visage afin d'effacer la tache.

LA CORTICOGÉNÈSE DU PRIMATE

La corticogénèse du primate est régie par des stratégies développementales uniques à cet ordre, responsables de la mise en place de caractéristiques structurales spécifiques.

■ Henry Kennedy,
Colette Delhay

L'évolution du cerveau des mammifères se caractérise par une considérable expansion du cortex cérébral qui, parcellé en de multiples aires corticales, fournit le substrat morphologique du riche répertoire comportemental et cognitif observé chez le primate. En dépit de l'intérêt que représentent les connaissances concernant l'ontogénèse du cortex cérébral du primate pour la compréhension du développement et de la maturation des facultés cognitives de l'homme, peu de recherches ont été faites dans ce domaine.

Nous avons choisi le cortex visuel du singe macaque comme modèle d'étude de la corticogénèse. Le système visuel du primate doit son haut degré de sophistication anatomo-fonctionnelle, notamment en ce qui concerne les capacités de traite-

ment de l'information, au fort degré de compartimentation des voies de projection et ce, depuis la rétine jusqu'au cortex. Par ailleurs, la période prolongée du développement du cortex du singe permet à l'expérimentateur d'étudier les événements avec une grande résolution temporelle.

D'une façon générale, nous avons montré qu'un certain nombre de caractéristiques du cortex – identité des aires corticales, motif des connexions cortico-corticales – sont spécifiées beaucoup plus précocement chez le singe que chez les autres espèces. La connectivité corticale chez le singe se caractérise par une très grande précision, et ceci dès les stades initiaux de sa mise en place.

Etudier la généalogie des neurones corticaux

Actuellement, nous étudions les lignages cellulaires dans le cortex céré-

PRIMATE CORTICOGENESIS - The developing CNS is shaped by intrinsic and extrinsic factors. This is also true at the level of the cerebral cortex, the seat of higher functions characteristic of primates. Recently we have been able to show that the development of the cerebral cortex is characterized by particular timetables - indicating differences in adaptation to alternative life histories.

bral du singe à l'aide de la technique de transfert de gène par vecteur rétroviral. Ceci permet d'introduire, in vivo, un gène exogène dans le génome d'un précurseur neuronal. La présence du gène marqueur est révélée par une réaction histochemique, et on dispose de cette façon d'un marquage génétique, indélébile, et qui se transmet aux générations successives sans dilution. Cette étude de la généalogie des neurones corticaux, que nous combinons avec une étude de la prolifération neuronale à l'aide de précurseurs radioactifs de l'ADN, va permettre d'explorer les différences fondamentales qui distinguent la corticogénèse des primates de celle des autres espèces. En effet, le cortex des primates (à l'exception du cortex visuel primaire) et celui des non-primates possèdent un nombre similaire de neurones dans une colonne radiale de cortex. Or les neurones corticaux sont générés pendant une période de 6 à 7 jours chez le rat, et de 60 jours chez le singe. Ceci suggère que la dynamique de prolifération neuronale est radicalement différente chez ces deux espèces : la division cellulaire se produit beaucoup plus rapidement et/ou le nombre de précurseurs dans la zone germinale est considérablement plus élevé chez le rongeur que chez le primate. De telles différences dans la cinétique des cycles cellulaires indiquent que des décisions développementales qui sont prises à des moments successifs chez le primate sont prises simultanément, c'est-à-dire dans le même environnement, chez le rat. Il est donc probable que les relations généalogiques soient différentes chez les primates et les non-primates.



Les connexions cellulaires qui relient les deux hémisphères cérébraux sont caractérisées par un degré de précision remarquable au niveau de la frontière qui sépare l'aire 17 de l'aire 18. Ceci est illustré sur ce cliché qui montre les connexions callosales marquées avec le traceur rétrograde HRP (horseradish peroxidase de ralloff). Les études du développement ont montré que la précision de cette organisation existe depuis les stades initiaux de la formation des connexions, au cours de l'ontogénèse prénatale du primate. Ces résultats indiquent que, contrairement à ce que l'on observe chez les non-primates, les aires corticales du primate sont spécifiées par des facteurs intrinsèques.

■ Henry Kennedy, directeur de recherche à l'INSERM, directeur de l'Unité Cerveau et vision (Unité 371 INSERM).
■ Colette Delhay, chargée de recherche au CNRS, Unité Cerveau et vision (Unité 371 INSERM), 18, avenue du Doyen Lépine, 69500 Bron.

GÉNÉTIQUE ET COGNITION

L'articulation des niveaux d'intégration les plus élevés avec la génétique formelle, quantitative et moléculaire, est l'aspect le plus paradoxal de ces dernières décennies.

■ Pierre Roubertoux.

Wim E. Crusio

Si les conclusions sur l'hérédité de ce qu'on appelle l'intelligence restent l'objet de polémiques, l'approche génétique des troubles psychiatriques sous leur aspect désordres du fonctionnement cognitif constitue un champ prometteur. Les recherches menées sur les espèces infra-humaines ont atteint, en revanche, un haut degré de sophistication. Chez la *Drosophile*, l'aptitude à apprendre fait l'objet de sélections directionnelles et des mutations affectant l'apprentissage sont identifiées tant au niveau comportemental que moléculaire. La panoplie des techniques de génétique montre toute sa richesse chez la souris. La reconnaissance de l'autre (petit ou partenaire sexuel) est liée au complexe d'incompatibilité majeur; des transgènes humains, qu'on suppose être impliqués dans le vieillissement accéléré, altèrent les capacités mnésiques des souris qui les ont incorporés à leur génotype. On commence aussi à bien connaître les gènes qui affectent la neuromédiation avec leurs retombées comportementales.

La génétique fournit également des outils qui permettent de tester la fonction-

nalité de la liaison entre plusieurs traits neuronaux et/ou comportementaux. On a choisi d'illustrer cette approche à partir d'un ensemble de travaux qui visent à démontrer l'implication de variations de certaines structures de l'hippocampe dans les performances d'apprentissage. Chez la souris, les projections des fibres mossues intra-hippocampales (IIP) de cette région varient considérablement entre lignées consanguines (chaque lignée est homozygote à chaque locus et les individus qui la composent sont génétiquement semblables). Cette variation est héréditaire et s'accompagne de modifications dans les performances d'apprentissage. Une grande surface de projection des IIP est associée à une réduction d'erreurs dans un apprentissage spatial (labyrinthe radial) et à un accroissement des erreurs dans un apprentissage associatif d'évitement. L'existence d'une corrélation génétique entre les IIP et les traits comportementaux

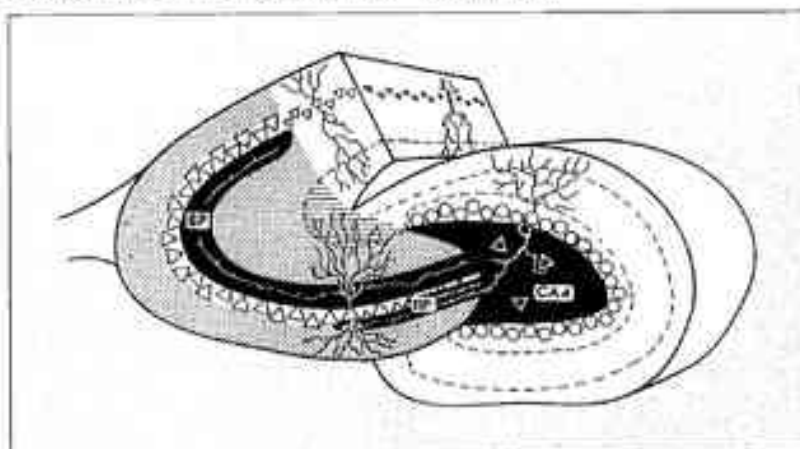
GENETICS AND COGNITION - Genetic tools can be very useful to study brain-behavior relationships in inbred mouse strains and crosses between them. Specifically, differential learning capacities are genetically correlated with neuroanatomical variations in the hippocampus.

suggère fortement la causalité de la liaison puisque les mêmes gènes influencent simultanément les traits. L'utilisation de variations spontanées mais non pathologiques, entre lignées, est une alternative aux techniques de lésion ou de stimulation classiques pour étudier le rôle d'une structure dans un comportement.

■ Pierre Roubertoux, professeur des universités, directeur de l'unité Génétique, neurogénétique et comportement (URA 1294 CNRS).

■ Wim E. Crusio, chargé de recherche au CNRS, unité Génétique, neurogénétique et comportement (URA 1294 CNRS), Université Paris VI, 45, rue des Saints-Pères, 75220 Paris Cedex 06.

Coupe horizontale d'un hippocampe de souris, coloré par la méthode de Timm, Schöten (en noir) : fibres mossues suprapyramidales (SP), intra- et entrapyramidales (IP), et ténues (CA). Deux exemples sont donnés : souris mâle de souche C57BL/6 (a) : forte projection de IP, presque toutes les PM sont intrapyramidales; et souris mâle de souche BALB/c (b) : projection de IP moins forte, presque toutes les TM sont entrapyramidales.



LATÉRALISATION CÉRÉBRALE ET REPRÉSENTATION MENTALE

L'hémisphère gauche du babouin, contrairement au droit, résout un problème de rotation mentale en adoptant une stratégie semblable à celle de l'homme.

■ Jacques Vuclair,
Joël Fagot

Plusieurs travaux ont montré que le primate non humain est doté, comme l'homme, d'un cerveau asymétrique. Cette asymétrie s'observe dans la morphologie cérébrale ainsi que dans le fonctionnement sensori-moteur. Cependant, on n'a jamais trouvé chez l'animal une latéralisation fonctionnelle pour la rotation mentale, un phénomène cognitif particulièrement robuste chez l'homme. La rotation mentale implique l'identification d'un objet après un changement d'orientation. Dans ce cas, le temps mis pour reconnaître cet objet est d'autant plus long que la rotation de l'objet est importante. Nous avons tenté d'étudier chez le babouin le phénomène de rotation mentale, conjointement avec la question des spécialisations cérébrales.

La figure montre le dispositif expérimental et illustre le paradigme et les résultats. Dans un premier temps, l'animal perçoit très brièvement un stimulus-cible dans l'hémichamp visuel droit, c'est-à-dire dans l'hémisphère gauche ou dans l'hémichamp visuel gauche (hémisphère droit). Dans un second temps, l'écran affiche deux stimulus-objets dont l'un représente le stimulus-cible après des rotations entre 0° et 300°. L'animal doit, en manipulant un mini-manche, déplacer un curseur sur l'écran pour le mettre en contact avec le stimulus-cible. Les résultats indiquent que les temps de réponse sont d'autant plus longs que le changement d'orientation est important. Cependant, cet effet n'est ob-

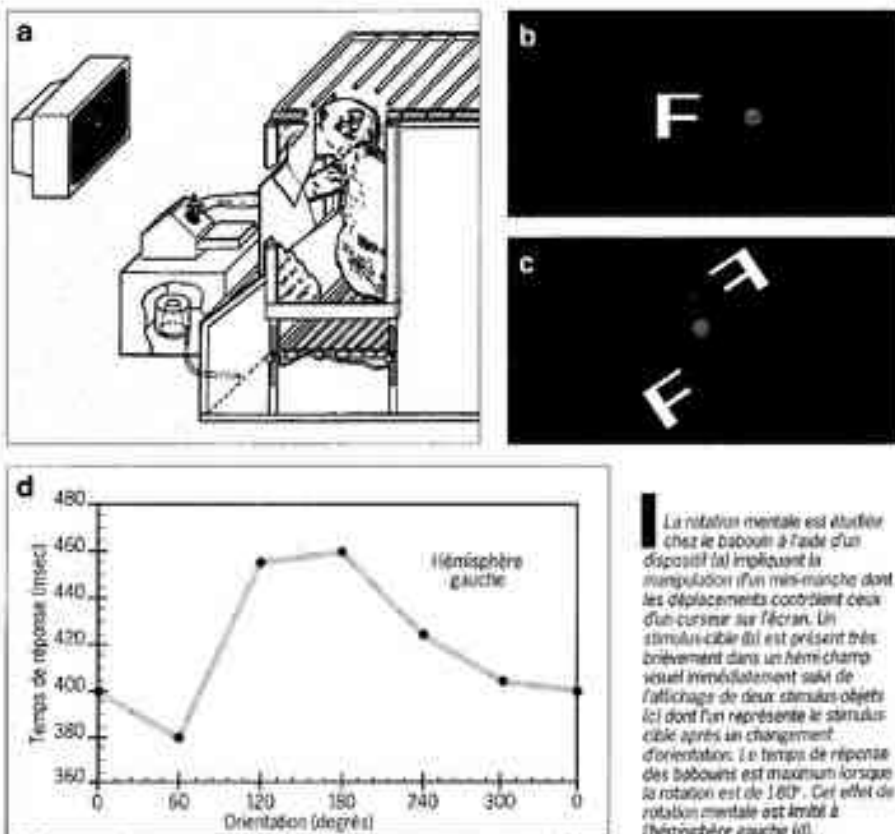
servé que lorsque le stimulus-cible est présenté à l'hémisphère gauche. Aucun lien direct entre l'amplitude de la rotation et le temps de réponse n'est trouvé lorsque l'information visuelle est dirigée dans l'hémisphère droit.

Ces données fournissent une illustration supplémentaire de l'existence d'asymétries hémisphériques chez le singe. De plus, elles suggèrent un même traitement des transformations spatiales entre l'homme et le primate non humain. Toutefois, cette ressemblance est limitée aux présentations dans l'hémisphère gauche. Outre son intérêt comparatif, cette étude valide une approche purement

CEREBRAL LATERALIZATION AND MENTAL REPRESENTATION - Spatial transformations involved in mental rotation problems are performed with the use of a human-like strategy by the left but not by the right hemisphere in baboon. Such a result suggests the existence of partially comparable representational processes in baboons and humans.

comportementale du modèle primate pour l'analyse des spécialisations cérébrales.

■ Jacques Vuclair, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de neurosciences cognitives (UPR 9012 CNRS).
■ Joël Fagot, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de neurosciences cognitives (UPR 9012 CNRS), 31, chemin Joseph Aiguier, BP 71, 13402 Marseille Cedex 9.



La rotation mentale est élaborée chez le babouin à l'aide d'un dispositif (a) impliquant la manipulation d'un mini-manche dont les déplacements coordinent ceux d'un curseur sur l'écran. Un stimulus-cible (b) est présent très brièvement dans un hémichamp visuel immédiatement suivi de l'affichage de deux stimulus-objets (c) dont l'un représente le stimulus-cible après un changement d'orientation. Le temps de réponse des babouins est maximum lorsque la rotation est de 180°. Cet effet de rotation mentale est limité à l'hémisphère gauche (d).

Modélisations, simulations et imagerie

Les sciences cognitives sont, comme toutes les sciences, productrices de modèles et d'images des systèmes qu'elles étudient. Aussi trouve-t-on tout au long de ce numéro des "modèles" et des "modélisations". Qu'ont donc alors de particulier, demandera-t-on, les travaux regroupés dans le présent chapitre ?

Une première réponse, purement descriptive, est qu'ils ont un air de famille prononcé qui à la fois les rapproche et les distingue, dans leur ensemble, de la plupart des autres fruits de la recherche sur la cognition. A cet aspect est lié le fait qu'ils sont le lieu privilégié de l'intervention, au sein du domaine, des physiciens et des mathématiciens. On peut sans doute vouloir expliquer l'air de famille de ces modèles par la culture scientifique où ils sont élaborés, mais il reste alors à comprendre ce qui incite certains chercheurs issus de cette culture à se mêler de questions qui semblent concerner bien davantage les psychologues, les linguistes, les logiciens, etc. d'une part, les neurobiologistes de l'autre. Il n'y a pas, on s'en doute, d'explication unique. Mais la question va nous servir de fil directeur.

Par delà leur diversité, les recherches décrites dans ce chapitre visent toutes à mettre en correspondance aussi systématiquement que possible les propriétés de base du système matériel



G. De Chirico, Les Murs indolentes (1916-1917), March, Nouvelle pinacothèque (© SPADEM Paris 1992, Held - Artphoto).

responsable d'une fonctionnalité donnée et les caractéristiques émergentes de son comportement. En un sens, c'est là tout le programme des sciences cognitives dans leur ensemble. En un autre sens, c'est au contraire l'objet spécifique d'une démarche physicienne. La distinction surgit au niveau des "propriétés de base" sur lesquelles on choisit de faire reposer le modèle. Le physicien puise dans le répertoire de la physique. Il peut s'agir d'une branche concrète de la physique ; mais des propriétés plus abstraites sont fréquemment mises en jeu, ce qui explique le rôle du mathématicien. En fait, il n'y a pas de distinction tranchée entre la contribution de l'un et de l'autre. Le physicien apporte son

expérience de systèmes matériels qu'il étudie depuis longtemps (l'exemple-type étant celui des verres de spin que la physique du solide connaît de longue date, et à l'image desquels on s'est mis à considérer les réseaux de neurones). Le mathématicien maîtrise des outils polyvalents (la théorie des probabilités ou celle des systèmes dynamiques par exemple) qu'il utilise pour concevoir des modèles très abstraits et généraux qu'une spécification appropriée situera dans le cadre d'une théorie de systèmes cognitifs de telle ou telle sorte. Tous deux développent au coude à coude une *physique mathématique de la cognition*. Ils sont bien évidemment associés dans cette entreprise à des spécialistes de l'"esprit/cerveau".

En matière de cognition, l'approche la plus directe et en même temps la plus ancienne (Descartes lui consacra un traité entier) consiste à tenter de déterminer ce qui se passe dans l'encéphale lorsque l'esprit se livre à telle ou telle activité, et inversement. Les neurosciences, dont c'est précisément le programme, ont toutefois été contraintes d'introduire nombre de médiations dans sa réalisation, en raison de l'opacité du cerveau, à la fois terriblement complexe et difficilement accessible. Les nouvelles techniques d'imagerie, en commençant à surmonter le second obstacle, permettent pour

la première fois d'aller voir dans le cerveau, d'observer le détail des processus dont il est le siège. Leur mise en œuvre conjointe avec d'autres approches, qui n'en est qu'à ses débuts, ouvre des perspectives considérables.

La "vision" qu'autorisent ces diverses techniques est toutefois rien moins que directe. Elle résulte de mesures d'activité en différents points d'un "champ récepteur", la nature de l'activité dépendant de la technique considérée. Le problème est de déterminer, à partir de ces mesures, le processus cérébral qui lui a donné naissance. C'est à peu près à quoi serait confronté celui qui, disposant d'une carte de l'activité du cortex visuel d'un sujet, voudrait en déduire ce que voit le sujet. Il faut donc avant tout élaborer un modèle de la région cérébrale concernée vue comme système physique, électrique ou magnétique par exemple. Ce modèle est nécessairement imparfait et conjectural. Mais le cœur de la difficulté est que le problème est "mal posé", au sens technique du terme : il n'admet pas de solution unique – différentes structures cérébrales (corticales et profondes) donnent lieu aux mêmes "effets de surface".

L'imagerie cérébrale se partage aujourd'hui en deux branches principales. La première regroupe les techniques d'EEG et de MEG, la seconde l'IRM et le TEP. L'EEG et le MEG permettent d'étudier très finement l'organisation temporelle du fonctionnement cérébral, alors que l'IRM et le TEP permettent de localiser spatialement les variations métaboliques auxquelles il donne lieu. L'avenir de ces approches réside en fait dans la fusion des données issues de ces différentes techniques.

Un autre type de modélisation prend pour point de départ le

neurone comme système élémentaire de traitement de l'information. Les unités fonctionnelles du cerveau peuvent alors être modélisées comme des populations de tels neurones schématisés, reliés par des connexions transmettant, en la modulant, une information quantitative. Cette approche, qui date d'un demi-siècle mais connaît depuis une dizaine d'années un immense succès, est souvent connue sous le terme de "connexionnisme" (un label toutefois récusé par certains) ; mais elle mérite le nom, de création récente, de "neurocalcul", en ce qu'elle fait droit à la fois à la conception informationnelle de l'esprit (c'est le terme "calcul" qui y renvoie) et au principe fondamental de l'organisation cérébrale.

Différentes écoles se sont constituées par développement de ce principe simple. Parmi les choix par lesquels elles se différencient, deux doivent être soulignés ici. On peut d'abord donner la priorité à la réalité informationnelle ou psychologique des unités du modèle, qui prend alors place dans une psychologie théorique jumelée à une nouvelle branche de l'intelligence artificielle fondée sur le parallélisme. On peut au contraire tenir pour essentielle et première la réalité biologique des unités : les neurones "formels" sont alors vus comme des modèles, au sens habituel de la physique, des neurones "réels" ; et leur degré de *réalisme* est non une question de principe – la question étant ici entendue – mais une affaire de méthodologie et d'avancement des connaissances. On se donne alors pour ambition de contribuer à une neurobiologie théorique. Un second choix, conditionné par le premier, précise cette ambition. Si l'on concentre son attention sur les propriétés fines de struc-

tures particulières, on nourrit la branche descriptive de cette neurobiologie ; si on la fait porter sur les propriétés émergentes générales de types de structures, on jette les bases d'une neurobiologie mathématique (ou mathématisée). Les quatre articles consacrés aux réseaux de neurones tendent à se ranger dans ce dernier cadre.

Les articles consacrés à la perception de la parole et aux théories de l'apprentissage illustrent une position médiane entre psychologie générale et neurobiologie. La mathématisation s'applique, dans ce genre de recherches, à un niveau d'abstraction et dans des types de situations tels qu'il n'est pas nécessaire de formuler d'entrée de jeu des hypothèses sur le degré de réalité biologique ou psychologique des constituants du modèle. Il se trouve néanmoins que les recherches sur la parole qui sont rapportées ici s'articulent naturellement avec une approche "neurocalcul" à fort contenu physique et biologique, alors que les théories de l'apprentissage se singularisent dans ce chapitre par leur parenté avec certaines recherches en psychologie, en informatique théorique et en intelligence artificielle.

Le potentiel d'application des méthodes physico-mathématiques à l'étude des phénomènes cognitifs et cérébraux est considérable. Si les recherches présentées ici comptent parmi les plus prometteuses actuellement, elles ne sont pas les seules, et s'insèrent dans un répertoire qui ne cesse de s'enrichir.

■ Daniel Andler, professeur à l'Université Lille III.

■ Robert Azencott, professeur à l'Université Paris-Sud et à l'École normale supérieure.

■ Bernard Renaud, directeur de recherche au CNRS.

LA CARTOGRAPHIE DES FONCTIONS COGNITIVES

L'imagerie rapide du débit sanguin cérébral par tomographie d'émission de positons permet de mettre en évidence les réseaux de neurones impliqués dans l'exécution de certaines fonctions cognitives chez l'homme.

Bernard Mazoyer

L'exécution de fonctions par le cerveau requiert une surconsommation d'énergie qui est compensée par une élévation du débit sanguin cérébral dans les différentes régions mises en jeu.

Pour mesurer le débit sanguin cérébral régional chez l'homme en tomographie d'émission de positons (TEP), on utilise une molécule radioactive injectée par voie intraveineuse qui suit le débit sanguin cérébral : l'eau marquée à l'oxygène-15. Cette molécule est transportée dans les régions cérébrales d'autant plus rapide-

ment que le débit sanguin local est élevé. L'oxygène-15 incorporé dans la molécule d'eau est un émetteur de positon, dont la propriété est de s'annihiler spontanément avec un électron du milieu pour donner naissance à deux photons antiparallèles de haute énergie (511 keV). Ces couples de

Paradigme d'activation cérébrale en TEP

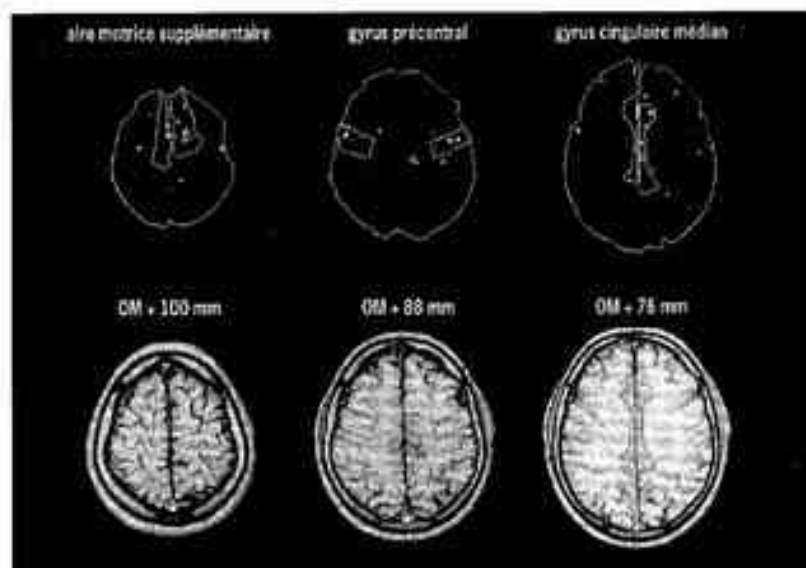
Cette méthode de mesure du débit sanguin cérébral est rapide (une minute) et peut être répétée tous les quarts d'heure du fait de la courte demi-vie (123 secondes) de l'oxygène-15. Il devient alors possible

COGNITIVE FUNCTION MAPPING - The principles of a quick technique for cerebral blood flow imaging using positron emission tomography and bolus injection of oxygen-15 labelled water are presented. The relevance of this method for cognitive function mapping in man is illustrated through a study of the brain structures involved during the execution of saccadic eye movements.

tion obtenues par imagerie par résonance magnétique (IRM). La figure montre un exemple des résultats obtenus au cours d'un protocole de ce type où, après une première cartographie effectuée au cours d'une condition de repos, il est demandé au sujet d'effectuer des saccades oculaires horizontales durant la deuxième cartographie. Aux images TEP obtenues au cours de cette tâche sont soustraites les images obtenues au cours du repos. Leur analyse statistique et leur comparaison aux images anatomiques va permettre de mettre en évidence les structures cérébrales impliquées dans la programmation et la réalisation de ces mouvements des yeux.

Détection et localisation des activations

Du fait de la sensibilité limitée des actuelles caméras TEP, la mise en évidence de ces structures nécessite de moyenner les cartes d'activation de plusieurs sujets. Ce problème peut être résolu en appliquant aux images TEP une transformation dite "proportionnelle" qui amène les cerveaux des différents sujets dans un même référentiel et aux mêmes dimensions. Les points de valeur maximale de cette carte d'activation moyenne sont alors détectés et localisés par référence à l'atlas de Talairach. Une autre approche, illustrée sur la figure, consiste à définir a priori et pour chaque individu des régions anatomiques sur ses images d'IRM et à calculer l'activation moyenne dans ces régions. Ces deux approches restent limitées par la variabilité anatomo-fonctionnelle cérébrale interindividuelle. La mise au point d'une caméra TEP à haute sensibilité devrait ouvrir la voie à des études d'activation réalisables chez un seul sujet.



En haut : images d'activation obtenues à trois niveaux de coupe du cerveau d'un sujet effectuant des mouvements horizontaux des yeux dans le noir. L'échelle de couleur donne la variation en % du débit sanguin cérébral.

En bas : images anatomiques aux mêmes niveaux, obtenues par résonance magnétique, permettant de localiser précisément les régions activées, ici les gyrus précentraux, l'aire motrice supplémentaire et le gyrus cingulaire. (Collaboration Groupe d'analyse neurofonctionnelle, CEA/DRFP-SHF, Orsay et Laboratoire de physiologie neurosensorielle, CNRS, Paris).

ment que le débit sanguin local est élevé. L'oxygène-15 incorporé dans la molécule d'eau est un émetteur de positon, dont la propriété est de s'annihiler spontanément avec un électron du milieu pour donner naissance à deux photons antiparallèles de haute énergie (511 keV). Ces couples de

de comparer statistiquement chez la même personne les images de débit sanguin cérébral obtenues dans des états mentaux différents. La localisation anatomique des régions activées est effectuée par superposition des images de débit et d'images anatomiques du cerveau de haute résolu-

Bernard Mazoyer, professeur à l'Université Paris VII, Service Hospitalier Frédéric Joliot, CEA, Orsay, et Hôpital Robert Debré, 48, boulevard Sérurier, 75019 Paris.

LA MESURE DE LA PERFUSION CÉRÉBRALE PAR IRM

Des agents magnétiques injectables permettent d'étudier la perfusion cérébrale en utilisant l'imagerie par résonance magnétique.

Anne Leroy-Willig

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) est utilisée essentiellement pour l'information anatomique, puisqu'elle permet la délimitation précise des lésions à partir de coupes d'orientation multiples. Dans le domaine fonctionnel, ses apports sont récents et plus limités, mais font l'objet de nombreux travaux.

Disposer d'une technique de quantification de la perfusion tissulaire par détection externe, sans manipulation de traceur radioactif, avec une résolution spatiale et temporelle élevée, constitue un enjeu considérable pour explorer le fonctionnement du cerveau sain ou malade. Mais, à

On peut utiliser comme marqueurs du secteur sanguin, des molécules portant des noyaux non présents dans l'organisme (eau deutérée H_2O , substitués fluorés du sang) puisque ^2H et ^{19}F sont détectables par RMN, avec une sensibilité plus faible que ^1H . Les performances obtenues sont comparables à celles de l'imagerie nucléaire conventionnelle (SPECT), mais nécessitent des champs magnétiques très élevés.

Visualiser les vaisseaux

Une approche différente consiste à injecter dans le sang une solution d'un ion paramagnétique, lié à une molécule porteuse, et à utiliser les modifications du signal des protons qui en résultent. La

MRI BRAIN PERFUSION MEASUREMENT - MRI, currently used for lesion detection and anatomical description, is also a source of functional information. It is possible to evaluate tissue perfusion via signal modifications induced around blood vessels when a magnetic contrast agent is concentrated inside the capillaries. Blood flow maps with high spatial and temporal resolution are thus made available.

relaxation de l'aimantation des protons est rendue beaucoup plus rapide par les fluctuations du champ magnétique local au voisinage des ions paramagnétiques. Pendant que cet agent de contraste est présent dans le secteur vasculaire, il permet un rehaussement du signal sanguin, qui peut être utilisé pour visualiser les vaisseaux (angiographie), ou pour mesurer le volume sanguin.

Dans des conditions de mesure différentes, un second phénomène magnétique peut être détecté : chaque capillaire sanguin contenant une concentration élevée d'agent paramagnétique, présente une susceptibilité magnétique plus élevée que celle du tissu qui l'entoure, et se comporte comme une minuscule baguette aimantée qui détruit l'homogénéité du champ magnétique des zones voisines. La diminution de signal qui en résulte peut atteindre jusqu'à 50 % dans un tissu contenant 5 % de sang capillaire. Ce phénomène d'amplification permet de détecter le passage d'un embol du traceur paramagnétique dans les capillaires immédiatement après l'injection du traceur (Fig. 1). Il faut pour cela réaliser une série d'images enchaînées très rapidement, typiquement toutes les secondes (Fig. 2). Si la relation entre diminution de signal et concentration locale du traceur est connue avec précision, l'analyse de la courbe de variation du signal en chaque point de l'image permet de mesurer la perfusion locale. Cette technique a permis à J. Belliveau de détecter l'augmentation de la perfusion cérébrale dans le cortex visuel pendant une stimulation lumineuse, ouvrant la voie à des études fonctionnelles cérébrales alliées à une anatomie en haute résolution.

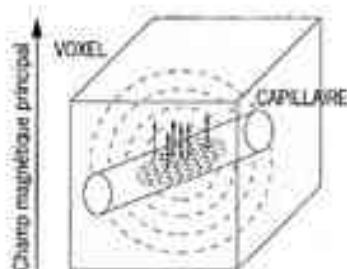


Fig. 1 - Les moments magnétiques de l'agent paramagnétique, fortement concentré dans les vaisseaux sanguins quelques secondes après l'injection, perturbent l'homogénéité du champ magnétique autour du capillaire sanguin. Le signal d'un volume élémentaire - ou voxel - contenant ce capillaire est diminué pendant le passage du traceur qui ensuite se dilue dans l'espace extravasculaire.

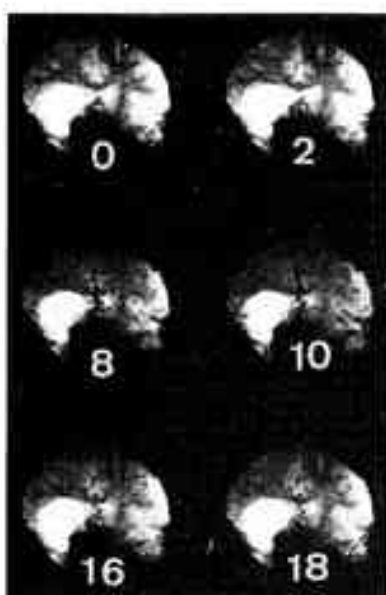


Fig. 2 - Variation de signal pendant le passage du bolus d'agent paramagnétique. Des images en coupe coronale du cerveau d'un patient porteur d'une tumeur cérébrale sont acquises avant et pendant le passage d'un bolus de Gadolinium-DTPA. Le temps d'acquisition est de 50 ms par image, les images sont acquises toutes les secondes. La diminution de signal pendant le passage du traceur est bien visible sur les images acquises à 8 secondes et 10 secondes après l'injection. Cette diminution est plus importante dans le cortex cérébral qui est mieux perfusé que les régions profondes du cerveau. La tumeur est peu perfusée. (F. D. Le Bihan, National Institute of Health, Bethesda).

cause de la faiblesse des énergies mises en jeu, l'IRM est beaucoup moins sensible que les techniques nucléaires. L'IRM mesure l'aimantation des noyaux d'hydrogène contenus dans chaque volume élémentaire, aimantation modulée par les caractéristiques physico-chimiques des molécules portant ces noyaux. Typiquement, on peut détecter quelques millimètres cubes d'eau en quelques secondes. Cependant, le sang présent dans les capillaires ne constitue que 2 à 5 % du volume total d'un organe, et son signal est difficile à séparer de celui des autres constituants.

Anne Leroy-Willig, médecin, ingénieur au CEA, Centre hospitalier Frédéric Joliot, Place du Maréchal Leclerc, 91406 Orsay Cedex.

ACTIVITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE CÉRÉBRALE ET PROCESSUS COGNITIFS

L'enregistrement de l'activité électrique ou magnétique cérébrale permet de suivre, milliseconde par milliseconde, certaines opérations cognitives élémentaires.

Bernard Renault,
Marie-Hélène Giard

L'analyse des fonctions cérébrales supérieures chez l'homme a bénéficié récemment de développements spectaculaires grâce en particulier aux techniques d'imagerie fonctionnelle cérébrale (TEP et plus récemment IRM, voir les articles de B. Mazoyer et A. Leroy-Willig). Ces nouvelles méthodes permettent de localiser très finement les variations du métabolisme cérébral, mais ne permettent cependant pas de suivre

avec une grande précision l'évolution de ces variations au cours du temps. En fait, seul l'enregistrement de l'activité électrique ou magnétique cérébrale peut permettre une imagerie dynamique toutes les millisecondes de l'activité des populations neuronales sous-jacentes, et donc de décrire très précisément l'organisation temporelle de cette activité associée à des processus cognitifs. En revanche, la localisation des générateurs impliqués n'est pas observable directement et doit faire appel à une modélisation fine du cerveau, de ses différentes enveloppes et de la propagation du champ électromagnétique

ELECTROMAGNETIC BRAIN ACTIVITY AND COGNITIVE PROCESSES - Due to their very high time resolution (milliseconds), event-related responses are, at present, one of the best available non invasive measurements of functional brain activity during cognitive tasks of short duration. EEG or MEG recordings reveal important information about the temporal and spatial patterning of the neuronal population engaged in the various processes involved.

dans ces différents milieux (voir l'article de J. Pernier, F. Perrin et O. Bertrand).

L'électroencéphalogramme (EEG) ou le magnétoencéphalogramme (MEG) sont des signaux dont la fréquence varie entre zéro et quelques centaines de hertz. Ces

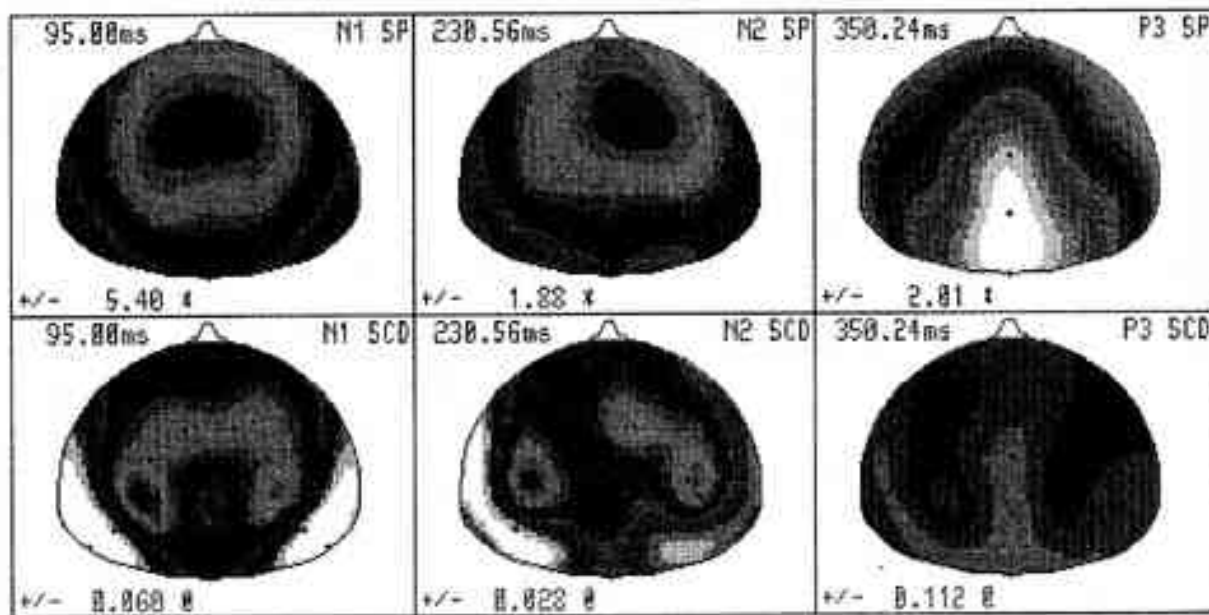


Fig. 1 - Cartographie du champ de potentiel (en haut) et de la densité de courant radial (en bas) obtenus à 95, 230 et 350 ms après la présentation d'un stimulus auditif rare dans un environnement sonore homogène. La comparaison de ces deux types de cartes permet de mettre en évidence plusieurs systèmes de générateurs, actifs simultanément et/ou successivement, dans des aires cérébrales distinctes : 1) Au moment du pic de l'onde N1 (95 ms), on note un complexe puits-source (trouge-jet) de courant en position supra-temporale et un puits au niveau frontal, dans chaque hémisphère. Ces deux types d'activité traduisent la mise en jeu simultanée, au niveau du cortex auditif et au niveau du cortex frontal, d'ensembles neuronaux qui refléteraient respectivement le codage des caractéristiques physiques du stimulus et la direction de son occurrence. 2) A 230 ms (onde N2), deux générateurs supra-temporaux sont actifs (droite et gauche), mais seul un générateur frontal droit est visible. L'activité temporelle est interprétée comme une trace neuronale de la mémoire sensorielle auditive; l'activité frontale refléterait un processus pré-attentif d'orientation, précédant la mise en jeu de l'attention consciente. 3) A 350 ms, l'onde P3 signe la fin des processus d'évaluation sensorielle du stimulus; l'absence d'activité dans la carte de courant indique que les ensembles neuronaux responsables de l'électrogénèse de cette composante seraient profonds. NO U 280 INSERM.

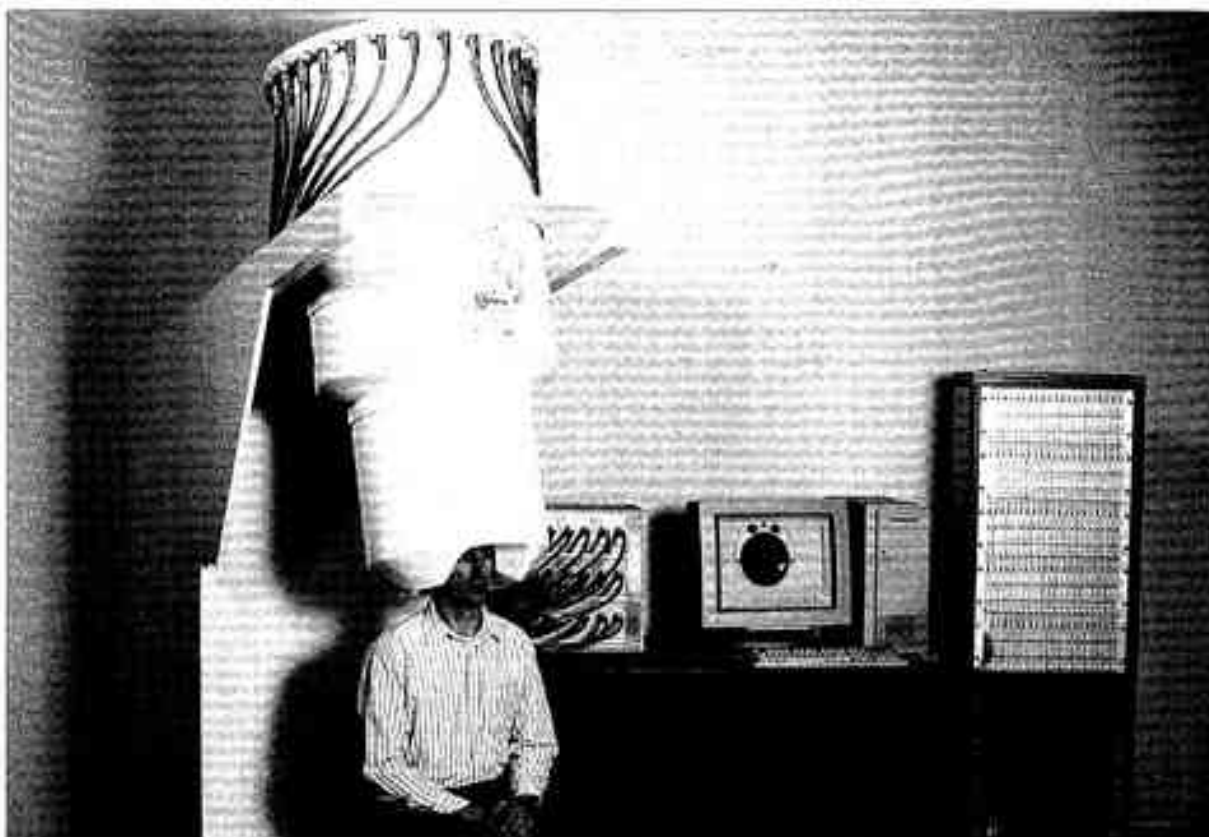


Fig. 2 - Les appareils modernes de magnétoencéphalographie (le système CTF canadien) enregistrent l'activité cérébrale sur la totalité du scalp, ce qui est un progrès considérable. Ils peuvent de plus être couplés avec un électroencéphalographie et une imagerie IRM. La fusion de ces trois types de données et une modélisation adéquate permettent de positionner les générateurs actifs (quelle que soit leur orientation) sur une image anatomique précise.

signaux sont recueillis puis échantillonnés par un convertisseur analogique numérique, par exemple toutes les millisecondes si cela est nécessaire. Les variations de l'EEG et du MEG peuvent être "spontanées" ou déterminées par une stimulation, c'est-à-dire "évoquées". Les réponses évoquées sont en général peu visibles. Elles doivent être extraites par moyennage du signal EEG ou MEG, ce qui améliore le rapport signal sur bruit mais implique également qu'une même stimulation soit répétée plusieurs dizaines de fois (ou même plusieurs centaines de fois). Actuellement on distingue les réponses "exogènes", qui dépendent principalement des attributs physiques de la stimulation, et les réponses "endogènes" qui dépendent d'opérations cognitives. Ces deux types de réponses coexistent après une même stimulation; leur réactivité aux variables indépendantes manipulées par l'expérimentateur (variations de latence, de durée, d'amplitude et de localisation sur le scalp) permet de mieux caractériser certains processus dont la durée varie entre quelques millisecondes et quelques secondes.

L'apport de la psychologie expérimentale et cognitive

Ce domaine de recherche a littéralement "exploré" ces dix dernières années sous l'impulsion de psychophysiciens formés aux méthodes et aux problématiques de la psychologie expérimentale et cognitive. En enregistrant conjointement le comportement (temps de réaction et taux d'erreur par exemple) et les réponses évoquées (EEG ou MEG), différentes équipes ont en effet montré qu'une chronométrie fine des opérations mentales, pendant l'intervalle stimulus-réponse, est possible, que la modulation de ces opérations par les processus énergétiques et en particulier attentionnels est enregistrable dans différentes aires cérébrales, et enfin que les réponses évoquées sont des indicateurs mais aussi des révélateurs de comportements non-conscients (mise en évidence, par exemple, de la reconnaissance non consciente des visages chez des malades présentant une agnosie des visages; prosopagnosie).

Les principales recherches actuelles portent sur l'organisation relative des dif-

férentes étapes du traitement perceptivo-moteur, l'attention passive et contrôlée, le langage, la mémoire, l'activation et l'inhibition des représentations perceptives. Ces recherches sont effectuées chez l'homme sain ou malade, au cours de l'ontogenèse et du vieillissement. Leur but est de définir clairement l'organisation dynamique, spatiale et temporelle, des ensembles neuronaux qui sous-tendent des opérations cognitives élémentaires. Pour ce faire, la fusion des données EEG, MEG, IRM et TEP est une démarche absolument nécessaire, encore trop peu exploitée en France.

■ Bernard Renault, directeur de recherche au CNRS, directeur de l'Unité de recherche en psychophysologie cognitive, psychopathologie psychiatrique et neurologique (URA 654 CNRS), Hôpital de la Salpêtrière, 47, boulevard de l'Hôpital, 75651 Paris Cedex 13.

■ Marie-Hélène Giard, chargée de recherche à l'INSERM, Laboratoire de recherche sur les signaux et processus cérébraux (Unité 289 INSERM), 151, cours Albert Thomas, 69624 Lyon Cedex 03.

IDENTIFICATION DES GÉNÉRATEURS DE L'ACTIVITÉ ÉLECTRIQUE CÉRÉBRALE

L'enregistrement au niveau du scalp de l'activité électrique et magnétique cérébrale liée à des événements permet de localiser les zones cérébrales activées et de suivre le déroulement temporel de cette activité.

Jacques Pernier,
François Perrin,
Olivier Bertrand

Les processus cérébraux tels que la sensation, la perception de stimuli sensoriels, ou d'autres processus plus complexes comme l'attention, la reconnaissance d'objet, l'imagerie mentale mettent en jeu plusieurs zones cérébrales. Cette activation se manifeste par

une activité électrique au niveau membranaire dans les populations de neurones concernées. Les courants ioniques circulant dans les tissus nerveux sont classiquement décomposés en courants primaires I_p intracellulaires et courants de conduction I_v dans les volumes conducteurs environnants. Ces courants de conduction donnent naissance à une distribution de champs électriques et de potentiels électriques dans les volumes conducteurs environnants (cerveau, liquide céphalo-rachidien, crâne et scalp). Cette distribution dépend de la nature des courants

primaires, de la géométrie et des conductivités électriques des volumes conducteurs. Ces mêmes courants, principalement les courants primaires, donnent naissance également à un champ magnétique.

Cartographie de potentiels évoqués

Afin d'étudier l'activité électrique des populations neuronales liée à l'occurrence d'événements mentaux, la première étape consiste à représenter l'évolution temporelle et spatiale des potentiels électriques recueillis à la surface de la tête. Ces potentiels sont enregistrés au moyen d'électrodes placées sur le scalp (16 à 32 électrodes). A chaque instant, il est possible d'estimer et de représenter la distribution du potentiel grâce à des méthodes de projection et d'interpolation. Par exemple, les électrodes peuvent être placées sur une sphère censée représenter la géométrie du scalp, en utilisant une stratégie normalisée appelée "système 10-20". Les valeurs des potentiels en chaque point du scalp peuvent être estimées en utilisant des méthodes d'interpolation (splines sphériques), et la visualisation des résultats peut être obtenue par une projection radiale des points de la sphère sur un plan. Il est possible également d'estimer et de représenter la distribution d'une autre grandeur électrique : la densité radiale de courant sur le scalp (DCS). Cette grandeur est obtenue en calculant le laplacien (somme des dérivées secondes du potentiel par rapport aux deux coordonnées curvilignes de la surface) à deux dimensions de la distribution de potentiel. Cette technique offre plusieurs avantages :

- la distribution des puits et des sources de courant est moins dispersée au voisinage des zones cérébrales actives que la distribution des potentiels électriques,
- cette distribution ne dépend plus du choix de l'électrode de référence et elle se manifeste par un effet prépondérant des générateurs proches de la surface (aires corticales).

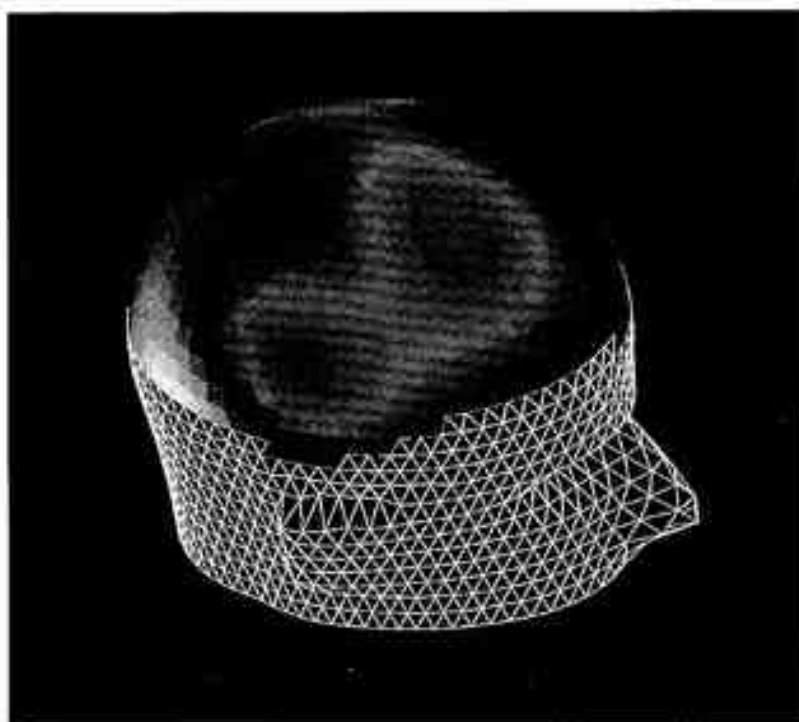


Fig. 1 - Distribution sur le scalp de la densité radiale de courant apparaissant 270 ms après la présentation d'un stimulus rare délivré dans une suite de stimuli homogènes. La tache jaune délimite la zone où le courant émerge du cerveau pour circuler dans le scalp (source). Les taches rouges délimitent les zones où les lignes de courant retournent vers le cerveau avec une trajectoire perpendiculaire au scalp (puits). On observe l'activation simultanée de deux générateurs électriques intracérébraux : l'un en position temporo-pariétale d'orientation parallèle au scalp (complexe puits-source), l'autre en position frontale d'orientation perpendiculaire au scalp (puits seul).

Localisation des générateurs intra-cérébraux

L'inspection visuelle des cartes de potentiel et de densité radiale de courant fournit une première indication sur l'emplacement approximatif des généra-

BRAIN ELECTRICAL ACTIVITY GENERATOR IDENTIFICATION - Electrical brain activity related to cognitive tasks produces electrical potential, current density and magnetic fields on the scalp surface. These temporally varying fields can be displayed using mapping techniques. Mathematical models are used to determine the position of electric sources. The identification of the brain areas involved in the generation of these signals are obtained by matching modelling results with anatomical images.

teurs électriques intra-cérébraux et le déroulement temporel de leur activité. Une localisation plus précise fait appel à des modèles physico-mathématiques du milieu et des générateurs. Le modèle le plus simple et le plus utilisé consiste à assimiler les courants primaires à des dipôles de courant et à représenter la tête sous forme d'une sphère multicouche inhomogène. La sphère interne représente le cerveau, les couches concentriques de conductivités différentes représentent le crâne et le scalp. Le problème direct qui consiste à calculer la distribution du potentiel sur la surface de la sphère externe créée par un ensemble de dipôles, possède une solution analytique. L'identification des zones cérébrales actives consiste à minimiser la différence entre les distributions de potentiels observées et celles calculées par le modèle (problème inverse). Un autre modèle de générateur, plus récent, consiste à rechercher la distribution spatiale des courants primaires qui, tout en rendant compte des mesures, possède la plus petite norme parmi les distributions de carré sommable définies dans un certain volume ou sur une surface (méthode de la norme minimale). Afin de tenir compte de la géométrie de la tête, il est possible de faire appel à des modèles réalistes. Pour résoudre le problème direct, il est alors nécessaire d'utiliser des méthodes numériques (méthodes par éléments finis ou méthodes par éléments de surface). Toutes ces techniques de modélisation

peuvent s'appliquer aussi bien aux données recueillies par des enregistrements électriques (potentiels évoqués, électroencéphalographie) qu'aux données recueillies en magnétoencéphalographie.

Utiliser simultanément les données électriques et magnétiques

Le champ magnétique créé par la distribution de courant ionique dans les tissus peut être enregistré à l'aide d'un neuromagnétomètre comportant un ensemble de SQUID (capteurs à base de matériaux supraconducteurs appelés SQUID) - jusqu'à 122 - placés au voisinage du scalp. Ce dispositif enregistre soit la composante radiale du champ magnétique, soit le gradient de cette composante suivant deux directions orthogonales. Contrairement aux potentiels électriques, ce champ est moins influencé

tête. De plus, la valeur du champ magnétique créé par un dipôle situé dans un milieu conducteur à symétrie sphérique utilisé comme modèle, ne dépend que du courant primaire. Cette caractéristique permet un modèle sphérique appliqué sur des données magnétiques, d'être plus simple et plus précis. Cette simplicité n'existe plus si l'on utilise des modèles réalistes qui nécessitent le calcul des potentiels électriques aux interfaces tissulaires (intervention de courants appelés "secondaires"). D'autre part, le champ magnétique décroît très vite avec la distance, créant un manque de sensibilité des capteurs vis-à-vis des générateurs profonds. Enfin, le champ magnétique radial est insensible à la composante radiale des dipôles de courant. Les avantages des deux techniques d'enregistrement peuvent être utilisés grâce au couplage des données électriques et magnétiques dans les procédures de modélisation.

Fusion de données avec l'imagerie anatomique

Lorsqu'on souhaite identifier les structures anatomiques cérébrales où sont localisés les générateurs électriques, il est souhaitable d'effectuer une fusion des données obtenues par la modélisation et des images RMN de la tête du sujet enregistré. Le problème consiste à recalculer la géométrie du modèle utilisé avec celle de la tête réelle. Dans ce domaine, plusieurs solutions sont également utilisées suivant que l'on utilise un modèle à géométrie sphérique ou réaliste. Finalement les distributions de courants primaires sont représentées graphiquement en superposition avec les images cérébrales anatomiques. Dans certains cas, il est alors possible de vérifier si les zones cérébrales activées sont identiques à celles révélées par la tomographie par émission de positons et obtenues grâce à des protocoles faisant intervenir les mêmes tâches cognitives.

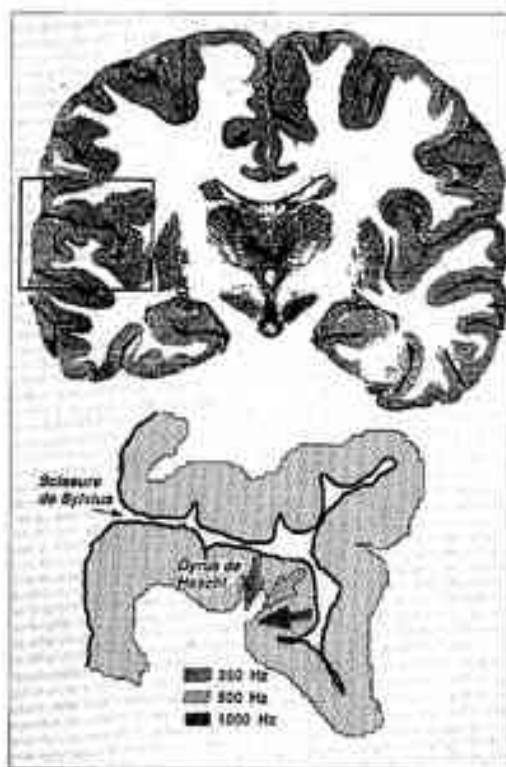


Fig. 2 - Modification des générateurs donnant naissance à la réponse électrique évoquée par des stimuli auditifs de hauteurs tonales différentes. Les générateurs dipolaires équivalents ont leur orientation qui varie significativement avec la hauteur tonale. Ce changement d'orientation peut être expliqué par la géométrie du cortex auditif dans la région syllabique.

par les inhomogénéités de conductivités des tissus. Cette propriété se manifeste par un étallement moins important des extrémités du champ sur la surface de la

Jacques Pernier, directeur de recherche à l'INSERM, directeur du Laboratoire de recherche sur les signaux et processus cérébraux (Unité 280 INSERM).
François Perrin, directeur de recherche à l'INSERM, Laboratoire de recherche sur les signaux et processus cérébraux (Unité 280 INSERM).
Olivier Bertrand, chargé de recherche à l'INSERM, Laboratoire de recherche sur les signaux et processus cérébraux (Unité 280 INSERM), 151, cours Albert Thomas, 69624 Lyon Cedex 03.

MODÈLES MORPHODYNAMIQUES DE CATÉGORISATION PHONÉTIQUE

Pour comprendre les rapports entre le signal acoustique, physique, et le code phonologique, symbolique, il faut disposer de modèles morphodynamiques des niveaux cognitifs intermédiaires.

Jean Petitot

L'un des problèmes les plus délicats des sciences cognitives actuelles est de passer du signal au code, c'est-à-dire d'articuler les algorithmes d'analyse sensorielle des signaux physiques, qui sont de bas niveau, avec les représentations symboliques effectuant les traitements de haut niveau de l'information. C'est, entre autres, le cas pour la compréhension des processus de traitement phonétique.

Comme dans de nombreux autres domaines cognitifs, il faut en particulier arriver à concilier deux types différents de conception du traitement de l'information : les conceptions ascendantes (*bottom-up*, du périphérique vers le central) et les conceptions descendantes (*top-down*, du central vers le périphérique).

Il semble difficile d'articuler ces deux conceptions si l'on ne dispose pas de niveaux intermédiaires de nature morphologique entre les transductions et les niveaux de traitement symboliques. D'où l'intérêt des modèles morphodynamiques, autrement dit des modèles dynamiques de structuration morphologique.

Formants, fonction de transfert et catégorisations

En ce qui concerne les modèles de production de la parole, on connaît assez bien, des travaux de G. Fant jusqu'à ceux de S. Maeda et R. Carré, la façon (non triviale) dont les paramètres articulatoires contrôlent la structure formantique du spectre continu qui module le spectre harmonique produit par les cordes vocales. Les formants – qui sont les bandes de fréquence résonantes où s'accumule l'énergie – sont en effet dérivables des pôles de la fonction de transfert $H(s)$ du tractus vocal ($s = \sigma + i\omega$) est une fréquence complexe, $\omega / 2\pi$ étant une fréquence et σ un facteur d'amortissement). Mais les coefficients C de $H(s)$ dépendent de façon analytique non triviale des paramètres articulatoires W .

Comme l'a montré K. Stevens, le phénomène phonétique fondamental de catégorisation – qui fait passer de flux

physiques continus à des unités symboliques discrètes – se fonde sur cette base physique. Il procède du fait que le contrôle articulatoire des spectres est non linéaire et qu'il existe des domaines où de petites variations du contrôle produisent de fortes variations des propriétés spectrales.

D'où l'idée que la catégorisation de l'espace des paramètres articulatoires W est l'analogue d'un diagramme de phases K – ce que l'on appelle en théorie des singularités une stratification – et que les phénomènes dits de perception catégorielle (qui attestent la réalité psychologique des processus de catégorisation) reposent sur des phénomènes critiques de type transitions de phases. La stratification K de W est un système de frontières, de seuils, de discontinuités qualitatives, qui partitionne W en domaines dont les régions centrales sont identifiables à des prototypes phonétiques. Cette idée conduit à utiliser, comme modèles mathématiques privilégiés pour les processus de catégorisation, des modèles morphodynamiques de bifurcation de formants sous l'action de paramètres de contrôle.

En fait, pour que cette idée soit valide, il faut qu'il existe une transformation auditive qui fasse passer du quantitatif au qualitatif, c'est-à-dire qui permette de transformer les phénomènes de non linéarité en de véritables phénomènes critiques, par exemple en transformant l'écart quantitatif "deux formants suffisamment proches" / "deux formants suffisamment séparés" en l'opposition qualitative "un formant" / "deux formants". Les expériences sur les "centres de gravité" formantiques ont montré que tel est bien le cas (cf. les travaux du groupe de Chistovich à Leningrad ainsi que ceux de l'ICP de Grenoble). Selon les résultats expérimentaux de J.-L. Schwartz et de ses collègues, il existe, entre la représentation auditive sensorielle de bas niveau (le signal) et les représentations phonétiques cognitives de haut niveau régissant les processus d'interprétation, de reconnaissance, d'inférence et de décision (le code), une représentation morphologique intermédiaire résultant d'un mécanisme d'intégration large bande (ILB) (convolution de

MORPHODYNAMIC MODELS OF PHONETIC CATEGORIZATION - In order to mathematically understand categorization phenomena in phonetics, it is first necessary to understand how continuous variations of articulatory parameters and acoustic cues can produce qualitative discontinuities at perceptual level. Morphodynamic models of bifurcations can be used for this purpose.

la représentation auditive par un filtre gaussien).

Si l'on modélise alors les processus phonétiques de traitement de l'information issue de ce mécanisme ILB par des systèmes dynamiques implémentés dans des réseaux de neurones, les percepts phonétiques deviennent modélisés par des attracteurs de ces dynamiques, attracteurs contrôlés par les spectres continus. Les bifurcations des formants de ces derniers pilotent alors des bifurcations de ces attracteurs, ce qui permet d'expliquer les processus perceptifs de catégorisation.

Le problème inverse

Un tel schéma d'explication est valable pour les sons vocaliques stationnaires. Dans le cas d'un flux phonétique réel, de nombreux autres problèmes doivent être résolus. Citons en deux pour conclure.

1) La corrélation "dynamique articulatoire – flux acoustique – chaîne phonétique" est très difficile à analyser.
2) Le problème inverse de celui du contrôle articulatoire des spectres acoustiques n'est pas un problème bien posé. En effet, le contrôle articulatoire est exprimé par une application $\pi : W \rightarrow C$. Mais comme en général $\dim W > \dim C$, les fibres $\pi^{-1}(c)$ de cette application (images inverses des éléments c de C) sont de dimension ≥ 1 . Il existe donc une infinité continue de valeurs des paramètres W donnant la même valeur des paramètres C . Pour résoudre le problème inverse, il faut donc introduire des contraintes supplémentaires a priori. Celles-ci sont difficiles à définir.

Jean Petitot, directeur d'études à l'École des hautes études en sciences sociales, Centre de recherche en épistémologie appliquée (URA 1259 CNRS), Ecole polytechnique, 1, rue Descartes, 75005 Paris.

APPROCHES FORMELLES DE L'APPRENTISSAGE

L'approche formelle permet de spécifier de différentes manières le processus abstrait de l'apprentissage et de déterminer les limites de diverses stratégies.

Daniel Andler,
Stéphane Boucheron,
Eric Martin

L'apprentissage était considéré depuis longtemps comme un phénomène "cognitif" au sens le plus fort : placé au cœur de l'intelligence, il devait être étudié sous ses aspects "fonctionnels" et non exclusivement sous l'angle du "matériel". Il était l'enjeu de dialogues parfois tendus entre disciplines et entre doctrines (la "querelle", toujours recommencée, entre diverses formes d'innéisme et d'empirisme). Il mobilisait la recherche pure et se prêtait à de multiples applications. Pourtant, il suscitait davantage de méfiance que d'intérêt dans les sciences cognitives naissantes. Il était, pensait-on alors, tout à la fois second (dans l'ordre explicatif) et secondaire (en importance). D'ailleurs n'était-ce pas sur lui qu'avait tout mis l'école sur les ruines desquelles s'élevait la nouvelle approche ? Pour le behaviorisme en effet, tout était affaire d'apprentissage (de conditionnement, classique ou opérant).

Deux des plus remarquables capacités de l'intellect humain demandaient néanmoins explication : l'acquisition de la langue maternelle et l'acquisition des concepts. D'autant qu'aux interrogations traditionnelles des philosophes, logiciens et linguistes, s'ajoutait désormais la question du rôle de l'instruction, de l'éducation et plus généralement de l'environnement – rôle beaucoup moins déterminant, commençait-on à penser, qu'on ne l'avait cru. Ainsi se dégageait une problématique nouvelle : comment rendre compte de la capacité de tirer de l'environnement, dans une grande variété de situations, plus d'informations qu'il ne semble en contenir, en vue de constituer un corpus stable de connaissances ou de compétences qui ne se manifestent pas dans l'état initial ?

Les paradigmes de l'apprentissage

L'approche formelle, introduite par E. M. Gold en 1967 en vue de clarifier l'acquisition de la langue, permet de poser avec précision deux grandes questions : en quoi consiste l'apprentissage, et quelles sont les capacités et les incapacités d'un "apprenant" doté de propriétés logiques et computationnelles données ?

La première question appelle une large variété de réponses dont la plausibilité dépend du genre de phénomène auquel on songe. Chacune définit un paradigme d'apprentissage, et comporte une définition formelle de la chose à apprendre, de la manière dont elle se dévoile à l'apprenant, de la démarche de celui-ci et du critère de succès. Depuis 1984, on s'intéresse aussi avec L. Valiant à une version probabiliste du problème de la reconnaissance des formes. Dans les deux cas, on fait abstraction de l'implémentation pour ne s'intéresser qu'à la question logico-calculatoire.

Que l'on se place dans le cadre de la théorie des fonctions récursives (Gold) ou dans celui de la complexité algorithmique (Valiant), on cherche à apporter à la seconde des deux questions fondamentales, des réponses aussi informatives que possible : dans un paradigme donné, un apprenant se conformant à telle ou telle stratégie et doté de telle ou telle capacité calculatoire est-il ou non en mesure de s'acquiescer de chacune des tâches qu'il est susceptible de rencontrer, ou encore s'en tire-t-il mieux ou moins bien qu'un apprenant différemment doté ou guidé ?

Si chaque paradigme s'applique à une variété de situations, aucun ne semble actuellement suffisant pour les aborder toutes, si abstraitement soit-il. S'il s'agit, par exemple, d'apprendre à contrôler un

FORMAL APPROACHES TO LEARNING - Learning can be seen as a process in which some knowledge or competence is acquired on the basis of an initial logico-computational state and the exposure to environmental data. A formal specification leads to an abstract schema, a "paradigm", within which one can study how well various strategies fare. Different learning situations give rise to different paradigms, each of which requires its proprietary mathematical methods.

processus physique, il faut faire appel, nous est-il apparu, à des concepts nouveaux.

L'intérêt de ces travaux ne réside pas pour l'instant dans leurs applications à la pédagogie ou à l'apprentissage automatique, il est d'ordre conceptuel : des distinctions décisives apparaissent, entre modes d'apprentissage, entre dimensions du phénomène. Spécifier exhaustivement différents processus permet aussi d'en déterminer rigoureusement les limites. Cette contribution essentiellement critique rejaillit fructueusement sur le travail empirique des psychologues et sur la recherche de modèles en linguistique et dans d'autres branches des sciences cognitives.

Daniel Andler, professeur à l'Université Lille III, directeur-adjoint du Centre de recherche en épistémologie appliquée (URA 1259 CNRS), Ecole polytechnique, 1, rue Descartes, 75005 Paris.

Stéphane Boucheron, chargé de recherche au CNRS, Université de Paris-Sud, Laboratoire de recherche en informatique, Bât 490, 91405 Orsay Cedex.

Eric Martin, stagiaire de thèse à l'École nationale supérieure de l'armement, 16 bis, avenue Prieur de la Côte d'Or, 94114 Arcueil Cedex.

Exemple 1 : il s'agit d'apprendre une langue, modélisée par un ensemble récursivement énumérable E codant les phrases grammaticales de la langue. Les éléments de E défilent, avec répétitions et parasites éventuels. A chaque étape, l'apprenant émet une hypothèse sur la langue, c'est-à-dire le numéro de code d'un ordinateur énumérant E . Le processus de formation des hypothèses obéit à une série de contraintes exprimant des limitations psychologiques plausibles portant sur la mémoire (labile) de l'apprenant et sur sa préférence pour les hypothèses relativement simples. Réussir signifie ici se stabiliser sur une hypothèse correcte. Dans ces conditions (tendues parfaitement précises), la classe des langues apprenables est finie. Ce résultat exprime une forme forte d'innéisme – si l'on accepte ce paradigme, on doit conclure que le répertoire des langues humaines possibles est fini.

Exemple 2 : on veut apprendre un jeu de règles permettant de contrôler (par exemple) une voiture sur un circuit donné en sorte qu'elle évite les accidents. L'apprenant est exposé, à chaque étape, à l'ensemble des évolutions autorisées par le jeu de règles postulé à l'étape précédente. En examinant certaines de ces évolutions, il améliore le jeu de règles en vigueur. Réussir consiste ou bien à se stabiliser sur un jeu de règles satisfaisant, s'il en existe, ou bien à en produire toujours de meilleurs. On montre qu'alors il existe une classe de systèmes (voiture + circuit) qu'aucun jeu de règles apprenable ne peut contrôler tous, mais telle qu'une fois que l'apprenant a appris à contrôler le système n , il peut apprendre à contrôler le système $n+1$. Ce résultat donne corps à l'idée d'une progressivité de l'apprentissage, qui doit suivre une série d'étapes.

NEURONES FORMELS ET PHYSIQUE STATISTIQUE

La physique statistique offre un cadre privilégié pour l'étude des réseaux de neurones formels. Réseaux à attracteurs, propriétés génériques, nouveaux algorithmes : dix années de bonnes surprises.

Jean-Pierre Nadal

Dans un article célèbre paru il y a tout juste dix ans, le physicien J. J. Hopfield proposait un modèle de mémoire associative et, en fait, plus fondamentalement, la notion de "calcul par attracteur". Dans ce travail, Hopfield montre une analogie entre un groupe de neurones (formels, ceux de McCulloch et Pitts) fortement interconnectés, et un ensemble de moments magnétiques ("spins") en interaction. Dans ce cadre on peut comprendre le rappel associatif, tel qu'il se produit dans la mémoire humaine, comme la convergence d'un système dynamique vers un attracteur. L'analogie physique permet de transposer tout un savoir acquis en physique statistique, et ainsi de rendre compte de plusieurs aspects fondamentaux de cette forme originale de traitement de l'information : possibilité d'avoir un grand nombre d'attracteurs (donc d'objets de mémoires) superposés ; persistance des attracteurs malgré le bruit synaptique ; propriété d'"émergence", c'est-à-dire que l'existence des attracteurs résulte d'un phénomène collectif (nécessité d'avoir un grand nombre de neurones fortement interconnectés).

Une approche systématique

La physique statistique a précisément pour objet l'étude du passage d'un niveau "microscopique", avec un grand nombre d'éléments (si possible simples) en interaction, à un niveau "macroscopique" (celui du comportement collectif). Ceci justifie en grande partie l'intérêt des physiciens pour ce domaine de recherche. Un pas important fut franchi avec la solution analytique du modèle de Hopfield. Ceci a permis de comprendre en détail les performances du système, mais aussi d'analyser ses défauts. L'étude de variantes du modèle standard démontre la robustesse de ce type de mémoire par rapport à toutes sortes de perturbations, et la grande souplesse du modèle : il est facile de le modifier légèrement pour pallier tel ou tel défaut. Dans certaines variantes, l'analogie exacte avec un système physique est perdue : des méthodes spécifiques pour l'étude de la dynamique d'un réseau ont alors été développées – et celles-ci ont été

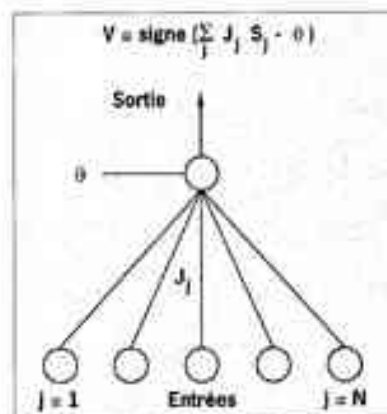
en retour utilisées pour l'étude de la dynamique de systèmes physiques.

Apprendre

Pour l'étude des réseaux, qu'ils soient à attracteurs ou en couches (comme ceux utilisés pour des applications à l'informatique), un point de vue tout différent a été introduit par la physicienne écossaise Elizabeth Gardner. L'objet d'étude n'est plus la dynamique d'un réseau donné, mais les potentialités d'apprentissage d'une architecture donnée : on regarde les propriétés typiques d'un réseau pris au hasard parmi tous ceux (de même architecture) réalisant une tâche donnée. Par cette méthode, on sait par exemple calculer la capacité de mémorisation d'un réseau à attracteur ou d'un perceptron (réseau en couches sans unités cachées). On sait également étudier l'effet statistique d'une détérioration des synapses, et ceci en particulier sur la façon dont le réseau catégorise. Ainsi on observe de façon générique un phénomène similaire à la prosopagnosie (reconnaissance de la catégorie mais pas des individus).

Généraliser

Cette technique permet également d'aborder le problème fondamental de la généralisation. Il s'agit de savoir si, après l'apprentissage d'un certain nombre



Le neurone formel, dans le cas le plus simple (pas de bruit synaptique), le neurone devient actif (la sortie V est 1) si la somme des entrées S_j , pondérées par les "efficacités" synaptiques J_j , dépasse un seuil θ .

FORMAL NEURONS AND STATISTICAL PHYSICS - Statistical physics provides new tools for the study of formal neural networks. Two approaches are particularly fruitful: performance analysis of specific attractor neural networks and general capabilities of typical neural networks. Moreover, these theoretical studies lead to the proposal of new learning algorithms.

d'exemples, le réseau donnera la bonne réponse pour une configuration présentée sur les entrées (et non apprises) : le réseau a-t-il "deviné" la règle cachée derrière les exemples ? C'est là un double succès de l'approche physique : d'une part, le formalisme se révèle parfaitement adapté à l'étude de la généralisation ; d'autre part, il a été possible d'étudier certaines architectures complexes (avec unités cachées). De plus, même pour une architecture aussi simple que celle du perceptron, des résultats non triviaux ont été obtenus. Par exemple, il est possible de voir si la bonne règle sera trouvée en apprenant un nombre fini d'exemples, ou au contraire si les performances du réseau ne feront que s'améliorer progressivement au fur et à mesure que de nouveaux exemples seront appris.

De nouvelles directions

Les approches théoriques ont conduit également à une réflexion sur les algorithmes, avec pour résultat l'invention de nouveaux algorithmes d'apprentissage, d'une part pour les réseaux à attracteurs et les perceptrons, mais aussi pour les réseaux à plusieurs couches. Ainsi on dispose maintenant d'algorithmes constructifs, pour beaucoup proposés par des physiciens – même si les algorithmes eux-mêmes n'ont rien à voir avec la physique. Ici, au lieu de spécifier l'architecture à l'avance, on va rajouter des unités une par une jusqu'à ce que le réseau donne la bonne solution. Plusieurs stratégies permettent de garantir la convergence en un temps fini. Ces résultats algorithmiques et les progrès de la théorie cités ci-dessus permettent d'aborder des applications réelles en informatique. Du côté de la biologie, le savoir-faire résultant des travaux systématiques sur le modèle de Hopfield est maintenant exploité dans l'étude de réseaux de neurones à plus grande plausibilité biologique, mais préservant la propriété fondamentale d'existence d'attracteurs associés aux formes apprises, avec un apprentissage par une règle hebbienne. Mais certains s'intéressent également à une modélisation plus spécifique prenant en compte la neuroanatomie (bulbe olfactif, hippocampe...).

Jean-Pierre Nadal, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de physique statistique (URA 1306 CNRS), Ecole normale supérieure, 24, rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 05.

MACHINES DE BOLTZMANN SYNCHRONES ET VISION ARTIFICIELLE

Les machines de Boltzmann synchrones sont des réseaux de neurones formels stochastiques bien adaptés aux calculateurs massivement parallèles.

Robert Azencott,
Jérôme Lacaille,
Laurent Younes

Dans sa version la plus simple, une machine de Boltzmann est un ensemble de processeurs binaires (neurones formels) à dynamique aléatoire et interactive. Chaque neurone communique avec une famille fixée (arbitraire) de neurones, appelés ses voisins. La mise à jour d'un neurone i commence par l'évaluation de l'activité moyenne V de ses voisins, par simple combinaison linéaire affectant à l'activité du neurone j le poids "synaptique" W_{ij} . Ensuite le neurone i choisit aléatoirement entre "activité" et "inactivité" avec une probabilité d'activité $F(V/T)$. Ici T est un paramètre positif (température) et F est une fonction "sigmoïde", proche de 0 pour V petit et de 1 pour V grand.

En dynamique synchrone, les mises à jour de tous les neurones sont effectuées simultanément. Après suffisamment d'itérations synchrones, l'équilibre stochastique (pratiquement atteint) associe à toute configuration globale x du réseau une probabilité $P(x)$, et une énergie $U(x) = -\log P(x)$ calculable explicitement. Les configurations les plus probables minimisent donc l'énergie U , et cela d'autant plus que la température T est plus basse. Cette remarque est à la base de la minimisation par recuit simulé, mais nous utilisons des dynamiques à température constante.

On partitionne les neurones en trois groupes E,S,H. Une fois l'entrée e codée sur E, on fixe les neurones E tout en laissant évoluer librement ceux de H et S. A l'équilibre stochastique, on lit sur S la sortie s . La boîte noire ainsi définie peut apprendre à émuler une application entrée-sortie donnée, grâce à une règle d'apprentissage synchrone. La modification d'un poids synaptique W_{ij} se calcule en comparant les fréquences d'activité consécutives des neurones i et j quand la sortie est libre et quand la sortie correcte est imposée.

Calculs locaux et synchronie rendent ces réseaux bien adaptés aux simulations sur calculateurs massivement parallèles et implémentations sur hardware spécialisé.

Reconnaissance et extraction de contours continus

Nous avons conçu et simulé (sur Connection Machine à 8000 processeurs) une machine de Boltzmann de 500 neurones (150 en entrée et 4 en sortie) qui apprend à classer correctement des silhouettes de bateaux, extraites d'images infra-rouges sous forme de contours continus. Le codage d'entrée (courbures et orientations locales) garantit l'invariance par rotation translation et homothétie. Le temps de classification est inférieur à deux secondes par silhouette.

Une rétine stochastique a été conçue pour extraire des chaînes de contours continus sur images à 256 niveaux de gris.

SYNCHRONOUS BOLTZMANN MACHINES AND ARTIFICIAL VISION - Synchronous Boltzmann machines are stochastic networks of formal neurons well adapted to massive parallel computing. We have designed and simulated a 10,000-neuron stochastic retina (extraction of continuous contour chains), and a 500-neuron network capable of identifying complex outlines.

L'architecture utilise deux couches de "détecteurs de contrastes orientés", et une couche de "maillons" qui codent le chaînage des contours locaux. Les connexions des détecteurs d'orientations émulent celles des hypercolonnes du cortex visuel des mammifères. Deux couches de neurones "cliques" gèrent les interactions multiples par groupes de trois à vingt neurones. La présence cruciale de cliques et de dissymétrie synaptique impose des règles d'apprentissage avec délais temporels mais toujours locales. Les simulations (sur CRAY2) permettent de calibrer efficacement une rétine de 10 000 neurones.

Plusieurs modules de Boltzmann synchrones sont en chantier au DIAM (Département d'intelligence artificielle et de mathématiques) : segmentation d'images en zones texturées, analyse visuelle du mouvement etc. pour aboutir à une version fruste de machine à voir connexionniste et modulaire, massivement parallélisable, d'environ 150 000 neurones.

Robert Azencott, professeur à l'École normale supérieure, Laboratoire de mathématiques (URA 762 CNRS), DIAM.

Jérôme Lacaille, chercheur à l'ENS, DIAM.

Laurent Younes, chargé de recherche, Département de mathématique et informatique, ENS, 45, rue d'Ulm, 75230 Paris Cedex 05.

AUTO-ORGANISATION DU SYSTÈME VISUEL DES MAMMIFÈRES

Les observations sur le développement embryonnaire du système visuel étant pratiquement impossibles, il est très intéressant de travailler sur des modèles d'évolution permettant d'expliquer la mise en place des caractéristiques fonctionnelles du système.

Claire Devoue,
Mathilde Mougout

Le modèle proposé par R. Linsker et que nous avons développé est formé de sept couches de

cellules, correspondant aux principales étapes dans le traitement de l'information visuelle (Fig. 1). Une cellule reçoit l'information provenant des cellules de la couche précédente par les synapses de son arbre dendritique. Celui-ci est modélisé

par un ensemble de connexions, réparties aléatoirement selon une loi gaussienne. L'état d'une cellule est une fonction affine de son potentiel, chaque cellule calcule son potentiel comme la somme des états des cellules de la couche précédente, pondérés par les poids synaptiques. L'évolution de ces poids suit une règle de type hebbien (règle de corrélation) avec saturation : un poids synaptique est renforcé (respectivement diminué) quand les cellules qu'il relie sont actives simultanément (respectivement inactives).

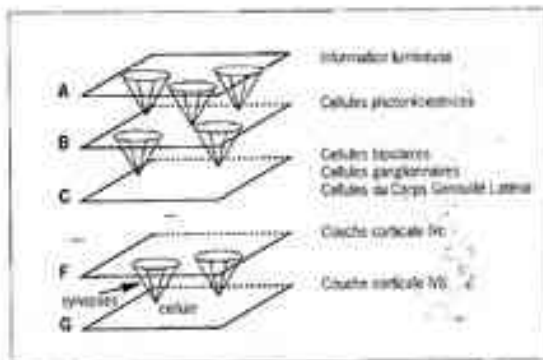


Fig. 1 - Visualisation du réseau 11111. Une cellule donnée d'une couche k est connectée aux cellules de la couche $k+1$, selon une distribution de connexions fixe pour chaque couche.

Simulations de l'évolution prénatale

Pendant la période prénatale, on considère que les cellules de la rétine sont soumises à des activités aléatoires spontanées, modélisées ici par un bruit blanc. La rétine est la seule couche du modèle dont les cellules présentent une activité spontanée. Cette activité rétinienne va permettre, à elle seule, l'évolution des six couches suivantes (qui reçoivent, directement ou indirectement, cette information rétinienne, via leurs poids synaptiques). En simulant ce modèle sur ordinateur, on observe l'apparition de différents types de cellules, comparables aux observations biologiques. Ainsi, il apparaît, dans les premières couches du modèle, des cellules circulaires symétriques à centre ON/OFF, puis, sur la dernière couche, des cellules sélectives à l'orientation (Fig. 2). Notre étude a permis de proposer une explication à l'émergence de ces dernières : la présence d'une arborescence dendritique non-isotrope pour des cellules du réseau entraîne des dissymétries dans les couches suivantes.

Ce modèle mathématique est aussi étudié théoriquement, l'apprentissage des connexions entre les deuxième et troisième couches, par exemple, étant maintenant complètement décrit. En supposant que chaque couche est formée d'un continuum de cellules, la règle de Hebb impose à la fonction-poids synaptique de vérifier, à tout instant, une équation différentielle linéaire liant sa dérivée temporelle à sa convolution avec un opérateur gaussien. Cet opérateur de convolution est diagonalisable à l'aide de fonctions de Hermite à deux variables (qui forment justement un système orthogonal pour la mesure gaussienne).

VISUAL ORGANIZATION IN MAMMALS - We present a model (close to Linster's) of the visual system in order to understand the development of ON/OFF cells and orientation selective cells in the visual cortex during prenatal and postnatal periods. This model can be explained by computational simulations and theoretical results.

Ce calcul permet ainsi de décomposer simplement à tout instant la valeur des connexions dans la base des fonctions propres; après une longue évolution, son comportement est dicté par les fonctions propres associées aux plus grandes valeurs propres. En jouant sur les paramètres du système et les valeurs initiales des poids, on peut ainsi faire émerger asymptotiquement des fonctions purement symétriques ou asymétriques, ou bien des mélanges plus compliqués (correspondant aux cellules symétriques ou sélectives, par exemple, à une orientation verticale, etc.).

L'apparition des hypercolonnes

Nous avons montré que, pendant le développement prénatal du système visuel, l'introduction de connexions horizontales à courte distance, soit toutes excitatrices, soit toutes inhibitrices, favorise l'apparition d'un ensemble de cellules orientées, comparable au squelette des colonnes d'orientation des mammifères à la naissance décrit par les neurobiologistes. Une colonne d'orientation est formée par un ensemble de cellules sélectives à une orientation spécifique. Lorsqu'on étudie la sélectivité des cellules dans une hypercolonne, on observe un changement progressif des orientations, ainsi qu'une alternance de réponses préférentielles à l'œil droit et à l'œil gauche.

La modélisation du développement du système visuel (couches corticales) a été poursuivie pendant la période postnatale. La dynamique des cellules a été modifiée, pour devenir non-linéaire.

En simulant un environnement visuel normal sur la rétine, nous avons montré que seule la présence de connexions inhibitrices à courte distance permet d'expliquer la maturation des colonnes d'orientation. À l'inverse, la présence de connexions excitatrices à courte distance entraîne une perte de l'acuité visuelle des cellules, détruisant ainsi les colonnes d'orientation. L'étude du développement des connexions excitatrices à longue distance montre l'établissement d'un réseau de connexions orientées, reliant des cellules de même orientation, appartenant à des hypercolonnes différentes.

En présence d'un environnement visuel biaisé, les cellules corticales de notre modèle, non orientées à la fin de la période prénatale, prennent l'orientation représentée par le milieu extérieur, alors que les cellules qui étaient déjà sélectives à une orientation donnée ne modifient pas leur orientation. Il en résulte une augmentation de la proportion de cellules sélectives à l'orientation du milieu extérieur. L'étude, dans ce modèle, du développement des connexions intra-corticales à longue distance en milieu biaisé prédit la mise en place de connexions uniquement entre les cellules sélectives à l'orientation du milieu extérieur. À l'obscurité, le système conver-

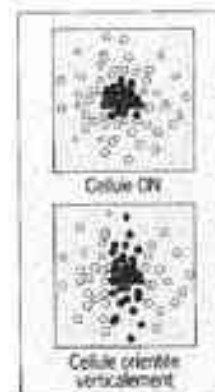


Fig. 2 - Représentation d'une cellule à centre ON/OFF et d'une cellule sélective à l'orientation verticale. La distribution plane des connexions suit une loi gaussienne. Les poids synaptiques ayant atteint la limite de saturation positive (respectivement négative) sont représentés par un point blanc (noir).

ve la structure acquise à la fin de la période prénatale.

Dans un mode de fonctionnement du réseau (et non plus dans un mode d'auto-organisation), la présentation d'une image sur la rétine va provoquer, pour chaque champ récepteur, l'activation des cellules du groupe qui possèdent une orientation correspondant à l'orientation des lignes de contrastes présentes dans le champ récepteur. Les cellules vont donc extraire de l'image un ensemble de (petites) lignes brisées. La présence de connexions excitatrices à longue distance, reliant spécifiquement les cellules sélectives aux mêmes orientations, va permettre d'extraire, à partir de cet ensemble de fragments orientés détectés par les cellules, des lignes de taille supérieure qui vont donner l'orientation des lignes de fort contraste de l'image. Les machines de Boltzmann, appliquées à la détection de contours, résolvent de la même façon ce problème, en regroupant des petites lignes brisées, orientées.

Clair Devigne, attaché temporaire d'enseignement et de recherche à l'Université Paris X et au Département d'intelligence artificielle et de mathématiques (DIAM) de l'École normale supérieure.

Mathilde Mougnot, maître de conférences à l'Université Paris X et au DIAM de l'École normale supérieure, Université Paris X, 200, avenue de la République, 92000 Nanterre.

MODÉLISATION DU SYSTÈME OLFACTIF DES INSECTES

Le système olfactif des insectes possède une remarquable puissance de traitement de l'information : des modèles simples de réseaux de neurones formels peuvent-ils en rendre compte ?

Gérard Dreyfus

Le système olfactif des insectes présente plusieurs caractéristiques qui rendent sa modélisation particulièrement attrayante : d'une part, il a été très largement étudié par des méthodes d'anatomie et de neurophysiologie ; d'autre part, il est constitué d'un réseau de neurones dont l'architecture et les principes de fonctionnement se retrouvent dans les systèmes olfactifs des animaux les plus divers, depuis les insectes jusqu'aux mammifères. Chez les insectes, il est composé de deux sous-systèmes : - le système "spécialiste" traite et reconnaît les odeurs sexuelles (phéromones), résultant de mélanges dont la composition est relativement simple, stable et bien définie ; le traitement de ces signaux déclenche des comportements stéréotypés, dans lesquels l'apprentissage ne joue pas de rôle ;

- le système "généraliste" traite les odeurs alimentaires, résultant de mélanges dont la composition est complexe et instable ; le traitement de ces signaux déclenche des comportements adaptatifs, dans lesquels l'apprentissage joue un rôle.

Nous présentons ici un travail de modélisation de chacun de ces deux sous-systèmes qui a été entrepris dans le cadre d'une collaboration entre trois laboratoires : il met en œuvre des compétences dans les domaines de la neurobiologie ⁽¹⁾, de la modélisation ⁽²⁾, et des réseaux de neurones formels ⁽³⁾.

Le modèle du système généraliste

Le premier étage du système généraliste présente une structure en "glomérules", qui sont des zones où se trouvent rassemblés les points de contact (synapses) entre les axones des neurones sensoriels (qui apportent les molécules et élaborent le signal olfactif) et les interneurones qui traitent ce signal ; dans ces zones se trouvent aussi les points de contact entre les interneurones. Certains interneurones relient les glomérules entre eux, de sorte que des signaux sont véhiculés sur des distances pouvant aller jusqu'à plusieurs centaines de micromètres ; il est donc important de tenir compte, de manière suffisamment précise, des retards introduits par la propagation de ces signaux sur de telles distances ⁽¹⁾⁽²⁾.

Pour pouvoir simuler commodément ce modèle sur ordinateur, il faut évidemment se restreindre à un nombre d'unités relativement faible : il est donc particulièrement important d'établir des lois d'échelle pour pouvoir simuler sans trop de distorsions les comportements temporels des interneurones. On détecte des oscillations spontanées lentes (fréquence de l'ordre de 1 hertz) ou rapides (10 Hz). Cette observation est bien vérifiée expérimentalement. Par ailleurs, l'application de signaux d'entrée conduit à des comportements oscillants dont les fréquences et phases caractéristiques dépendent du (ou des) stimulus et de leur histoire.

Le modèle du système spécialiste

Le modèle incorpore des ingrédients aussi simples que possible ; les paramètres dont les valeurs ne sont pas individuellement connues sont considérés comme des variables aléatoires tirées de distributions biologiquement vraisemblables ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾.

L'élément de base utilisé est un modèle de neurone avec mémoire ; chaque neurone peut être actif ou inactif, la probabilité d'activité dépendant du potentiel de membrane, lui-même modélisé de manière très simple. Ces neurones sont de trois types : récepteurs (30 % des neurones du réseau), inhibiteurs (40 %) et excitateurs (30 %) ; ils sont reliés en un réseau dont les connexions ont une topologie aléatoire (avec néanmoins quelques contraintes), et dont la connectivité vaut 10 %. Les retards synaptiques sont choisis aléatoirement dans des distributions uniformes entre 10 et 100 ms pour les neurones inhibiteurs et entre 10 et 50 ms pour les neurones excitateurs, en vue de rendre compte approximativement de la nature dendritique des signaux. Les poids synaptiques sont binaires : +1 pour les synapses excitatrices et -1 pour les synapses inhibitrices. Les simulations montrent que ce modèle présente une grande richesse de comportement dès que l'on considère des réseaux de plus de 50 neurones.

Le résultat le plus frappant de cette modélisation réside dans le fait que ce réseau possède une remarquable puissance de traitement de l'information : en effet, on observe que le réseau est capable d'extraire du signal brut diverses caractéristiques de la stimulation par les "odeurs" simulées : amplitude, durée, composition

MODELLING THE INSECT OLFATORY SYSTEM - The insect olfactory system exhibits outstanding information processing capabilities; can they be accounted for by simple formal neural network models.

du mélange de molécules présentes, fréquence de stimulation, etc.

La variété des réponses des neurones du réseau est telle qu'il a été nécessaire de classer ces réponses : on a pu utiliser une classification inspirée de celle qui a été proposée pour caractériser les réponses enregistrées dans des neurones vivants du système généraliste. Le modèle fournit en effet toutes les réponses qui ont été observées dans les systèmes vivants, mais également d'autres réponses qui suggèrent de nouvelles hypothèses et expériences.

Le fait qu'un réseau dont la construction est partiellement stochastique, mais soumise à des contraintes biologiques, soit capable de reproduire et de prédire les réponses du système vivant, soulève évidemment une question fondamentale : quelles sont les caractéristiques du système dynamique qui confèrent au modèle la diversité de ses propriétés et ses capacités de calcul ?

L'un des intérêts du modèle est qu'il est suffisamment simple pour que l'on puisse espérer analyser son comportement ; en effet, l'un des dangers de l'utilisation systématique de simulations par ordinateur réside dans le risque de créer un modèle, certes fidèle à la réalité biologique, mais dont le comportement peut devenir aussi difficile à comprendre que celui du système vivant que l'on cherche à modéliser... Il convient donc d'analyser mathématiquement le modèle, notamment à l'aide de méthodes développées pour le filtrage adaptatif par réseaux de neurones formels.

Ainsi, on peut espérer que ces modèles, par leur simplicité, permettront de dégager des caractéristiques génériques de certaines étapes du traitement de l'information par les systèmes nerveux.

(1) Claudine Menot, Laboratoire de neurobiologie comparée des insectes (URA 1180 CNRS-INRA).

(2) Michel Kanichay, Laboratoire de neurobiologie moléculaire de l'Institut Pasteur (URA 1284 CNRS).

(3) Christian Linaut, Léon Perreux, Gérard Dreyfus, Laboratoire d'électronique de l'ESPCI, BP 6 CNRS.

Gérard Dreyfus, professeur à l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris (ESPCI), directeur du Laboratoire d'électronique, 10, rue Vauquelin, 75005 Paris.

ANALYSE DE L'INTÉGRATION SYNAPTIQUE

La modélisation mathématique permet la prise en compte de phénomènes complexes d'intégration synaptique : le renforcement des corrélations des signaux d'entrée ou leur simple sommation.

Jacques Demongeot,
Jean-Louis Martiel

Le contrôle du mouvement chez les mammifères supérieurs et les troubles qui sont associés (maladie de Parkinson) sont encore mal compris, tant au niveau physiologique que cognitif. Les ganglions de la base (structures de l'encéphale), et particulièrement le striatum, jouent un rôle essentiel dans le transfert de l'information entre le cortex et le thalamus, et dans l'élaboration de la commande motrice des muscles. C'est pourquoi nous avons entrepris une étude du *medium spiny neuron* qui représente 95 % des types cellulaires du striatum.

Ce neurone est caractérisé par des arbres dendritiques à forte densité d'épines (2 à 4 épines/ μm) et des potentiels d'action dendritiques (les dendrites sont le siège de phénomènes non linéaires en réponse aux excitations synaptiques). Ce neurone reçoit des excitations corticales et des inhibitions dopaminergiques. Nous proposons un modèle biophysique fondé sur l'équation du câble (équation linéaire) en prenant une distribution continue des épines : les phénomènes non-linéaires sont introduits en supposant qu'une fraction des épines est excitable et suit une cinétique du type tout ou rien (équation de Hodgkin et Huxley).

Le modèle prédit que le *medium spiny neuron* est capable de deux grands modes de fonctionnement (Fig. 1). Dans le mode linéaire, le neurone somme linéairement les entrées synaptiques (excitatrices ou inhibitrices) avec un retard dû à la propagation entre la synapse et le soma et une atténuation due à la résistance électrique du dendrite.

Dans l'autre mode non-linéaire, l'effet des entrées synaptiques sur le soma n'est plus donné directement par une som-

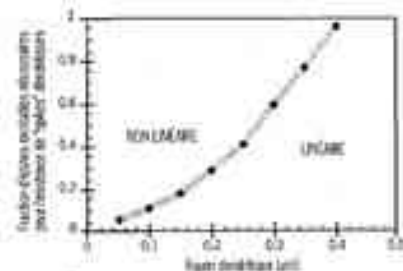


Fig. 1 - Intégration synaptique linéaire ou non-linéaire.

mation, mais dépend du délai temporel entre les entrées ou bien du rayon du dendrite (Fig. 2) : le neurone est capable de détecter des entrées simultanées ou presque, et même des séquences précises d'inhibition-excitation. Les figures 1 et 2

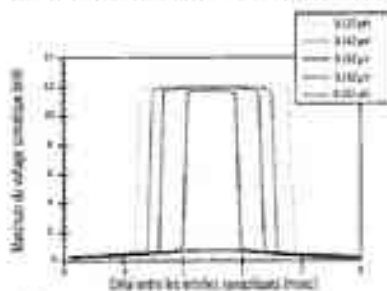


Fig. 2 - Détection de coïncidences des entrées synaptiques pour plusieurs rayons dendritiques (la proportion d'épines excitables est 0,25).

montrent qu'un même neurone peut fonctionner dans l'un ou l'autre mode suivant certains paramètres (fraction d'épines excitables, rayon du dendrite, résistance de la tige dendritique, etc.) et opérer des transitions réversibles entre ces modes.

Ces résultats permettent de proposer des relations entre les caractéristiques biophysiques ou géométriques et l'organisation des entrées synaptiques (excitatrices ou inhibitrices).

De l'intégration synaptique à la segmentation des images

Dans le noyau cochléaire, un neurone reçoit des informations des neurones voisins, en plus d'une afférence correspondant à une fréquence bien précise du spectre de l'audible. Dans l'intégration synaptique, un renforcement est effectué si les fréquences des neurones voisins (qui sont proches, du fait de la tonotopie) ont une intensité et une phase approximativement égales : c'est ainsi qu'un signal d'entrée correspondant à une voyelle, qui charge avec une intensité voisine une plage médiane de fréquences connexes, se verra renforcé aux dépens d'un bruit de haute et basse fréquence, dont les amplitudes ont des intensités "aléatoires".

Si nous appliquons la métaphore neurone-pixel, un tel phénomène de renforcement permettra de rehausser "l'activité de gris" des pixels situés à l'intérieur d'une image tumorale. En effet, si l'on suppose que l'activité de gris d'un pixel

SYNAPTIC INTEGRATION ANALYSIS - Detection of simultaneous (or quasi simultaneous) synaptic events is made possible by non-linear synaptic integration, as exemplified by a model for the medium spiny neuron. This property is discussed in connection with a model for the peripheral auditory system (cochlear nucleus) which shows an enhancement of neuronal activity in response to synchronous inputs.

est proportionnelle à l'activité électrique d'un neurone, on peut montrer que l'activité d'une tumeur est sensiblement constante. L'image initiale (une image IRM, Fig. 3a) montre une tumeur faite de cellules-sources dérivant d'un même clone tumoral. Cette tumeur, très homogène, correspond à une activité d'entrée synchrone pour le réseau formel. Cette activité, rehaussée par le réseau de neurones simulant le noyau cochléaire, donne une image de sortie (Fig. 3b) dont le gradient à la frontière de la tumeur est renforcé, préparant ainsi la segmentation.



Fig. 3 - Renforcement, par un réseau de neurones formels mimant le noyau cochléaire, de "l'activité de gris" aux frontières d'une tumeur cérébrale : l'image initiale est en a et l'image "traitée" en b (faciles F. Berthommier et L. Marquet).

Nous voyons ainsi que le phénomène de détection et de renforcement d'une activité synchrone des signaux afférents à un neurone peut permettre, dans le cas de la voie auditive, une bonne segmentation des parties corrélées du signal d'entrée, si elles font intervenir des neurones voisins. Dans le striatum, ce renforcement permet de détecter des entrées synchrones, souvent liées à des informations de perception ou de proprioception, ce qui est fondamental dans la préparation de l'ordre moteur.

Jacques Demongeot, professeur à l'Université Joseph Fourier, IMAG, TIM 3 (USR 69 CNRS), TIMB, Faculté de médecine, 38700 La Tronche.

Jean-Louis Martiel, chargé de recherche à l'INSERM, responsable de l'équipe Modélisation, Faculté de médecine, 38700 La Tronche.

CONTRÔLE DE SYSTÈMES DYNAMIQUES PAR RÉSEAUX DE NEURONES

Les réseaux de neurones peuvent fournir des méthodes de contrôle, qu'elles soient basées sur une modélisation cognitive ou biologique du réflexe, ou encore sur une description mathématique du système.

Nicolas Seube

L'idée de reproduire des architectures neuronales par des réseaux de neurones artificiels a été essentiellement motivée par des problèmes de reconnaissance de formes ou de classification. Au début des années 80, des travaux inspirés de modèles neuronaux du contrôle sensori-moteur ont été à la base de recherches visant soit à formaliser les mécanismes d'apprentissage de lois de contrôle dans le contexte de



Visualisation de l'activité d'un réseau post-cochléaire de 2024 neurones. Simulation effectuée sur machine portable Hypercube SPS 140 (CNRS - TIM3 - T. Hervé).

l'automatique, soit à enrichir les modèles cognitifs ou biologiques menant à la conception d'architectures de contrôle neuronales.

Les réseaux sont utilisés ici soit comme fonctions de rétroaction, soit comme prédicteurs du système. Les algorithmes, basés sur des procédures d'optimisation dont la complexité est due à la structure interne des réseaux, reviennent à transcrire une condition d'optimalité de l'espace des états du système dans l'espace des matrices synaptiques du réseau. Dans les méthodes de gradient ou les méthodes de type Newton, la condition d'optimalité devient une "règle d'apprentissage" (telle la rétropropagation), qui dépend de la

dynamique du système contrôlé. En commande adaptative indirecte, cette dynamique n'est pas supposée connue (même si l'on peut dans la plupart des cas la supposer partiellement connue). Alors il s'agit, dans un premier temps, d'estimer la loi d'évolution du processus (également à l'aide de réseaux de neurones), puis d'utiliser cette loi estimée dans la procédure de pénalisation permettant d'apprendre la loi de rétroaction désirée.

Au contraire, lorsque l'on part de représentations cognitives de réflexes élémentaires, l'apprentissage, qui se déroule en même temps que le processus de contrôle lui-même, consiste à construire une fonction de pénalisation indépendante de la dynamique du système. Cet "apprentissage par renforcement" est non supervisé, et il est généralement très lent. L'idée en demeure intéressante, car elle ouvre la perspective d'applications à des systèmes évoluant dans des environnements trop complexes pour qu'on puisse établir un ordre de préférence sur les comportements.

Comprendre la génération neuronale des mouvements

D'autres approches sont motivées par des observations biologiques qui commencent à révéler le fonctionnement de certains cerveaux animaux en ce qui concerne la génération neuronale de mouvements (fuite devant un obstacle mobile, par exemple). Il s'agit ici de construire un modèle neuronal expliquant des réflexes animaux à partir d'observations de l'activité de différents groupes de neurones responsables de l'activité sensori-motrice. Ce modèle étant construit, il est alors validé par simulation, puis appliqué pour des problèmes de contrôle. Cette démarche n'utilise donc pas un modèle du neurone formel que l'on connecte artificiellement en réseaux, mais au contraire consiste à chercher à émuler un comportement, en construisant des réseaux dont les réponses face à des stimuli semblent reproduire des comportements moteurs animaux. Cette sorte d'approche semble prometteuse si elle est ensuite confrontée

DYNAMICS CONTROL AND NEURAL NETWORKS - Neural networks first were studied because of their pattern-recognition capabilities. They are now put to use in the design of control systems. Cognitive approaches have been widely developed and neural network techniques for control based on firm mathematical grounds are starting to emerge.

à des modèles de commande plus formels, permettant d'analyser et de prédire le comportement global de systèmes régulés par ces lois de commandes "biologiques".

De façon plus mathématique, on peut être tenté d'utiliser les capacités d'approximation de fonctions continues des réseaux de neurones pour apprendre des lois de commande non linéaires. Il est alors avantageux de tenir compte d'estimations de la dynamique du système, de façon à permettre une convergence rapide des algorithmes d'apprentissage, d'autant plus que dans les problèmes industriels faisant appel à des techniques de robotique, une estimation de la dynamique du système peut être disponible (bien que souvent coûteuse). Il semble que les architectures neuronales de contrôle, utilisées dans un cadre mathématique formel prenant en compte toutes les informations disponibles sur le système, fournissent des réponses adéquates en terme de performances des lois de contrôle (robustesse, stabilité) pour bon nombre de problèmes non linéaires complexes. Des résultats théoriques concernant les problèmes de choix d'architectures de réseaux appropriées aux problèmes de contrôle, ou permettant la construction de règles d'apprentissage dont on suit garantir le comportement, sont apparus récemment. Aussi, l'implantation d'algorithmes neuronaux dans des systèmes électroniques offre l'avantage de temps de calculs très faibles, ce qui est crucial pour les applications de l'automatique. Ce domaine de recherche, à la frontière des sciences cognitives, de la biologie et des mathématiques appliquées, est en pleine effervescence.

Nicolas Seube, ingénieur de recherche, Thomson Sintra Activité sous-marines, Route de Sainte Anne du Portail, 29601 Brest Cedex.

La cognition en situation

La cognition se manifeste dans les situations de la vie courante, privée ou professionnelle, et en particulier dans les activités de travail et de formation. Le chercheur dans ce domaine est amené à prendre conscience de la multiplicité des aspects cognitifs et de leur unité. La décomposition traditionnelle de la cognition en composantes ou primitives, telle que la reflète la structure de ce numéro (langage, raisonnement, perception, action, mémoire, apprentissage, etc.) est utile, mais insuffisante : il n'y a pas de langage sans perception, sans action, sans apprentissage, pas d'apprentissage sans mémoire, etc. Les situations réelles sont le lieu par excellence où l'on peut étudier les interactions entre ces composantes et, par là même, enrichir les disciplines constituant les sciences cognitives. La recherche ergonomique met en évidence deux caractéristiques essentielles des activités cognitives en situation réelle : leur complexité et leur caractère hautement finalisé et adaptatif.



F. Picasso, *La femme aux allumettes* (1920-1925), coll. part. (© ADAGP-SPADEM Paris 1992, Edimédia).

Les approches de laboratoire décomposent les objets complexes en objets plus simples à examiner, alors que les approches portant sur les situations réelles obligent à savoir les recomposer, bien souvent à un niveau macroscopique comme on le voit dans l'exemple de la modélisation du pilote. C'est lors de ce processus qu'apparaissent les interactions entre les primitives cognitives et, bien souvent, ces interactions mènent à découvrir de nouvelles propriétés.

Ainsi, par exemple, on a longtemps étudié le raisonnement ou le diagnostic dans des situations expérimentales élaborées en référence à des systèmes formels, plutôt qu'à des situations réelles. Dans les situations de travail (raisonnement médical, diagnostic d'incidents dans les processus industriels, etc.), on ne reconnaît pas toujours les primitives du laboratoire. Mais on met en évidence le rôle central des connaissances des experts dans le domaine et de leurs objectifs d'actions, qui déterminent des heuristiques puissantes et efficaces. Ceci est illustré par la discussion sur les systèmes experts médicaux : l'objectif du médecin n'est pas de faire un diagnostic, mais d'améliorer l'état de son patient ; la profondeur de ses activités de diagnostic est donc soumise à cet objectif ; on trouvera des considérations voisines dans l'introduction au chapitre *Raisonnement*.

Cette complexité, alliée à une forte finalisation de l'activité, amène les opérateurs humains à établir le contrôle de leur activité

sur plusieurs niveaux qui comportent notamment des automatismes (les moins coûteux), des règles et des traitements plus abstraits (les plus coûteux). Ceci se traduit à la fois par une réduction de la complexité et par une gestion de l'adaptation aux circonstances changeantes de l'environnement, l'erreur humaine jouant souvent un rôle positif dans les mécanismes adaptatifs. Les chercheurs de laboratoire sont de plus en plus sensibles à ces problèmes, tels qu'ils sont soulevés et analysés par les chercheurs de terrain. Réciproquement, ces derniers s'efforcent de les placer dans le cadre plus large des sciences de la cognition. C'est en enrichissant la dialectique entre ces deux types d'approches qu'on relèvera le défi de la compréhension de la cognition.

C'est aussi sur le terrain du travail réel que s'impose à l'évidence la nécessaire articulation des points de vue disciplinaires sur la cognition. La cognition n'est pas "l'esprit qui planait sur les eaux". Elle se construit et se nourrit d'un environnement cognitif : social, linguistique, informatique, technique, etc. Elle ne s'exerce pas seulement chez des individus isolés, mais elle implique des interactions hommes-hommes autant qu'hommes-machines. C'est d'autant plus vrai dans ces situations de supervision d'environnements dynamiques qu'ont créées les nouvelles technologies, en y introduisant l'intelligence du concepteur (centrales nucléaires, navette spatiale, etc.). On ne peut guère comprendre les activités cognitives de l'opérateur humain, sans y articuler convenablement un modèle de l'évolution de la situation et inversement. De même, l'accroissement des né-

cessités de communication, du fait de la conception de systèmes complexes et étroitement couplés, implique que soient prises en compte des équipes de travail dans l'analyse des activités cognitives.

Les progrès considérables de l'informatique et de l'intelligence artificielle ces dernières années font encore plus nettement apparaître combien la nature des limitations rencontrées dans la solution des problèmes est davantage "cognitive" que "technique". En reconnaissance automatique de la parole, on ne sait pas traiter la variabilité du signal, dont l'homme s'accommode fort bien. En synthèse de la parole, on sait produire les sons, mais on ne connaît pas ceux qui sont "acceptables" par l'auditeur. Dans le dialogue oral homme-machine, on a développé des paradigmes de laboratoire, mais on a peu d'indications sur leur acceptabilité en situation réelle où l'utilisateur et la tâche doivent être modélisés. Le plus important est de savoir ce que le locuteur "peut" dire plutôt que ce qu'il "doit" dire. Enfin, au centre des questions soulevées par l'Enseignement Assisté se situent des problèmes de nature plus pédagogique qu'informatique.

Au concept d'interaction homme-machine se substitue progressivement celui de coopération homme-machine. Après une période où les limitations techniques réduisaient l'opérateur humain à un rôle de serviteur d'une machine, avec une ergonomie dite "de l'interface", comme si l'on pouvait gommer les effets néfastes de la mauvaise structure de raisonnement d'une machine par un "habillage" dit convivial, les enjeux de l'ergonomie cognitive tournent autour de la coopération. Bien entendu, il restera

toujours à résoudre des problèmes de sémiologie dans la conception d'interfaces cohérentes. Mais on modélise les activités conjointes de l'homme et de la machine dans la réalisation des tâches, pour découvrir la meilleure structuration du raisonnement de la machine et le meilleur couplage possible avec l'homme, pour que la performance et le confort du système d'ensemble soient accrus. Le "dialogue" homme-machine est un problème de coopération cognitive, il est d'autant plus crucial dans le développement des systèmes experts : le problème central n'est pas tant d'extraire des connaissances expertes que d'aboutir à une meilleure connaissance des besoins de leurs utilisateurs et des modes de coopération les plus satisfaisants. La responsabilité du travail incombe à l'opérateur humain. On est alors amené à chercher comment lui permettre de contrôler les situations pour qu'il puisse exercer cette responsabilité et, surtout, ses aptitudes encore inégales à s'adapter aux situations nouvelles.

Pour les sciences de la cognition, les situations de coopération homme-machine, dans des tâches professionnelles, présentent des propriétés heuristiques indéniables. Elles constituent des bancs d'essai d'outils nouveaux et un révélateur de problèmes, voire de théories. Tout outil cognitif traduit une certaine représentation de son utilisateur et de la tâche à réaliser : tester l'outil, c'est aussi mettre à l'épreuve ce modèle cognitif.

■ Jean-Michel Hoc, directeur de recherche au CNRS.

■ Jean-Sylvain Liénard, directeur de recherche au CNRS.

SIMULATION COGNITIVE ET PSYCHOLOGIE ERGONOMIQUE

La simulation des activités humaines dans les situations de travail complexes contribue au développement de modèles de raisonnement et sert la conception d'aides cognitives intelligentes.

René Amalberti,
Claude Valot

Une simulation informatique de la cognition a été longtemps orientée vers la validation de modèles locaux de la psychologie cognitive (modèles de mémoire, de compréhension, de résolution de problème...). Il s'agit d'une "micro-cognition" portant sur des primitives cognitives ou des structures locales.

Plus récemment, un nouveau type de simulation cognitive a émergé de la psychologie ergonomique. Il s'agit de modéliser la mise en jeu des compétences acquises et disponibles par le sujet interagissant dans des environnements complexes : opérateurs de centrale nucléaire, d'aciérie, contrôleur radar ou pilote d'avion. On parle alors de "macro-cognition" pour souligner que la simulation s'attache surtout à l'étude de la cognition "située" dans et par le contexte de travail.

Ce changement de point de vue sur les activités cognitives permet une prise en compte de problèmes globaux de gestion des activités, de construction de l'action en fonction du contexte.

Un modèle fonctionnel des activités du pilote

Le choix d'une approche fonctionnelle des connaissances acquises par un opérateur situe d'emblée ces connaissances comme l'expression d'un compromis entre des structures cognitives, des caractéristiques de tâches produisant des dynamiques d'ajustement, de gestion des ressources, de prise de risques... Le modèle cognitif est donc la construction, à partir d'un ensemble d'observations et d'hypothèses, de la dynamique susceptible de produire cette organisation de l'activité. Il se compose d'un ensemble de connaissances recueillies auprès de pilotes de telles manières que les dimensions d'une fonctionnalité individuelle soient conservées. Ces connaissances sont intégrées à une architecture qui produit la dynamique des réponses aux événements, des ajustements.

Un tel modèle est bien fonctionnel et non structural : il n'est pas fait d'hypothèse sur la nature de la mémoire, sur la perception, etc.

La modélisation qui sert ici d'exemple (pilotage d'avions de combat) concerne trois mécanismes cognitifs très imbriqués : la résolution de problème sous pression temporelle lors de la survenue d'incidents, la gestion des ressources entre les activités à court terme et long terme, et les mécanismes d'anticipations et d'auto-adaptation avant la survenue d'incidents.

Les trois composantes de la simulation cognitive

La simulation cognitive comporte trois composantes : une architecture fonctionnelle, une base de connaissance, et un support informatique au modèle.

La nécessité d'effectuer en temps partagé deux activités différentes est un trait fort du modèle : la conduite à court terme de la trajectoire et l'anticipation à long terme sur le suivi du plan de vol. Cette double activité se retrouve dans une architecture à deux niveaux. Chaque niveau reproduit la même structure constituée de quatre pôles fonctionnels : un pour agir, un pour stocker des solutions à des incidents, un pour gérer le temps et un pour contrôler l'ensemble du niveau. Le niveau global traite de l'enchaînement des schémas dans le but de remplir la mission. C'est à lui que reviennent les traitements de replanification partielle et profonde et tous les mécanismes d'anticipation. Le niveau local s'occupe de la conduite à court terme, de l'action en cours. Il traite les adaptations locales et le contrôle de l'action.

La base de connaissance sur le domaine est constituée de schémas génériques d'exécution de branches de vol (une quinzaine), eux-mêmes décomposés en une centaine de sous-schémas d'exécution en conditions normales, et une centaine de schémas de réponses à des incidents. Le cœur du modèle d'adaptation et de contrôle est constitué de quelques dizaines d'heuristiques gérant des objectifs éventuellement contradictoires.

Le développement d'un support informatique du modèle cognitif de contrôle de processus rapides poursuit plusieurs buts : - la programmation informatique sert la modélisation cognitive. Elle en souligne les imprécisions et permet de les combler.

COGNITIVE SIMULATION AND ERGONOMIC PSYCHOLOGY - Computer simulations of human cognitive activity in work contexts opens up a new avenue for research in cognitive ergonomics. Functional framework models of "situated" cognition and activity control are developed. A model of processes control in a fighter aircraft illustrates the theoretical and applied aspects drawn from this research project.

Il est ainsi envisageable de "densifier" le modèle cognitif.

- la programmation informatique débouche sur des aspects très appliqués de la modélisation cognitive. Le programme du copilote électronique de l'avion Rafale, destiné à procurer au pilote un environnement d'assistance à la conduite et aux prises de décisions, est directement issu de ces travaux.

Des voies alternatives aux solutions informatiques

Une conséquence particulièrement importante du modèle est de démontrer qu'il existe des voies alternatives aux solutions informatiques de résolution de problème actuellement proposées par les ingénieurs pour traiter les situations complexes : ces solutions sont généralement fondées sur une base de connaissance très dépendante d'un domaine technique, couplée à un système raisonneur réactif aux événements. Leur performance est directement proportionnelle à l'étendue de la base de connaissance et à la puissance de calcul de la machine.

La modélisation proposée ici est totalement alternative à cette course à la puissance des systèmes, car la base de connaissance est limitée et la puissance de calcul est volontairement contrainte. L'intelligence du modèle cognitif est dans l'anticipation, la modélisation de la prise de risque et de la réduction permanente de la complexité, qui implique une prise en compte importante de la méta-connaissance.

René Amalberti, spécialiste de recherche du Service de santé des armées, Centre d'études et de recherches de médecine aéronautique (CERMA), Département d'ergonomie aéronautique.

Claude Valot, chercheur à la Direction des recherches et études techniques, CERMA, Département d'ergonomie aéronautique, Base d'essais en vol, 91228 Brétigny sur Orge.

COGNITION ET SYSTÈMES EXPERTS MÉDICAUX

La qualité des soins dispensés aux patients pourrait être améliorée par les systèmes d'aide à la décision. Encore faut-il que le médecin puisse y avoir accès dans son exercice quotidien.

■ Régis Beuscart,
Marius Fieschi

L'interrogation traditionnelle sur la médecine (est-ce un art ou une science ?) illustre parfaitement la nature particulière de la décision médicale. Cependant, une analyse fine du processus est nécessaire car la capacité de raisonner, en médecine où le problème à résoudre n'est pas toujours clairement défini, se caractérise par une rationalité tempérée par le jugement. Un système qui proposerait une aide au diagnostic tendant à identifier avec le plus de précision possible un état morbide n'est pas réaliste. En pratique, le processus de l'affinement diagnostique s'arrête lorsque l'action thérapeutique est identifiée quel que soit le résultat possible de l'affinement. De plus, la variabilité des observations et du résultat de l'expertise sont des freins à la validation et à la diffusion des systèmes d'aide à la décision.

Les systèmes experts médicaux, utilisant de grandes quantités de connaissances, ont été conçus pour aider la décision médicale en matière de diagnostic ou de thérapeutique, mais la mise au point de systèmes informatisés "d'aide à la décision" se heurte donc à cette diversité des modes de prise de décision.

Représentation des connaissances en médecine

Trois types de connaissances peuvent être distingués : la connaissance factuelle, la connaissance "relationnelle", qui exprime des relations et leurs rôles entre les différents objets de la connaissance, et la

connaissance "conditionnelle", qui s'exprime sous la forme : SI une condition est réalisée ALORS une conclusion peut être affirmée.

L'aide proposée par ces systèmes se situe dans des environnements de travail très différents :

- Les systèmes dits consultants, les plus nombreux, dont la fonction est de donner un avis de spécialiste à partir d'un cas qui leur est fourni. Leur intérêt principal, qui réside dans les performances qu'ils proposent, n'a pas toujours été confirmé dans la pratique courante.

- Les systèmes consultants dits "critiques". Ils proposent une critique de l'action proposée par un médecin pour un cas précis. Ils sont en général réalisés pour aider l'expert et s'appuient sur des modèles cognitifs des erreurs commises (erreurs dues à des connaissances incomplètes et erreurs dans le processus dues à des biais cognitifs ou à l'utilisation d'heuristiques pauvres).

- Les systèmes intégrés à des systèmes d'information ; ces modules d'aide à la décision sont toujours actifs et tournent en tâche de fond sur l'ordinateur hôte. Ils se manifestent chaque fois que la situation l'exige, en critiquant ou en complétant l'action proposée.

Évaluation des systèmes d'aide à la décision

L'évaluation de ces systèmes a montré que, dans des situations expérimentales (présentation des dossiers, revue de cas), les systèmes experts médicaux avaient des performances nettement supérieures aux médecins "clients". Mais la mise en œuvre pratique des systèmes experts

COGNITION AND MEDICAL EXPERT-SYSTEMS - Medical expert systems are given as examples but they need to be integrated in a complex and uncertain context. Knowledge about medical reasoning and of variability are essential for success.

médicaux doit prendre en compte des éléments complémentaires :

- 1) Il est certain que le médecin, dans de nombreuses situations, tempore, use de l'évolution spontanée de la situation, met en œuvre une thérapeutique symptomatique sans rechercher les causes profondes de la maladie, ne décompose pas en problèmes distincts : diagnostique puis thérapeutique...

- 2) La prise en compte de l'incertitude amène le praticien à l'intégrer dans sa pratique courante. On a pu ainsi parler récemment "d'Antibiothérapie probabiliste" proposant des antibiotiques ou des associations d'antibiotiques presque toujours efficaces quel que soit le germe pathogène.

- 3) La validation d'un système d'aide à la décision s'avère particulièrement délicate dès lors que la variabilité des référents peut être considérable. Et la recherche de "golden standards" est souvent impossible en dehors de certaines disciplines choisies. Même une image radiologique ou un examen de laboratoire ne pourront emporter la décision, faute de consensus.

L'analyse des processus cognitifs pour la mise au point des systèmes d'aide à la décision s'avère d'une troublante actualité pour disposer d'un meilleur modèle de l'utilisateur. Les médecins ne raisonnent pas de manière totalement rationnelle mais privilégient des modèles probabiliste et intègrent des variables économiques, sociales et juridiques dans leur démarche ("quelle est la décision thérapeutique qui "couvre" le plus ?"). De la prise en compte de ce modèle dépendra l'efficacité des futurs systèmes experts en médecine.

■ Régis Beuscart, professeur à l'Université Lille II, directeur du Centre d'enseignements et de recherche sur le traitement de l'information médicale, Laboratoire d'informatique médicale, Faculté de médecine, 1, place de Verdun, 59045 Lille Cedex.

■ Marius Fieschi, professeur à l'Université d'Aix-Marseille II, responsable du Service de l'information médicale, Hôpital de la Timone Adultes, 254, rue Saint-Pierre, 13385 Marseille Cedex 05.



Les systèmes experts médicaux ont été conçus pour aider la décision médicale en matière de diagnostic ou de thérapeutique, mais la mise au point de systèmes informatisés "d'aide à la décision" se heurte à la diversité des modes de prise de décision. Ici, on peut voir l'analyse pré-opératoire par le chirurgien, d'images obtenues en RM, sur laquelle une tumeur est visible. (© CNRS - TM3 - J. Moret).

VERS DES PARTENAIRES COGNITIFS

L'interaction homme-machine peut être vue comme la collaboration de deux systèmes cognitifs, la machine et l'opérateur, lors de la réalisation d'une tâche.

■ Pierre Falzon

■ L'évolution technologique tend à modifier profondément le rapport entre l'homme et l'instrument, passant d'une situation où l'homme est utilisateur d'une machine, à une situation où l'un et l'autre coopèrent pour l'atteinte d'un but commun. L'interaction homme-machine peut alors être vue comme la collaboration de deux systèmes cognitifs – la machine et l'opérateur – lors de la réalisation d'une tâche. Ce partenariat cognitif, encore balbutiant, s'annonce comme l'un des enjeux importants des années à venir. Il ouvre un vaste domaine à l'ergonomie, celui de la définition des modalités de la coopération intelligente. Ce domaine amène l'ergonome à mieux s'intéresser à une question trop peu explorée, celle des activités de collaboration inter-humaine. C'est cette approche qui sera illustrée ci-dessous, au travers de deux études (en cours) de dialogues inter-humains.

Les dialogues de conception

La première étude (menée en collaboration avec F. Darses) concerne des dialogues entre deux opérateurs, lors d'une tâche de conception de réseaux informatiques. Les deux opérateurs étaient de niveau de compétence inégal, l'opérateur expérimenté avait pour consigne d'adopter un comportement coopératif, sans prendre en charge complètement le problème à résoudre. Les dialogues ont été analysés sous l'angle des actes coopératifs de chacun des partenaires.

Une première observation est que l'opérateur moins compétent émet très peu de demandes directes de résolution. Ceci va à l'encontre du fonctionnement usuel des systèmes d'aide. Ceux-ci utilisent le plus souvent l'assistance par la réponse : l'utilisateur soumet des demandes de solution au système qui fournit une réponse.

Quel est alors le mode de coopération adopté par l'opérateur expérimenté ? Un des moteurs essentiels de l'interaction est l'activité critique, évaluative : l'opérateur propose un élément de solution, et l'opérateur expérimenté réagit par une évaluation de la solution proposée. Les évaluations positives peuvent être assorties d'extensions de la solution ou de déclarations préventives ; les évaluations négatives sont toujours accompagnées de

justifications, et parfois de propositions alternatives. Par ailleurs, l'opérateur expérimenté intervient aussi pour orienter l'activité, en proposant des problèmes à traiter ou en suggérant de passer à une nouvelle phase du traitement.

On voit ainsi que les interventions de l'opérateur expérimenté ne se limitent pas à la proposition de solutions, ce qui constitue l'essentiel de l'aide proposée par les systèmes classiques. L'assistance à l'évaluation de solution, à l'orientation du raisonnement, occupe en revanche une place importante.

Les dialogues d'aide

La seconde étude (menée en collaboration avec J.-M. Robert) concerne des dialogues entre un utilisateur d'un micro-ordinateur devant réaliser différentes tâches de traitement de texte, et un conseiller disponible sur demande pour l'aider. Dans cette situation, à la différence de la précédente, il ne s'agit pas de résolution coopérative : la responsabilité de la réalisation de la tâche incombe à un seul des partenaires, l'utilisateur. On peut donc s'attendre à des interactions d'un type différent.

On constate en effet que beaucoup des interventions du conseiller sont des solutions (procédures en général), fournies en réponse soit à une demande directe de l'utilisateur, soit à l'annonce de la rencontre d'une difficulté. Néanmoins, d'autres observations rejoignent les résultats observés dans les dialogues de conception.

Tout d'abord, une grande part des interventions du conseiller font suite à l'énoncé par l'utilisateur d'une assertion :



Robot manipulateur traitant des problèmes d'assemblage automatique dans un univers de cubes. Cette expérience a pour but de concrétiser l'intégration des fonctions suivantes : générateur de plans spécifiques, communication homme-machine, perception, commande, préhension et manipulation (© CNRS - IAAI).

LOOKING FORWARD TO NEW COGNITIVE ASSOCIATES : Man-machine interactions can be seen as the collaboration of two cognitive systems: the machine and the operator, to perform a task. Two inter-human types if dialogues are analysed : dialogues between two operators belonging to different levels and dialogues between PC users and an adviser.

annonce d'une procédure que l'utilisateur veut utiliser, de l'objectif qu'il s'est fixé, de l'interprétation qu'il a de tel ou tel objet de l'interface, etc. Ces assertions sont interprétées par le conseiller comme des demandes d'évaluation, auxquelles il réagit de différentes façons : les réactions négatives s'accompagnent de corrections, d'explications ou de propositions alternatives.

En second lieu, l'utilisateur produit lui-même de nombreuses demandes de confirmation (concernant des objectifs possibles, l'exactitude de certaines procédures, l'existence de certaines fonctions, le rôle de certains objets de l'interface, etc.). Le conseiller réagit à ces demandes de la façon précédemment décrite.

Un résultat additionnel concerne les stratégies explicatives. On constate que les moyens utilisés par le conseiller pour aider sont extrêmement variés : énoncé de procédure (soit en bloc, soit pas à pas, auquel cas le conseiller contrôle l'exécution de la procédure par l'utilisateur, la corrigeant si besoin est), exemplification, énoncé de connaissances générales, propositions d'analogies, etc. Parmi ces moyens, on trouve aussi l'exécution de la tâche par le conseiller, mais c'est loin d'être le mode principal d'intervention.

Quelles conclusions générales tirer de ces deux études pour la conception d'interfaces réellement coopératives ?

Tout d'abord, il s'avère que des résultats concordants peuvent être observés, qui confirment des observations déjà rapportées par différents auteurs : l'attitude coopérative ne consiste pas à prendre en charge le problème de l'interlocuteur, mais à tirer parti des ébauches de solution, des hypothèses produites par ce dernier.

D'autre part, on constate néanmoins que des différences apparaissent en fonction de la situation d'interaction. Il est donc souhaitable de mieux caractériser ces situations d'interaction et les modalités d'assistance qui leur sont associées.

■ Pierre Falzon, professeur au CNAM, directeur du Laboratoire d'ergonomie du CNAM, 41, rue Gay-Lussac, 75005 Paris.

L'EIAO, UN DOMAINE D'ACTIVITÉS POUR LES COGNISCIENCES

Le sigle EIAO renvoie à l'usage de techniques de l'intelligence artificielle pour réaliser des "Environnements Interactifs d'Apprentissage avec Ordinateur". Il s'agit de créer des situations d'interactions avec des connaissances en vue de favoriser leur apprentissage.

■ **Martial Vivet**

Les acteurs intervenant pour concevoir de tels systèmes ont des profils variés : les didacticiens éclairent le champ par leur connaissance de ce qu'est une situation didactique (la composition des processus de transposition didactique et de transposition informatique de connaissances est devenue centrale), les chercheurs en intelligence artificielle (IA) réalisent des systèmes hautement interactifs où interagissent des connaissances profondes complexes et variées, les chercheurs en psychologie établissent des liens entre les systèmes produits et les théories de l'apprentissage, les linguistes interviennent au niveau de la modélisation du dialogue considérant la communication avec la machine comme un ensemble d'interactions cohérentes au fil du discours,



Situation type pour apprendre la technologie par collaboration en résolution de problèmes.

enfin les ergonomes interviennent sur la qualité des interfaces, l'attention portant sur la charge et le confort au plan cognitif.

Les composantes essentielles d'un EIAO concernent :

- Le champ des savoirs enseignés,
- L'apprenant : il y a controverse sur la nécessité même de modéliser l'apprenant. Le modèle doit-il être basé sur la représentation de connaissances du do-

maine (restreintes, justes ou erronées) ou sur l'image d'un processus cognitif ?

- Le contexte d'apprentissage et les scénarios d'usage du système. Le rôle du maître, des pairs, l'articulation avec d'autres modalités de formation doivent être précisés. Comment les prendre en compte ?

- Les démarches pédagogiques. Les fournir de façon explicite et déclarative ? Soit ! mais où se fait la limite entre ce qui est générique et ce qui est propre au domaine spécifique enseigné ? Comment assurer la nécessaire socialisation des connaissances avec des systèmes souvent conçus pour un travail individuel ?

Ce qui s'est fait ...

Les premiers travaux ont abordé les problèmes relatifs à la représentation des connaissances : passage de la résolution de problèmes (au sens systèmes experts) à la "résolution pédagogique" dans laquelle la solution construite doit être "explicable" (avec explications "pertinentes") et ne mettre en œuvre que des connaissances accessibles à l'apprenant. Une explication n'est pertinente au plan pédagogique que si elle intervient "juste à temps" avec un contenu et un libellé adaptés.

Le travail sur le modèle de l'apprenant a porté sur la typologie des modèles et des utilisations possibles, la compréhension des erreurs (diagnostic cognitif) ou du plan suivi par l'apprenant.

Ce qui se fait ...

Le croisement des points de vue des disciplines impliquées est devenu fécond. La constitution récente d'un groupe CNRS commun au PRC-IA et au GDR didactique est significative d'une meil-

ICAL, A FIELD FOR COGNITIVE SCIENCES
- Actors and main components in ICAL are presented. Researchers with very different background are now working on concepts such as knowledge manipulation, knowledge transmission and constructivism. Such work seems to day to be fruitful. The text shows the rapid evolution in the field. It underlines why and how this new area has emerged and should be seen as a kernel for cognitive sciences.

leure coordination des acteurs. Une attention soutenue est portée aux processus méta-cognitifs (comment renforcer ces processus chez l'apprenant ?) et à la prise en compte des conceptions de l'apprenant. Citons les travaux autour de MEMOLAB (mémoire humaine), basés sur une notion de *décalage de langage* aboutissant à la création d'un environnement dans lequel l'apprenant agit sur l'environnement à l'aide d'un langage de commande référant à des concepts tout juste élaborés. L'émergence d'un concept y permet la création d'un élément de langage utilisable au stade suivant.

Ce qui reste à faire ...

Il reste à intégrer les apports de chaque discipline dans des EIAO effectivement testés avec des apprenants, à travailler à l'élaboration de méthodologies d'évaluation des systèmes, des usages, des apprentissages réels qu'ils permettent.

La construction d'EIAO est un pari essentiel pour les cognisciences. C'est l'occasion de créer des projets particulièrement riches où se confrontent les différentes disciplines qui y interagissent. Des problèmes nouveaux émergent et ne trouveront de solution que par la coopération entre des acteurs qui n'ont pas encore le même langage. Ainsi, aborder les aspects temporels dans un EIAO est une question maintenant en émergence.

L'objectif de produire des environnements opérationnels incite à une discipline de travail féconde pour tous. Le milieu se structure au plan mondial, une société savante *AIED society* est maintenant créée. Des conférences internationales sont organisées. Citons IT92 (Montréal, juin 92) et AI-ED (Edimbourg, juin 93). La communauté française y est bien représentée.

■ **Martial Vivet**, professeur à l'Université du Maine, Département Informatique, BP 535, 72017 Le Mans Cedex.

LA MODÉLISATION DU DIALOGUE POUR LE CONTRÔLE AÉRIEN

La machine est-elle capable de traiter la variabilité linguistique inhérente à la parole en situation opérationnelle ?

■ **Françoise Néel,**
Karim Matrouf

Le caractère le plus frappant de l'oral spontané réside dans le fait que la compréhension réciproque n'est en rien gênée par la diversité du lexique, des expressions et des constructions syntaxiques utilisées qui sont souvent loin de respecter les normes de la langue écrite.

Dans le développement d'un système d'aide à la formation des contrôleurs aériens (voir figure), le choix a été de prendre en compte les processus cognitifs qui sont spontanément mis en œuvre dans toute interaction humaine, et qui se traduisent notamment par la propriété suivante : en situation de dialogue, une personne anticipe inconsciemment sur le contenu du message que son interlocuteur est susceptible de lui fournir. Pour ce faire, elle met à profit les connaissances qu'elle possède sur l'objectif poursuivi, sur les caractéristiques de son interlocuteur et sur l'environnement dans lequel s'instaura le dialogue. Ces prédictions lui permettent de choisir, dans un nombre important d'interprétations possibles, celle qui aura le moins d'ambiguïté.

Prédire ce qui va être dit

La simulation du dialogue, dans le cadre d'exercices de formation au contrôle aérien, pouvait a priori sembler chose

aisée. En effet, les contrôleurs aériens dans leur communication avec les pilotes doivent respecter ce qu'on appelle une "phraséologie", c'est-à-dire un langage de type opératif utilisé par des spécialistes, l'objectif étant de transmettre, avec un vocabulaire et une syntaxe codifiés, des informations dans lesquelles l'ambiguïté est volontairement réduite au minimum. Pourtant, les communications réelles entre pilotes et contrôleurs aériens n'échappent pas à la règle générale : l'utilisation de la parole entraîne inévitablement des variantes.

Dans un système de dialogue oral, le modèle de langage spécifiant l'ensemble des phrases de la grammaire permet de guider le processus de reconnaissance de la parole et d'éliminer ainsi les solutions incorrectes. Contrairement à la démarche traditionnelle qui consiste, par souci de simplification, à extraire un petit nombre d'invariants susceptibles de couvrir le maximum d'actions, on s'est orienté dans le cas présent vers un modèle de langage recouvrant un maximum de formulations possibles pour un petit nombre d'actions, afin de conserver le naturel du dialogue et de laisser une grande liberté d'expressions à l'utilisateur. Il faut, en effet, tenir compte de ce que l'utilisateur peut dire et non de ce qu'il doit dire.

Le modèle est ainsi représenté par une grammaire binaire dans laquelle ne sont spécifiées que les relations deux à deux des mots ou des catégories grammati-

DIALOGUE MODELLING FOR AIR TRAFFIC CONTROL. - Semantic and pragmatic knowledge is used to predict the most probable messages to be uttered by the user at each step of the dialogue. The prediction mechanisms allow the user more variability in his formulations, and improve recognition performance at the same time.

cales. Ce modèle autorise une plus grande flexibilité dans la mesure où l'analyse syntaxique ne s'applique que localement et permet à la limite de traiter des phrases syntaxiquement incorrectes ou incomplètes. Mais le nombre de phrases possibles est augmenté, entraînant de ce fait un risque accru d'erreurs de reconnaissance.

On a mis en place un mécanisme de prédiction qui permet, à chaque échange, de modifier un ensemble de probabilités affectées aux transitions des mots, de prédire les suites de mots les plus susceptibles d'être prononcées par l'utilisateur à l'échange suivant, et de réduire ainsi l'espace de recherche du système de reconnaissance. Les probabilités sont représentées par des poids calculés dynamiquement au cours du dialogue à partir de connaissances sémantiques et pragmatiques telles que :

- l'état courant du dialogue : si, dans l'échange précédent, le contrôleur a posé une question sur le cap, la probabilité qu'il formule une instruction concernant cette même entité est renforcée ;
- le contexte de la tâche : les paramètres des avions sont en constante évolution ; par exemple, une instruction sur un changement de cap peut être incompatible avec la valeur du cap actuel ;
- le modèle de l'utilisateur : un contrôleur expert n'utilise pas les mêmes expressions qu'un contrôleur débutant.

La mise en place de tels mécanismes de prédiction s'appuyant sur une modélisation adéquate du langage et du dialogue permet, tout en améliorant le taux de performance, de diminuer les contraintes imposées à l'utilisateur : la syntaxe est assouplie et le nombre d'échanges réduit.



Développé en collaboration avec le CEMA (Centre d'études de navigation aérienne), cette maquette de poste vocal d'aide à la formation des contrôleurs aériens a donné lieu à un prototype industriel actuellement réalisé conjointement avec les sociétés STERNA Ingénierie, SEXTANT Avionique et VECSYS RD CNRS - IL Chantagnier.

■ **Françoise Néel**, ingénieur de recherche au CNRS, responsable du groupe Communication parlée du Laboratoire d'informatique pour la mécanique et les sciences de l'ingénieur (LIMSI), (UPR 3251 CNRS).

■ **Karim Matrouf**, ancien chercheur au LIMSI (UPR 3251 CNRS), BP 133, 91403 Orsay Cedex.

LES FACTEURS HUMAINS DANS LES INTERFACES UTILISATEURS

La prise en compte des aspects cognitifs est indispensable pour la réalisation d'interfaces homme-machine conviviales.

■ Michel Beaudouin-Lafon

L'interface utilisateur prend une part de plus en plus importante dans les systèmes informatiques. Avec l'avènement des stations de travail et des ordinateurs personnels, les interfaces graphiques sont aujourd'hui très largement répandues. L'interface étant, pour l'utilisateur, la seule partie visible d'un système, sa conception et sa réalisation réclament une attention toute particulière. Il n'est pas rare que l'interface représente plus de la moitié d'un logiciel aussi bien pour sa taille que pour le temps de réalisation.

Les interfaces dites conversationnelles qui consistent en un dialogue, souvent textuel, entre le système et l'utilisateur, ont été longtemps utilisées.

Elles sont aujourd'hui pratiquement abandonnées au profit des interfaces à manipulation directe, plus adaptées à l'interaction graphique. Dans ces interfaces, les objets du système sont représentés à l'écran sous une forme évocatrice,

et l'utilisateur peut agir directement sur ces objets, à l'aide de la souris. Ce mode d'interaction, s'il est convenablement mis en œuvre, doit être intuitif et privilégier un apprentissage exploratoire du système. Pour cela, il est indispensable de prendre en compte, lors de la conception de l'interface, les aspects cognitifs de l'interaction.

Ainsi sait-on qu'une interface "fonctionne bien" si l'utilisateur peut s'en forger un modèle mental cohérent. Ce modèle permet à l'utilisateur d'anticiper les réactions du système, de comprendre ses propres erreurs, et contribue à rendre l'interface transparente, c'est-à-dire naturelle. Par contre, dès que le système ne réagit pas conformément au modèle mental de l'utilisateur, ce dernier est perdu, et le système sera le plus souvent incapable de fournir les informations nécessaires pour que l'utilisateur mette à jour son modèle.

La définition d'un modèle conceptuel de l'interface, spécifiant les objets de l'interface, leurs propriétés et les fonctions qui s'y appliquent, est indispensable à la constitution par l'utilisateur d'un modèle mental cohérent.

Le modèle iconique

Les métaphores du monde réel sont souvent à l'origine de modèles conceptuels faciles à assimiler. Ainsi, les interfaces iconiques représentent les différents objets du système par de petites images symboliques appelées icônes. La puissance du modèle iconique provient de la possibilité pour l'utilisateur de déclencher des commandes du système en déplaçant les icônes les unes vers les autres. La combinatoire des possibilités ainsi offertes permet de remplacer un grand nombre de commandes par un petit nombre d'icônes. Encore faut-il que les manipulations possibles soient intuitives : détruire un document en déplaçant son icône vers l'icône de la corbeille est une opération naturelle. Par contre, éjecter une disquette par une opération similaire n'est pas intuitif. Cette action devrait détruire la disquette, ou à la rigueur la réinitialiser. On observe effectivement que

HUMAN FACTORS IN USER INTERFACES - Although graphic user interfaces are now widespread, they are still difficult to design and to implement due to lack of tools. Moreover, human factors are not taken into account as much as they should. Adaptable interfaces can bridge this gap, as shown by the example on iconic interaction.

les utilisateurs ne découvrent pas spontanément cette possibilité, et qu'ils hésitent même à l'expérimenter lorsqu'on la leur propose. Cela traduit simplement que le modèle conceptuel de cette interface n'a pas pris en compte correctement tous les aspects cognitifs de l'interaction iconique.

Adaptativité et adaptabilité

Malgré les connaissances croissantes dont on dispose en ce qui concerne les aspects cognitifs des interfaces, il est aujourd'hui extrêmement difficile de produire des interfaces conviviales à partir de ces seules connaissances : les tests auprès des utilisateurs sont indispensables. On essaie aujourd'hui, en utilisant des techniques d'intelligence artificielle (apprentissage symbolique), de créer des interfaces adaptatives qui "apprennent" l'utilisateur en s'adaptant à son niveau de familiarité avec le système, son mode d'interaction préféré, etc.

Ces techniques n'étant pas encore effectives sur des systèmes réels, on se contente d'interfaces adaptables qui peuvent être modifiées par l'utilisateur en fonction de ses goûts et habitudes. Dans l'interaction iconique, nous avons observé que les utilisateurs, lorsqu'on leur en donne la possibilité, définissent spontanément de nouvelles icônes et de nouveaux modes d'usage d'icônes existants. Les résultats sont parfois surprenants : certains préfèrent ainsi utiliser un ramasse-miettes que l'on déplace vers les objets à détruire, plutôt que de déplacer les objets vers la traditionnelle corbeille.

Une telle imprévisibilité incite à penser qu'il est préférable d'offrir à l'utilisateur des interfaces simples et faciles à adapter, plutôt que des interfaces aux fonctionnalités puissantes, mais d'usage complexe.

■ Michel Beaudouin-Lafon, maître de conférences à l'Université de Paris-Sud, Laboratoire de recherche en informatique (URA 410 CNRS), Université de Paris-Sud, Bât. 490, 91405 Orsay Cedex.



Fragment de Rosette - 196 av. J.C. - Londres, British Museum. ID Artéphot - Bridgeman. L'interaction iconique redécouvre l'usage des symboles mais, à l'instar des hiéroglyphes égyptiens, il lui reste à s'articuler comme un véritable langage. L'ordinateur permettra peut-être d'imaginer une langue interactive, comme dans le projet d'écologie dynamique de Pierre Lévy.

Cognition et société

Les articles de ce chapitre peuvent être vus selon deux optiques. L'une, celle du bilan habituel des recherches qui demande, pour être complet, des études prenant en compte le social. Elles portent sur la manière de traiter des informations concernant les personnes ou la résolution d'une tâche en commun. Tout comme l'âge ou le sexe, le social n'y apparaît qu'à titre de "supplément de paramètre", susceptible de modeler les processus cognitifs. Et dans ce cas, les recherches qui lui sont consacrées ne sont pas censées contribuer de manière fondamentale aux sciences cognitives, mais seulement les prolonger.

L'autre optique est celle d'une évolution en cours des questions théoriques vers une plus grande ouverture. Il était d'emblée évident que la computation, en tant que métaphore du raisonnement, et la computabilité en tant que critère d'une théorie raisonnable en science cognitive, allaient assez vite montrer leurs limites. Or nous y sommes, ou presque, dès l'instant où l'on prend au sérieux le fait que les hommes ne vivent pas seulement d'informations : il leur faut aussi des significations. Et si nous communiquons mieux avec les gens qu'avec les choses, n'est-ce pas parce que les êtres humains ont en commun des intentions et des références ? Voilà qui ne pouvait manquer de rouvrir le débat en "philosophie de l'esprit" ou en intelligence artificielle, de déplacer les perspectives dans les sciences cognitives vers le social et/ou le culturel. En voici succinctement trois raisons.

1°- Encore qu'on ne puisse parler de consensus à propos de la "psychologie populaire" (*folk psychology*), on convient du moins qu'elle est un préalable obligé de tous nos états mentaux. Cette psychologie a été élaborée par les collectivités



P. Picasso, Grande tête (portrait de Jacqueline aux cheveux tressés) coll. part. IO SPADEN Paris 1992, Edimodal.

humaines depuis des temps immémoriaux pour décrire les objets du monde proche, expliquer la manière dont les individus sentent, agissent, s'associent, etc. Elle contient à l'évidence des notions qui varient très lentement (solidité, chaleur, etc.), d'où certains ont conclu qu'elle n'a pas varié depuis Homère. Mais elle renferme aussi des notions qui évoluent plus vite ou qu'elle emprunte aux sciences et aux techniques. Il est important de souligner que des recherches existent et qu'elles ne sont pas défavorables à la seconde interprétation, selon laquelle cette psychologie est une construction sociale.

2°- Ceux qui ont comparé depuis vingt ans les raisonnements des "experts" et ceux des "novices" fournissent un dossier très précis sur les biais, illusions et erreurs de ces derniers. Le jugement d'irrationalité ne peut être mieux fondé. Or justement cela crée un embarras, car, l'attribuer à une limitation générale des hommes à traiter les informations, c'est expliquer l'obscur par l'obscur. En outre, on est happé par de nombreux paradoxes dont Davidson, Nisbett et Stich ont dressé la liste. Pour sortir de cette

impasse, presque totale, il faudra peut-être reprendre une suggestion faite jadis par Evans-Pritchard : nous userions, selon les circonstances, de deux modes de pensée autonomes, ayant chacun sa cohérence, donc sa rationalité propre. Ce serait une tâche commune à la psychologie et à l'anthropologie que de mettre en œuvre une telle suggestion.

3°- En dépit des critiques répétées, la théorie représentationnelle tient. Cependant la brèche s'élargit entre les tenants d'une interprétation solipsiste (Chomsky, Fodor, etc.) et ceux, de plus en plus nombreux (Putnam, Burge, Laudan, etc.), qui se rallient à une interprétation collectiviste, selon laquelle significations, règles d'inférence, voire compétences linguistiques (Kripke) sont mises en œuvre par une communauté, en public. On voit poindre ici l'idée que toute cognition est une communication, que celle-ci est le chaînon manquant (ou manqué selon Zajonc) de toutes les théories dominantes. Mais il est important de souligner que dans ce cas, les représentations mentales ne sont plus dans la boîte crânienne. Elles sont aussi entre individus, groupes et milieux. Autant dire qu'elles sont en priorité sociales, ce qui change profondément la nature des phénomènes à expliquer.

Toutes ces perspectives sont extrêmement mouvantes, mais non pas arbitraires. Elles nous rappellent qu'il y a peu de choses qui soient figées quant aux fondements des sciences cognitives. Les articles réunis dans cette section ne visent pas à une remise en cause. Mais leur choix s'inscrit, fort librement, dans une perspective d'ouverture d'une science en train de se faire.

Serge Moucovici, directeur d'études à l'École des hautes études en sciences sociales.

LA FORMALISATION DES RAISONNEMENTS DANS LES SCIENCES DE L'HOMME

L'analyse des mécanismes de l'argumentation dans les textes savants ravive les débats relatifs au statut des "humanités", entre science et littérature.

Jean-Claude Gardin

Pour beaucoup, les approches formelles dans les sciences de l'homme se confondent avec le recours à un outillage mathématique appliqué à des données numériques. Les données dites qualitatives ont cependant été soumises très tôt à un traitement formel, en archéologie notamment, consistant à simuler sur ordinateur les raisonnements que pratiquent les chercheurs, avec ou sans mathématique. Une première expérience eut lieu il y a trente ans sur un sujet d'histoire ancienne : la reconstitution du réseau de relations économiques entre l'Assyrie et l'Anatolie au début du 2^e millénaire av. J.-C. à partir d'une analyse des lettres que s'envoyaient les marchands établis dans ces deux régions. La démarche revenait à exprimer, sous forme d'un programme, la suite des opérations intellectuelles pratiquées par l'assyriologue pour passer de la masse d'informations parcellaires contenues dans ces textes (tablettes d'argile inscrites en écriture cunéiforme) à des hypothèses sur la structure et le fonctionnement du réseau. Le rôle de l'ordinateur était d'appliquer le raisonnement ainsi formalisé aux données fournies par le déchiffrement des tablettes recueillies par milliers dans les fouilles du Proche-Orient.

A l'époque où ce programme fut conçu (1960), on ne parlait guère de l'intelligence artificielle ou de l'étude des processus cognitifs dans les humanités. C'est pourtant de cela qu'il s'agissait déjà ; et l'on n'aurait aucune peine à traduire les procédures algorithmiques d'alors dans le langage déclaratif des systèmes experts. Aussi bien la question principale ne porte-t-elle pas sur le programme ou la machine : est-il possible, est-il souhaitable de formaliser nos raisonnements d'experts en choses humaines, avec ou sans informatique ?

Élucider les mécanismes de raisonnement

Mais qu'est-ce qu'une approche formelle sans mathématique ni informatique ? S'agissant de textes scientifiques, on cherche à représenter sous forme d'arbres d'inférences les opérations qui relient les hypothèses théoriques aux données d'observation. Le langage des sciences de l'homme étant ce qu'il est, la démarche rejoint l'analyse de l'argumentation en langage naturel telle que l'étudient les logiciens : l'objectif dans les deux cas est d'élucider les mécanismes de raisonnement et leurs fondements.

Le formalisme utilisé s'apparente à celui des moteurs d'inférence, de sorte

FORMALIZATION AND REASONING IN HUMAN SCIENCES - The representation of reasoning as inference trees helps grasp the mechanisms and foundations of argument in human sciences. Interesting questions follow concerning the position of the latter in three universes of discourse: science, literature and ordinary language.

que la simulation des raisonnements au moyen de systèmes experts est un prolongement possible de l'entreprise. Possible mais nullement obligé : le "paradigme du calcul" n'est en l'espèce ni l'inspiration, ni la visée principale. Les malentendus qui règnent à cet égard sont tenaces. On charge ces recherches formelles de noirs desseins : ne marquent-elles pas un retour aux ambitions scientistes du positivisme, étendues à l'ordre humain ? Et ne veut-on pas, sous couvert de l'intelligence artificielle, sonner le glas du "raisonnement naturel" qui fait l'originalité des sciences de l'homme ? C'est passer un peu vite du descriptif au normatif : la formalisation n'est ici qu'un moyen de mettre à jour l'architecture logico-discursive de nos constructions savantes. L'accent est mis, ce faisant, sur les limites d'une idéologie ou d'une méthodologie calquées sur celles des sciences exactes. L'entreprise n'a donc aucunement pour but de faire entrer les humanités dans ce carcan : elle vise plutôt à les en affranchir, une fois les limites de l'interprétation scientifique atteintes, mais au prix d'une question insistante qu'il est dès lors difficile de laisser sans réponse : quel est le statut de nos raisonnements au-delà de ces limites ? Relèvent-ils d'un discours de "Tentre-deux", comme on se plaît à le dire, situé pour les uns entre science et littérature, pour d'autres entre des "logiques de champ" spécialisées et la "logique naturelle" du discours ordinaire ? N'est-il pas plus honnête d'admettre qu'il faut alors en venir ou revenir à la littérature, avec ses procédés et ses exigences propres, plutôt que d'en rester aux fadaïses de la voie moyenne ? Les débats récemment ouverts sur ce point sont le fruit le plus excitant des essais de formalisation que l'on vient d'évoquer.



Affiche annonçant une conférence intitulée "Computing in the Third Culture", Université de Bloomington, Indiana (USA), avril 1991 : l'argumentation dans les humanités, partagée entre les contraintes de la science (à gauche) et les libertés de la littérature ou du langage ordinaire (à droite). Création de Frank Morris, Center for Innovative Computer Applications, Office of University Computing, Indiana University.

Jean-Claude Gardin, directeur de recherche au CNRS, unité "Archéologie de l'Asie centrale : peuplement, milieux, techniques" (UPR 315 CNRS), 23, rue du Maroc, 75940 Paris Cedex 19.

LE TRAITEMENT COGNITIF DES "OBJETS" SOCIAUX

La plus grande partie de l'activité cognitive de l'homme est consacrée à l'interprétation des données de l'environnement social et à la régulation du comportement dans cet environnement.

Michel Piolat

L'étude de la *cognition sociale* correspond à la tentative d'appliquer à la connaissance du monde social les principes de l'heuristique cognitive en psychologie. Elle vise à établir, sur le plan structurel, comment sont organisées les représentations mentales du monde social et, sur le plan fonctionnel, comment sont traitées les informations externes et les connaissances activées dans l'interaction sociale. En matière de perception, de jugement, de mémoire, etc., des informations relatives aux personnes, aux groupes, aux situations, le traitement des objets sociaux obéit aux lois générales de la cognition ; il présente aussi des spécificités.

Prenons-en un exemple parmi beaucoup d'autres possibles. Sur le plan formel, la relation de similitude entre deux objets A et B est une relation symétrique. A ressemble à B autant que l'inverse. Sur le plan psychologique, l'estimation de la similitude entre deux objets résulte d'un jugement comparatif. Or les jugements de similitude ne sont pas toujours symétriques. Dans certaines conditions, nous estimons qu'il y a plus de ressemblance entre A et B quand A est comparé à B (B est pris comme point de référence) que quand B est comparé à A (A est alors point de référence). Une telle asymétrie est constatable quand un des deux objets, du fait de ses propriétés, est, plus que l'autre, habituellement pris comme point de référence : par exemple, on compare plus volontiers un objet peu connu à un objet connu que l'inverse. Le phénomène qui vient d'être évoqué est un biais cognitif très général, largement étudié par les psychologues du jugement.

Que les "objets" à comparer soient des personnes – en psychologie sociale, ce type de comparaison a été étudié bien avant la "révolution" cognitiviste – n'empêche pas le recours au paradigme expérimental de l'asymétrie du jugement de similitude décrit plus haut (voir figure). On peut ainsi aborder des questions du genre : "quelles personnes ont valeur de

référence pour d'autres personnes ?", "quelles sont leurs caractéristiques ?", ou, plus fondamentalement "qu'est-ce qu'un point de référence social ?". La familiarité d'une personne, sa typicité dans une catégorie sociale, sa visibilité au sein d'un groupe sont autant de facteurs d'asymétrie interpersonnelle qui ont été étudiés de cette façon. Dans ces études qui importent en psychologie sociale un modèle et des procédures expérimentales empruntées à la psychologie cognitive, c'est l'accessibilité de certaines informations relatives aux personnes qui est considérée comme dé-



Aménagé à comparer ces deux photos de personnes qu'ils ne connaissent pas, les sujets estiment, en moyenne, que la femme ressemble plus à l'homme que l'homme à la femme. Plus grande valeur de référence sociale du masculin.

terminant *cognitif* de la référence sociale. Le niveau d'explication invoqué renvoie exclusivement aux propriétés et aux limites calculatoires du système humain de traitement de l'information (SHTI).

Autrui ressemble plus à soi que soi à autrui

Ce niveau d'explication ne suffit pas toujours. Par exemple, les comparaisons soi-autrui sont difficilement assimilables aux comparaisons entre objets. Ici, un des termes comparés (soi) est cognitivement et socialement impliqué dans la comparaison. L'application du paradigme de l'asymétrie du jugement de similitude aux comparaisons soi-autrui (notamment par Codol en France) a montré que les explications des biais d'autocentrisme (autrui

COGNITIVE PROCESSING OF SOCIAL "OBJECTS" - The introduction of data processing models and methods into social psychology helps explain the structural and functional continuities present in the processing of social and other types of knowledge. New functional problems connected to the specificity of cognitive processing in social context can thus also be taken into account.

ressemble plus à soi que soi à autrui) constatés dans ce type de comparaison sont à rechercher du côté des processus non-conscients de défense et d'affirmation de l'identité personnelle et sociale. En s'intéressant à de tels biais "motivacionels", on ne quitte pas le champ de la cognition. La raison d'être de ces biais de

jugement (mais aussi de certains modes de fonctionnement de la mémoire, du raisonnement, du langage, etc.) est la régulation du comportement social et de l'identité psycho-sociale de l'individu. Cette régulation est en permanence assurée par le SHTI au cours de son activité, car elle est une des conditions de cette activité. Il y a là une différence entre cognition humaine et cognition artificielle dont les sciences cognitives ne sauraient se désintéresser. L'étude de la cognition sociale peut à juste titre se présenter comme une approche intégrative, apte à rendre compte, pour sa part, de cette différence.

Michel Piolat, maître de conférences à l'Université de Provence, UFR de psychologie et des sciences de l'éducation, 29, avenue Robert Schuman, 13621 Aix-en-Provence.

LES REPRÉSENTATIONS SOCIALES

La psychologie sociale contribue au champ des sciences cognitives avec le paradigme des représentations sociales, formes de connaissance dont le caractère social tient à leur mode d'élaboration, leur partage, leur fonction dans l'interaction avec le monde et les autres.

Denise Jodelet

En psychologie sociale, les recherches sur la connaissance s'orientent selon deux traditions différenciant par l'extension des domaines de savoir référés et les paradigmes utilisés. La première porte sur la cognition sociale, entendue comme connaissance d'objets de nature sociale (individus, groupes, relations sociales, etc.), et à l'étude de laquelle on applique le modèle classique du traitement de l'information en se centrant sur les fonctionnements cognitifs intra-individuels. La seconde s'intéresse, avec les représentations sociales, à l'ensemble des connaissances courantes, dites de sens commun, quel que soit l'univers (matériel, pratique, idéal, humain) auquel elles ressortissent, et s'attache aux facteurs sociaux et culturels qui interviennent dans la construction des savoirs et de leurs objets.

L'étude des représentations sociales, initiée il y a trente ans sous l'impulsion de chercheurs français, constitue aujourd'hui un domaine autonome mobilisant une large communauté scientifique, en Europe notamment. Son originalité est de rendre compte des processus et contenus de la connaissance en se rapportant aux conditions et contextes sociaux où celle-ci est produite et communiquée, et aux finalités qu'elle sert dans le rapport à l'environnement matériel, humain et symbolique.

La notion de représentation sociale renvoie à une activité d'appropriation et d'élaboration psychologique et sociale de la réalité extérieure à la pensée. Elle est abordée sous le double aspect constitué (les produits) et constituant (les processus) de l'activité mentale. À ce titre, son approche présente des parentés avec celle des représentations cognitives. Mais elle en diffère par la mise en évidence du caractère social de cette forme de connaissance qui établit une relation entre un objet circonscrit dans l'environnement (matériel, social ou idéal) et un sujet (individuel ou collectif), solidaire d'autres sujets par l'appartenance, la participation ou la communication sociales.

Une voie de passage entre psychologie et sciences sociales

Les dimensions sociales de la représentation peuvent être rapportées à plusieurs facteurs : effet de l'insertion du sujet connaissant dans un réseau de relations et de communications sociales ou de sa position dans la structure des rapports sociaux ; extension du partage de la représentation qui, tout à la fois, manifeste et maintient le lien social dans un ensemble culturel ou social donné ; fonctions et efficacité sociales d'une forme de connaissance qui est pratique en ce qu'elle sert de guide d'action, orientant le rapport au monde et aux autres, de grille de lecture de la réalité, fournissant cadres catégoriels et codes de communication. Tributaire de l'échange social qui implique des conventionnalisations et intrique des procédures de négociation, la représentation ne peut se réduire à un simple processus intra-individuel ; elle contribue à forger une vision commune à un ensemble social ou culturel donné dont elle exprime et sert les valeurs, besoins, intérêts et désirs. À ce titre, la représentation sociale s'apparente à d'autres systèmes de connaissances et d'idées socialement produits comme la science ou l'idéologie. Ses parentés la situent au carrefour de la psychologie et des sciences sociales, disciplines entre lesquelles elle établit une voie de passage, en tant que concept transversal.

La pluralité des aspects référant au caractère cognitif et social des représentations trouve un écho dans la variété des recherches qui l'étudient, en appui sur diverses méthodologies de recueil et traitement des données (expérimentation, études de terrain d'une part, analyses de champs sémantiques, de similitudes ou multivariées, d'autre part). Certaines recherches prennent pour matériau des représentations objectivées et instrumentalisées dans le discours social (verbal ou iconique) pour analyser un état des savoirs et significations concernant un objet du monde social, examiner la dynamique de leur production et de leur liaison aux pratiques, aux interactions, et aux prises de position sociales. Les représentations sont alors étudiées comme champs composés d'éléments variés (in-

SOCIAL REPRESENTATIONS - The field of social representation studies is a contribution to social psychology of knowledge. At the meeting point of psychological and social disciplines, the paradigm of social representations is presented together with the phenomena and processes it encompasses and the research methods and perspectives it involves.

formations, opinions, attitudes, images, valeurs, etc.) et structurés par des principes organisateurs. D'autres recherches se focalisent sur les aspects structurels de la représentation qui est alors considérée comme noyau organisateur et générateur de significations. Les états et propriétés de ces noyaux présentent des affinités avec ceux des modélisations de la représentation cognitive (schèmes, réseaux, structures mémorisées, etc.). Leurs éléments sont examinés, dans leur centralité quantitative et qualitative et dans leur stabilité, en relation avec les autres éléments de la représentation et les pratiques.

Deux processus majeurs, l'objectivation et l'ancrage

Par ailleurs, deux processus majeurs concernant la formation et la dynamique des représentations sociales ont été mis en évidence. L'objectivation rend compte de l'intervention des cadres sociaux (normes, valeurs, codes, etc.) et des contraintes de la communication dans la sélection et l'organisation des éléments de la représentation. L'ancrage rend compte de l'intégration des informations nouvelles dans les systèmes de savoirs et de significations pré-existants. Ces deux processus mettent également en évidence la façon dont ces éléments sont réintroduits, au titre d'instruments opératoires, dans l'interprétation des états du monde et dans l'interaction avec les autres.

L'approche des représentations sociales s'est avérée heuristique pour l'analyse de la régulation des phénomènes cognitifs. Elle s'offre ainsi comme un paradigme alternatif à celui du traitement classique de l'information dans la mesure où elle assure le lien avec les sciences de la société, de l'expression et de la culture.

Denise Jodelet, directeur d'études à l'Ecole des hautes études en sciences sociales, directeur du Laboratoire de psychologie sociale, d'analyse des représentations, du langage et de la communication, 105, boulevard Raspail, 75006 Paris.

MÉCANISMES COGNITIFS SPONTANÉS ET ÉTUDE SCIENTIFIQUE DE L'HOMME

L'homme peut s'immuniser contre l'idée que ses comportements et ses attitudes sont les produits de déterminismes naturels.

Jean-Pierre Deconchy

Un intérêt croissant va à l'étude des processus cognitifs qui, dans la vie quotidienne, incitent l'homme à attribuer des causes à ce qui arrive, à ce qui lui arrive et à ce qui arrive aux autres. Cet intérêt porte principalement sur les causes qui relèvent des dispositions et des décisions du sujet (causes internes) ou des déterminants situationnels et environnementaux de ses conduites (causes externes). Plus rarement, cette étude porte sur la façon dont le sujet humain réfère "spontanément" la production de ses comportements, de ses attitudes et de ses conduites (ou ceux de ses congénères) aux déterminismes naturels constitutifs de son espèce : ceux-là même dont les sciences de la nature travaillent à établir les mécanismes. Il n'est pas certain qu'en passant de la "représentation spontanée" de ces déterminismes naturels à leur connaissance scientifique, il ne reste aucune trace de ces représentations dans cette connaissance.

Des travaux expérimentaux tendent à établir que, lorsque l'information porte sur l'homme, un faisceau de stratégies cognitives "travailleraient" à ce que le sujet humain soit immunisé contre l'idée que la production des comportements, des attitudes et des conduites peut être adéquatement expliquée par des déterminismes naturels constitutifs de l'espèce. A ne prendre pour appui que des travaux déjà publiés, on peut évoquer quelques sites cognitifs où intervient cette immunisation.

Le cerveau, un organe "prestigieux"

L'appel au système nerveux central, en tant que lieu explicatif de la production des comportements, des attitudes et des conduites, opère surtout quand la représentation du système nerveux central est détachée de l'image de ses insertions biologiques et anatomiques. Autrement dit, le "cerveau", avec son prestige représentationnel, est plus facilement perçu comme contribuant à la production des comportements, des attitudes et des conduites, quand on "fait oublier" qu'il est une pièce anatomique du corps humain.

Cette production est si difficilement susceptible d'explication causale que les modèles comportementaux établis sur l'animal sont perçus comme transférables à l'homme dans la mesure où ils ont été

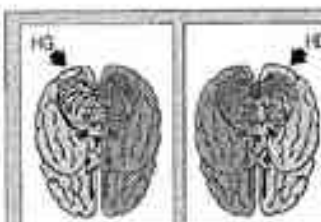
établis par voie d'observation descriptive plutôt que par voie d'expérimentation prédictive.

La représentation de "l'espèce humaine" (à l'œuvre dans l'évaluation éthique et cognitive des techniques médicales et orthogénétiques, par exemple) serait interprétée comme plus explicative des données empiriques relatives à un sujet humain particulier que ces données ne contribueraient à construire la représentation de l'espèce. Dans l'évaluation des dangers d'une pollution atmosphérique ou d'une intervention sur l'embryon, par exemple, les risques bio-comportementaux courus par "l'espèce" sont perçus comme supérieurs aux risques courus par "l'individu", ceux-ci étant d'ailleurs renforcés par l'évocation préalable de ceux-là (sans réciproque). Quand il s'agit de l'animal – notamment en situation de pollution –, on constate des déplacements totalement inversés entre la représentation de l'individu et celle de l'espèce. L'individu humain soutiendrait ainsi avec son "espèce" des rapports identitaires inversés par comparaison aux rapports que le sujet perçoit entre les "individus" animaux et leurs propres espèces. Fondement cognitif, peut-être, d'un certain nombre d'anthropologies à plus ou moins forte diffusion culturelle qui considèrent comme allant de soi la distinction "générique" entre l'animal humain et l'animal non humain.

SPONTANEOUS COGNITIVE MECHANISMS AND THE SCIENTIFIC STUDY OF MAN - The way in which the human individual "spontaneously" attributes his behavior, his attitudes and conduct to the natural determinism of his own species is studied. It is not certain that the passage from the "spontaneous representation" of these natural determinisms to a scientific approach corresponds to a simply alternative model.

Deux harmoniques à ces mécanismes représentationnels et socio-cognitifs font eux-mêmes l'objet de recherches : la constatation de la faible interaction entre ces mécanismes et les adhésions idéologiques particulières (croyances religieuses, options politiques, etc.) ; les modalités du transfert éventuel de ces stratégies spontanées à l'épistémologie des sciences de l'homme. Une question, aussi : serait-il "naturel" à l'homme de s'immuniser cognitivement contre l'idée que ses comportements, ses attitudes et ses conduites et que ceux de ses congénères pourraient être expliqués "scientifiquement" et par référence aux sciences de la nature ? Une "illusion", cognitive celle-ci, dont on peut tenter de présumer l'avenir.

Jean-Pierre Deconchy, professeur à l'Université Paris X, directeur de l'équipe de recherche Représentations sociales et processus idéologiques, 200, avenue de la République, 92001 Nanterre Cedex.



Le rôle du système nerveux central fait l'objet de représentations complexes.

A des sujets (scolarisés en deçà du baccalauréat) répartis en deux groupes, on présente en termes simples la spécialisation des hémisphères cérébraux : la "moitié" gauche renverrait aux façons de faire logiques, méthodiques et techniques ; la "moitié" droite aux façons de faire intuitives, imaginatives et affectives. On leur demande, à propos de comportements ou de conduites de genre cognitif ou technique (imitation, répétition

de tâches...) ou de genre interactif ou affectif (choix d'un partenaire stable, création artistique...) d'évaluer le rôle que joue soit la partie droite, soit la partie gauche du cerveau dans la production de ces comportements ou de ces conduites. Dans tous les cas, l'hémisphère droit est perçu comme plus actif.

A d'autres sujets, également répartis en deux groupes, on transmet la même information, mais sur un support illustré par une coupe du cerveau où l'on a renforcé, graphiquement, l'image de l'un ou l'autre hémisphère (comme indiqué dans la figure). Dans cette situation, on la référence à l'anatomie est renforcée, la spécialisation hémisphérique intervient dans les évaluations : l'hémisphère gauche est perçu comme plus actif que le droit dans les productions de genre cognitif ou technique, et l'hémisphère droit comme plus actif que le gauche pour les productions de genre interactif ou affectif. Quand il est visuellement et graphiquement renforcé, l'hémisphère gauche est perçu comme plus actif pour toutes les productions. Quand il est visuellement et graphiquement renforcé, l'hémisphère droit tendrait à être perçu comme moins actif pour les productions de genre cognitif et technique, et comme plus actif pour les productions de genre interactif et affectif.

COGNITION ET COMMUNICATION

La formation des connaissances et les stratégies de raisonnement ne sont pas des processus exclusivement individuels. L'étude expérimentale révèle le rôle joué par la communication au sein du groupe.

Ewa Drozda-Senkowska

La cognition et la pragmatique de la communication ne font que rarement l'objet d'études expérimentales conjointes. C'est paradoxal, dans la mesure où cognition et communication sont indissociables, tout autant par exemple que la formation des connaissances et leur acquisition par transmission sociale. La pragmatique était pourtant au centre des préoccupations il y a presque un demi-siècle ; mais on s'intéressait alors aux opinions et aux attitudes, et c'est la fonction de persuasion que l'on étudiait, non celle d'information. Lorsque l'intérêt se déplaça vers la cognition en tant que telle, on négligea les interactions entre individus et groupe, dont l'importance décisive avait pourtant été clairement établie auparavant, au profit des processus intra-individuels de traitement de l'information.

apparaît au début du processus de transmission, elle n'est pas forcément maintenue par la suite. Le nombre et le type des interventions des "anciens" diffèrent. Dans le premier cas, elles sont peu fréquentes et ont pour objectif d'inciter les "nouveaux" à retourner vers la consigne (vers l'objet). Dans le second, elles sont fréquentes et ont pour objectif de convaincre les "nouveaux" d'adopter une solution ancienne. Tout se passe comme si, lors de la transmission, les différents contenus du même problème à résoudre déclenchaient différents types d'échanges et, par là même, différentes fonctions de la communication, tantôt plutôt informative, tantôt plutôt persuasive.

Dans une autre série d'expériences, le problème consiste à évaluer la probabilité de certains événements (encadré 2). Tantôt la solution correcte, tout en étant contraire à l'intuition, n'exige que l'adoption momentanée d'un cadre théorique spécifique (a). Il suffit alors qu'un seul

COGNITION AND COMMUNICATION - Cognition and the pragmatic study of communication are seldom the subject of joint experimental studies in psychology. Each discipline develops its own paradigms. This is quite a paradoxical state of affairs. If it is accepted that thinking is also a collective affair and that knowledge is formed within the process of transmission and social exchange. Two experimental examples show the importance of the role communication plays in cognitive activity.

membre du groupe propose ce cadre pour que le groupe l'adopte. Ce n'est pas le cas lorsque, dans le problème, le sens commun et les idées préconçues entrent fortement en conflit avec les savoirs théoriques. Quand pour résoudre un problème correctement, il faut véritablement vaincre le sens commun, le groupe adopte une solution correcte si l'on arrive à le convaincre. Pour cela, il faut que la solution soit proposée et soutenue par la majorité des membres (b).

Ces activités mettent en jeu, on le voit, le processus de communication comme moyen par lequel les individus constituent leurs connaissances, découvrent une solution, en informent les autres et les persuadent de sa validité. La persuasion et l'information apparaissent comme des modes d'échanges liés au type et au contenu des problèmes traités. Et les activités cognitives apparaissent comme les parties intégrantes d'un contexte social et culturel.

Ewa Drozda-Senkowska, maître de conférences à l'Université Paris X, UFR de sciences psychologiques et de sciences de l'éducation, 200, avenue de la République, 92001 Nanterre.

RECHERCHE D'UNE SOLUTION AVEC TRANSMISSION SOCIALE, CAS ABSTRAIT

Après avoir présenté aux sujets un losange noir, un rond blanc, un rond noir et un losange blanc, l'expérimentateur explique qu'une figure est un "bidule" si et seulement si elle a une certaine couleur ou une certaine forme mais pas les deux à la fois, et que le losange noir est un bidule. Le problème est de classer les figures restantes en "bidule", "non-bidule", "indéterminée". Seuls 18 % des sujets, pris individuellement, répondent correctement que le rond blanc est un bidule et que les deux autres figures sont des non-bidules.

(encadré 1)

Pour étudier en laboratoire le phénomène de la transmission sociale des savoirs, on charge un groupe de rechercher une solution consensuelle à un problème que la plupart des individus échouent à résoudre seuls. Dans la première série d'expériences, il s'agit d'opérer une classification contraire à nos habitudes (encadré 1). Chaque groupe, composé de quelques "anciens" et de "nouveaux", garde les traces de la génération précédente. Plusieurs générations de groupes sont confrontées à la résolution de problèmes analogues. Les résultats montrent que lorsque le contenu du problème est relativement abstrait et peu familier, la solution correcte apparaît assez vite (dans les deux premières générations) et se maintient ensuite. Quand le contenu est au contraire plutôt concret et familier, même si la solution correcte

RECHERCHE D'UNE SOLUTION CONSENSUELLE TRIBUTAIRE D'UN CADRE THÉORIQUE PRÉCIS

A - CONSULTER AVEC L'INTUITION : le simple appel du cadre suffit.

Le problème : on démographie à étudier les familles de six enfants, dont trois filles et trois garçons, en s'intéressant à l'ordre des naissances. Lequel des deux ordres suivants est le plus probable : (1) EFTGOG (2) FOGHGF ?

La réponse correcte : ils sont également probables.

La réponse la plus fréquente : (2) est beaucoup plus probable que (1).

B - CONSULTER AVEC L'INTUITION : l'émergence de la solution correcte exige qu'une majorité la défende.

Le problème : 70 ingénieurs et 30 avocats font l'objet d'une brève description individuelle. On tire au hasard l'une de ces descriptions : Jean a 42 ans, une bonne situation, il s'exprime avec aisance en public, il collectionne les livres et les meubles anciens, il s'intéresse à la politique. Quelle est la probabilité que Jean soit avocat ?

La réponse la plus fréquente : Jean a 90 % de chances d'être avocat.

Les sujets tendent donc à ignorer l'information sur la répartition des professions à l'intérieur de l'échantillon en faveur de l'information correspondant à l'idée préconçue qu'ils ont d'un avocat.

(encadré 2)

RATIONALITÉ SITUÉE ET SAVOIR COLLECTIF

Des agents interdépendants ne peuvent en général coordonner leurs actions que s'ils ont recours à des formes collectives de savoir. Se créent ainsi des dispositifs cognitifs collectifs, objets d'études communs des sciences sociales et des sciences cognitives.

Jean-Pierre Dupuy,
Pierre Livet

En sciences sociales, le premier modèle de cognition distribuée avant la lettre est celui du marché. Pour la théorie de l'équilibre économique général, un état "efficace" de la société est obtenu si chaque agent, cherchant à maximiser son intérêt, se repère sur un ensemble de signaux, les prix, identique pour tous. Chacun connaît les prix et les tient pour donnés. L'économiste sait, lui, que les prix émergent du processus même par lequel les comportements des agents s'ajustent ainsi les uns aux autres. Mais cela implique un écart peu satisfaisant entre le savoir extérieur de l'économiste et le savoir des agents. Que se passe-t-il si le savoir extérieur est injecté dans le système ? Le courant des "anticipations rationnelles" travaille sur ce point. Et la théorie des jeux suggère que, pour ajuster leurs stratégies d'action en fonction des raisonnements que les autres font à leur sujet, les agents doivent non seulement partager un même savoir, mais encore savoir qu'ils le partagent. D'où le concept de "savoir commun". Un fait p est de savoir commun pour deux agents A et B si chacun non seulement sait p , mais encore sait que chacun sait p , cette itération allant à l'infini (le "paradoxe" de Conway dans l'encadré montre l'utilité de cette notion).

Or on connaît des situations où le moindre écart au savoir commun (l'itération ne peut aller à l'infini) suffit à rendre la coordination impossible. Pourtant on peut douter que nous fassions dans nos interactions des calculs infinis. D'où une définition du savoir commun en termes de "point fixe". Soit C_p le fait que p est de savoir commun. $C_p = "A \text{ et } B \text{ savent } (p \text{ et } C_p)"$. Quand on est au point fixe, on vérifie qu'une itération nous y ramène. Mais hors du point fixe, comment saurions-nous y parvenir ?

Gérer les situations d'incertitude

Des théories libérales de la complexité ont utilisé la notion de point fixe pour penser les règles du marché. Fruit d'une longue évolution, ces règles générales permettent le fonctionnement du marché

sans avoir à se soucier des situations particulières, et c'est pourquoi une fois apparues elles s'auto-renforcent, jouant le rôle d'un point fixe. Mais cela ne dit pas comment elles ont pu naître de situations locales particulières.

Retenons l'idée que les règles sociales, les conventions, sont des dispositifs cognitifs collectifs qui épargnent aux individus des efforts cognitifs dans leur coordination, en particulier dans la gestion des situations d'incertitude. Quand on ne sait pas précisément quelles tâches on aura à demander à celui qu'on embauche, on peut se fier au repère général que donne un diplôme. Son existence est un savoir partagé par tous, utilisé pour gérer une incertitude. Mais on peut aussi préférer embaucher quelqu'un dont on a observé en situation la capacité d'adaptation à des changements de la situation. On a proposé de définir une "situation" comme l'ensemble des événements et des relations de l'agent à ces événements. Or, troisième version du "savoir commun", ces situations elles-mêmes, y compris le fait que les agents perçoivent tel ou tel événement, peuvent être connues de tous

SITUATED RATIONALITY AND COLLECTIVE KNOWLEDGE - To be able to coordinate, people need collective forms of knowledge. Specific concepts such as situated rationality are necessary in order to account for these collective cognitive devices and the access different individuals have to them.

les acteurs, ce qui donne un "environnement partagé".

Certes nous ne pouvons démontrer que nos règles collectives sont d'environnement partagé. Mais nous pouvons, en partant des situations, éliminer les règles qui ne peuvent être d'environnement partagé, ou qui ne peuvent "survivre" d'une situation à une autre, sélectionner ainsi les règles collectivement accessibles, soit comme représentations collectives, soit comme savoir-faire collectif, et donc relier situations locales et spécificité du collectif.

Jean-Pierre Dupuy, directeur de recherche au CNRS, directeur du Centre de recherche en épistémologie appliquée (URA 1259, CNRS), professeur à l'École polytechnique, 1, rue Descartes, 75005 Paris.

Pierre Livet, professeur à l'Université de Provence, directeur de l'UFR Civilisations et humanités, Université de Provence, 29, avenue Robert Schuman, 13621 Aix-en-Provence Cedex 1.

Information donnée publiquement par Arthur : l'un d'entre vous au moins a un as.

1^{re} question :
Jean, sais-tu si Pierre a un as ?

1^{re} réponse de Jean : non.
Pierre ne dit pas qu'il sait que j'ai un as, alors qu'il sait que l'un au moins d'entre nous en a un. S'il n'avait pas eu d'as, il aurait alors su que j'en ai un. Donc, il a un as.

2^{me} réponse :
oui, Pierre a un as.

1^{re} question :
Pierre, sais-tu si Jean a un as ?

1^{re} réponse de Pierre : non.
Jean ne dit pas qu'il sait que j'ai un as, alors qu'il sait que l'un au moins d'entre nous en a un. S'il n'avait pas eu d'as, il aurait alors su que j'en ai un. Donc, il a un as.

2^{me} réponse :
oui, Jean a un as.



L'information donnée par Arthur a permis à Jean et à Pierre de tirer des conclusions nouvelles. Pourtant, elle était connue de chacun. Paradoxe : "Non, parce qu'avant d'être communiquée, la proposition 'l'un d'entre vous au moins a un as' n'était pas de 'savoir commun'".

Le "paradoxe" de Conway.

LA FORMALISATION DES CROYANCES EN ÉCONOMIE

La théorie de la décision et celle des jeux utilisent désormais la logique épistémique et les probabilités non additives pour rendre compte de la structure et de la révision des croyances des agents.

Philippe Mongin,
Bernard Walliser

La science économique élabore formellement un modèle de la décision qui est implicite dans le sens commun : parmi toutes les actions réalisables, les individus choisissent celles dont les conséquences paraissent les plus appropriées, compte tenu de leurs préférences et de leurs croyances. Traditionnellement, les économistes mettent l'accent sur le facteur "préférences", qu'ils représentent numériquement par des fonctions d'utilité. Mais ils sont aussi parvenus, quoique plus récemment, à raffiner beaucoup l'analyse du facteur "croyances", qu'ils appréhendent tantôt pour l'individu isolé, tantôt pour le groupe, le plus souvent statiquement, parfois aussi dynamiquement. Ces développements laissent entrevoir de fécondes analogies avec les recherches menées en logique épistémique et en intelligence artificielle.

Le choix d'un acteur face à l'incertitude

L'approche reçue, dite *bayésienne*, de la décision individuelle, décrit axiomatiquement le choix que ferait un acteur idéalement rationnel lorsqu'il est confronté à un ensemble de conséquences aléatoires, conditionnelles à l'apparition d'états de la nature. Les axiomes impliquent l'existence d'une loi de probabilité subjective sur les états et d'une fonction d'utilité sur les conséquences ; le critère de décision obtenu est la maximisation de l'espérance subjective d'utilité. La théorie contemporaine affaiblit les axiomes de façon à préserver l'existence de la fonction d'utilité, ainsi que le critère de maximisation d'une espérance mathématique ; mais celle-ci est prise, désormais, par rapport à une probabilité *non-additive*, qui s'apparente aux "capacités de Choquet", introduites naguère pour les besoins de la physique mathématique. Ces opérateurs étaient également apparus en intelligence artificielle sous le nom de "fonctions de croyance". Ils permettent d'éviter cer-

tains paradoxes connus des probabilités traditionnelles et semblent plus généralement dotés de bonnes propriétés épistémiques. On peut faire apparaître ce dernier point en axiomatisant directement les opérateurs comme le feraient les logiciens ; en considérant le cas particulier des valeurs 0 et 1, et même d'une nombre fini de valeurs, on décrit facilement les "fonctions de croyance" en calcul propositionnel du premier ordre. Les systèmes auxquels on parvient appartiennent à la logique modale épistémique et se rapprochent de S4 ou KD4, qu'emploient souvent les informaticiens.

La théorie reçue de la décision individuelle comporte également un volet dynamique : les agents doivent réviser leurs probabilités subjectives lorsqu'ils reçoivent un message nouveau en suivant la très classique *règle de Bayes*. Les défauts de cette procédure, qui ne s'applique pas aux événements de probabilité nulle, ont conduit certains auteurs à se rapprocher d'autres champs. Les spécialistes de la logique épistémique, dans sa version dynamique, contournent le problème d'un message contradictoire avec le savoir initial en retirant de ce dernier les propositions de plus faible "enracinement épistémique" jusqu'à restaurer la cohérence ; ces travaux sont directement reliés aux développements actuels sur les règles de déduction non monotones. Les théoriciens de la probabilité non-additive, à ce point, hésitent encore entre différents formalismes possibles de la révision ; mais des distinctions intéressantes se font jour d'après la nature de l'opérateur initial de croyance, du message (certain ou incertain) et du rôle (effectif ou virtuel) que joue le temps dans le processus.

La stratégie d'un acteur en situation de jeu

La théorie des jeux – qui est devenue l'outil d'analyse le plus fondamental, peut-être, de l'économiste contemporain – décrit les stratégies d'agents idéalement rationnels placés dans une situation interactive, et surtout les équilibres auxquels elles conduisent. L'incertitude est d'une

BELIEF FORMALIZATION IN ECONOMICS - Economic theory usually describes the agent's uncertainty probabilistically. However, economists have recently resorted to epistemic logic and the nonadditive probability theory to formalize the static and dynamic properties of individual beliefs. Together with the agent's preferences, these beliefs determine his rational choice. All individual behaviors finally result in a game equilibrium, sustained by crossed expectations at successive levels.

tout autre nature que dans les modèles précédemment évoqués. Il faut maintenant tenir compte du phénomène des anticipations croisées à niveaux successifs : A se représente l'action de B en simulant le processus de pensée de B, c'est-à-dire en tenant compte de la représentation que B a de son action à lui, A ; et ainsi de suite. Sous l'influence de ses fondateurs, von Neumann et Morgenstern, la théorie s'est tout d'abord dispensée d'analyser précisément ce phénomène et la régression infinie qu'il implique. Elle a défini abstraitement différents concepts d'équilibre, dont le plus important est celui de Nash, où chaque stratégie d'un joueur est la meilleure réponse à celle de l'autre. Mais cette approche simplificatrice montre aujourd'hui ses limites, amenant nombre d'auteurs à s'interroger sur les mécanismes cognitifs menant à l'équilibre de Nash. Ils sont alors conduits soit à élargir ce concept, soit, plus couramment, à le "raffiner" en proposant des notions plus précises qui incorporent, chacune, une analyse particulière du phénomène des anticipations croisées. L'analyse pré-suppose normalement la validité de l'approche bayésienne en statique et en dynamique. Mais elle retrouve, tout naturellement, des notions de la logique épistémique ou de la théorie informatique des systèmes répartis, en particulier celle de *connaissance commune*.

Philippe Mongin, directeur de recherche au CNRS, Département et laboratoire d'économie théorique et appliquée (UMR 109 CNRS/EHESS/ENS), Ecole normale supérieure, Bât. A, 48, boulevard Jourdan, 75014 Paris.

Bernard Walliser, professeur à l'École nationale des Ponts et Chaussées, Département d'économie, 28, rue des Saints-Pères, 75007 Paris.

DE L'ATTRIBUTION D'INTENTION À LA COMMUNICATION

Plus fondamentalement encore que la capacité de décoder un signal linguistique, c'est la capacité d'attribuer à autrui un état mental qui rend possible la communication humaine.

Dan Sperber

Il y a deux façons de se représenter le comportement d'un être animé, soit comme un enchaînement de mouvements corporels, soit comme la mise en œuvre d'une intention. Décrire un comportement volontaire comme la mise en œuvre d'une intention est généralement bien plus économique et plus informatif qu'une description en terme de mouvements.

Attribuer à autrui une représentation mentale, qu'il s'agisse d'une intention ou d'une croyance, c'est se représenter à soi-même une représentation d'autrui. Il faut pour cela être capable de former des représentations de second ordre, ou "méta-représentations". Une capacité méta-représentationnelle rudimentaire semble être déjà présente chez certains primates non humains. Un organisme capable de former des méta-représentations est, de ce fait, doté d'une source d'information indirecte sur le monde. Un individu A voit un individu B ramasser des champignons inconnus de lui. A suppose que B ramasse ces champignons pour les manger et en infère que ceux-ci sont comestibles. Sans qu'il y ait langage ni, à proprement parler, communication, des individus dotés de capacités méta-représentationnelles peuvent néanmoins se transmettre de l'information.

Un individu capable de méta-représentations peut former l'intention d'agir sur les états mentaux d'autres individus pareillement dotés. L'individu B peut ramasser des champignons devant l'individu A qui hésite à en faire autant, et ce afin d'informer A de ce que ces champignons sont comestibles. Un individu A capable de se représenter les méta-représentations d'un individu B – capable donc de méta-représentations de deuxième ordre – peut comprendre que B agit de façon à l'informer. A peut comprendre que B n'a pas seulement l'intention de ramasser des champignons pour les consommer ; en les ramassant sous les yeux de A, B entend l'informer de ce que ces champignons sont comestibles.

Informer de l'intention d'informer

Un organisme capable de méta-représentations du troisième ordre pourra former l'intention de faire reconnaître à autrui son intention de l'informer, et ce

afin de l'informer encore plus sûrement. Quand l'intention d'informer est ainsi rendue manifeste, on a affaire à de la communication proprement dite. Pour que l'information communiquée soit acceptée, il faut que le communicateur soit reconnu comme fiable et son information comme digne d'attention. Ainsi, tout communicateur, du seul fait de communiquer, se présente comme fiable et présente son information comme pertinente.

Dans le cadre de la communication ainsi conçue, et dans ce cadre seulement, l'utilisation de moyens symboliques peut servir à la transmission d'information. Au lieu de ramasser les champignons et de mettre ainsi en évidence son intention de les manger, le communicateur peut simplement esquisser le geste d'en porter un à sa bouche, et mettre ainsi en évidence son intention d'informer celui auquel il s'adresse du fait qu'il s'agit d'une espèce comestible. Un énoncé linguistique, de même, informera son destinataire, non pas directement de l'état de chose décrit dans l'énoncé, mais de l'intention qu'a le communicateur de l'en informer.

FROM ATTRIBUTION OF INTENTIONS TO COMMUNICATION – According to a standard view, the existence of linguistic communication enables humans to discover each other's thoughts. According to a more recent view, this causal order ought to be reversed: the ability to attribute mental states to others – an ability found in rudimentary form in other primates – could have been at the source of human communication.

La communication peut donc être vue comme une exploitation de la capacité qu'ont les humains de se représenter un comportement en attribuant à autrui des croyances et des intentions souvent complexes. Cette conception de la communication s'appuie sur des recherches de psychologie cognitive et de psychologie sociale qui tentent d'analyser les capacités méta-représentationnelles humaines, leur développement phylogénétique et ontogénétique, et leur rôle social. L'étude de la communication dans cette perspective vise à développer un modèle cognitif où s'articulent d'une part les processus de codage et de décodage linguistique, et d'autre part les processus inférentiels qui appartiennent à la compréhension verbale à une forme de raisonnement inconscient et spontané.

Dan Sperber, directeur de recherche au CNRS, Centre de recherche en épistémologie appliquée (URA 1259 CNRS), Ecole polytechnique, 1, rue Descartes, 75005 Paris.



Jeunes chimpanzés en train de s'alimenter (D. A. Dreyer - Jacana). Les représentations de second ordre, ou méta-représentations, sont déjà présentes sous une forme rudimentaire chez certains primates non humains.

Le tournant cognitif en philosophie

Les articles sur l'induction, la sémantique, la pragmatique et les attributions d'intention ont déjà révélé au lecteur la contribution de la philosophie des sciences et de la philosophie du langage aux sciences cognitives. La rubrique *Philosophie* elle-même atteste qu'un "tournant cognitif" a désormais succédé au "tournant linguistique". Ce tournant cognitif favorise le naturalisme et promeut la "philosophie de l'esprit" (ou de la "pensée"). Le lien entre la philosophie et la logique mathématique, instauré par le tournant linguistique, n'est pas rompu pour autant. En témoigne la présentation ici-même de la notion logique de machine de Turing qui a servi dans les années 1960 d'inspiration aux modèles mécanistes de la pensée.

Le naturalisme s'identifie au souci de fournir des explications causales aux questions traditionnelles de l'épistémologie sur l'acquisition des connaissances et sur la formation des croyances justifiées et injustifiées. Quoiqu'elle ait détrôné la philosophie du langage, la philosophie de l'esprit puise largement dans ses concepts. Les philosophes de l'esprit veulent résoudre l'énigme de l'intentionnalité : qu'est-



R. Magritte, *Le chemin des Dames*
(© ADAGP Paris 1992, C. Diers - Artphoto).

ce qui confère à certains objets physiques le pouvoir de représenter d'autres objets physiques ? Etant naturalistes, ils identifient les processus cognitifs à des processus cérébraux, et ils supposent que les symboles non mentaux (linguistiques) tirent leur pouvoir représentationnel de l'intentionnalité des représentations mentales, et non l'inverse. Le lecteur trouvera ici des précisions sur ce programme de naturalisation de la représentation.

Les êtres humains ont non seulement la capacité de construire des représentations de leur environnement ; ils ont de surcroît la capacité métareprésentationnelle de former des représentations de représentations, par autrui, de leur environnement. La communication verbale et non verbale dépend manifestement de cette capacité métareprésentationnelle qui intéresse conjointement les sciences cognitives et les sciences sociales. Dans le cadre de "la

théorie de l'esprit", les psychologues cognitifs explorent aujourd'hui l'évolution phylogénétique de cette capacité métareprésentationnelle, son développement ontogénétique chez les enfants normaux et ses altérations chez les enfants autistes.

Le tournant cognitif réhabilite la biologie longtemps éclipsée par la physique dans la philosophie des sciences. Un philosophe des sciences cognitives se demandera, par exemple, si la théorie de l'évolution des espèces par sélection naturelle milite contre l'idée que les sciences cognitives peuvent étudier indistinctement tous les systèmes – vivants et artefactuels – de traitement de l'information. Les philosophes naturalistes de l'esprit prolongent enfin la réflexion des philosophes des sciences sur la réductibilité ontologique et épistémologique entre niveaux de réalité et niveaux d'explication différents. Certains de ceux qui cherchent des ponts entre l'étude des fonctions cognitives et l'étude de leurs substrats biologiques tiennent les états de vigilance (dont le sommeil paradoxal) pour une passerelle privilégiée.

■ Pierre Jacob, chargé de recherche au CNRS.

LE MÉCANISME ET LA THÈSE DE CHURCH - TURING

Selon la thèse de Church-Turing, aucun mécanisme ou programme concevable n'a des possibilités théoriques de calcul supérieures à celles des frustes "machines de Turing".

Jacques Dubucs,
Jean Mosconi

Un algorithme est une procédure routinière, mécanique et uniforme permettant d'accéder, en un nombre fini d'étapes de nature élémentaire dont aucune n'exige d'ingéniosité ou de chance, à la solution d'une classe déterminée de problèmes (exemple : l'algorithme d'Euclide, qui permet de calculer le p.g.c.d. de deux entiers). Cette définition intuitive est assez précise pour justifier le caractère effectivement calculable de certaines fonctions (nous savons reconnaître un algorithme lorsque l'on nous en présente un !), mais trop vague pour nous permettre de refuser ce caractère à d'autres. La thèse de Church-Turing propose de résoudre cette difficulté en identifiant les fonctions calculables (au sens intuitif) aux fonctions calculables par une machine de Turing.

Une machine de Turing est un automate abstrait M constitué d'un ruban potentiellement infini divisé en cellules pouvant contenir des symboles, d'une tête mobile de lecture/écriture capable de passer par divers "états internes", et défini par une liste finie d'instructions du type $q \rightarrow s'$, $q \rightarrow D$ ou $q \rightarrow G$ ("si dans l'état q on observe le symbole s , passer à l'état q' et écrire s' (ou se déplacer à droite, ou à gauche)"). On dit que M calcule la fonction f si pour chaque entier a , M commençant son travail avec l'entier a "codé" sur son ruban, le termine avec sur son ruban le code de l'entier $v = f(a)$ (en fait ce qu'accomplit la machine est un calcul symbolique, c'est l'interprétation qui est numérique).

Rien d'effectif ne paraît hors de portée des Machines de Turing

Bien qu'il soit évidemment impossible de démontrer la thèse de Church-Turing, on a des raisons convaincantes de penser que le fonctionnement d'une machine de Turing fournit l'analyse correcte de la notion pré-systématique de procédure effective ou mécanique :

- on n'a jamais trouvé d'exemple probant de fonction calculable qui ne soit pas également Turing-calculable ;
- la classe des fonctions Turing-calculables est "robuste" (une machine plus sophistiquée, dotée de plusieurs rubans ou pouvant "choisir" entre un nombre fini d'actions possibles, pour un état interne et un symbole observé donné, ne calculerait pas une seule fonction de plus) ;
- toutes les autres tentatives pour caractériser les fonctions calculables ont donné naissance à des classes de fonctions (λ-définissables, récursives, etc.) qui se sont avérées coextensives à cette classe. Rien d'essentiel à l'acte humain de calcul ne paraît donc hors de portée des machines de Turing.

La thèse de Church-Turing permet de donner une portée générale, en termes de machines ou procédures mécaniques quelconques, à des résultats négatifs comme le théorème de Gödel ou le théorème sur l'arrêt des machines de Turing : il n'existe aucune machine de Turing (donc d'après la thèse, aucune procédure mécanique) permettant de décider si une machine donnée M s'arrêtera ou non après avoir calculé une valeur lorsqu'elle commence son travail avec sur son ruban un entier n donné. Ces résultats négatifs, qui ne

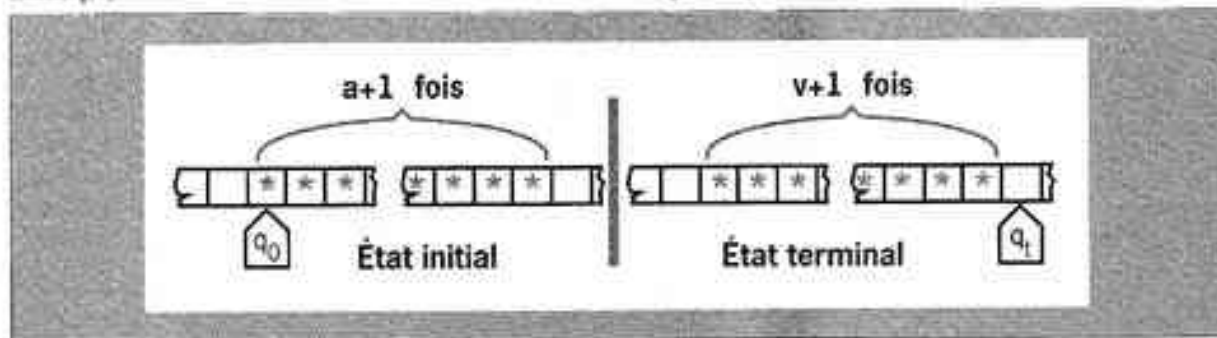
MECHANISM AND CHURCH-TURING'S THESIS - Church-Turing's thesis is the rather plausible (but not provable) claim, that computability by arbitrary mechanical procedures is identical with computability by Turing machines - a well-defined class of abstract automata. Thus no mechanism could escape the computational limitations of Turing machines. Yet the thesis can also support some claims of Mechanism.

dépendent aucunement des particularités matérielles des dispositifs de traitement de l'information sur lesquels les procédures en question peuvent être mises en œuvre, ne sont pas susceptibles d'être démentis par l'évolution des connaissances ou le progrès des techniques et peuvent être comparés aux lois de la thermodynamique, qui valent pour tous les systèmes mécaniques, indépendamment des détails de leur agencement.

Il est cependant difficile d'invoquer la thèse de Church-Turing ou les résultats de "limitation" qui en dérivent pour contredire la doctrine mécaniste selon laquelle tout processus intelligent peut être simulé par une machine de traitement de l'information. Car, d'une part, la thèse de Church-Turing implique précisément qu'aucun contre-exemple effectif ne saurait être opposé au mécanisme. Et, d'autre part, le fait que les machines de Turing posent des problèmes pour lesquels n'existe aucune solution effective montre que les ordinateurs eux-mêmes peuvent présenter des comportements hautement complexes et imprévisibles.

Jacques Dubucs, chargé de recherche au CNRS, Institut d'histoire et de philosophie des sciences et des techniques, unité Histoire et philosophie des sciences (URA 1079 CNRS), Université Paris I, 13, rue du Four, 75006 Paris.

Jean Mosconi, maître de conférences à l'Université Paris I, unité Histoire et philosophie des sciences (URA 1079 CNRS), UFR de philosophie, 17, rue de la Sorbonne, 75231 Paris Cedex 05.



Machine de Turing calculant $f(a) = v$. Le nombre a est ici codé par $a+1$ étoiles.

INFORMATION ET REPRÉSENTATION

La notion de représentation est centrale en sciences cognitives. Les philosophes naturalistes tentent de la réduire à la notion d'information.

■ Pierre Jacob

Certaines représentations, mais non toutes (les phrases mais non les photographies), ont une structure syntaxique en constituants élémentaires. Mais toute représentation se rapporte à un objet distinct d'elle-même. Peut-on fournir une analyse matérialiste,



Tapisserie "La Dame à la Licorne" (détail). Musée de Cluny (D. Varga - Artphoto). La présente légende est une représentation verbale d'une reproduction d'une tapisserie originale qui contient une représentation iconique publique d'une représentation conceptuelle (mentale) d'un animal fictif.

physicaliste et naturaliste du fait qu'un objet physique (une photographie) peut en représenter un autre (Brigitte Bardot) ? A fortiori, un matérialiste peut-il expliquer le fait que certaines représentations – le mot "licorne" par exemple – ne dénotent aucun objet ? Soit deux objets physiquement indiscernables : une photographie de Bardot et une photographie de sa sœur jumelle. Un matérialiste peut-il expliquer que l'un de ces objets et non l'autre représente Bardot ?

Distinguons les représentations publiques ou externes et les représentations mentales ou internes présumées. Si les propriétés des premières, plus accessibles à l'observation, aident à explorer les propriétés cachées des secondes, en revanche il est naturel de supposer que ce sont les secondes qui – stockées dans les cerveaux de certains êtres vivants – confèrent aux premières leurs pouvoirs représentationnels ou leurs propriétés sémantiques, et non l'inverse. Parmi les représentations externes, on peut distinguer les représentations iconiques ou analogiques (comme les tableaux et les photographies) et les représentations propositionnelles ou digitales (comme les symboles linguistiques).

L'informatique, un laboratoire pour l'analyse conceptuelle des représentations mentales

Parmi les représentations internes, on distingue les images mentales (iconiques) des croyances et autres pensées propositionnelles (ou digitales). L'informatique est un laboratoire pour l'analyse conceptuelle des représentations mentales. Certains philosophes supposent l'existence d'un langage de la pensée qui serait aux représentations internes propositionnelles ce qu'est le langage-machine aux calculs d'un ordinateur – un médium de calcul mental. Dans cette conception, les langues publiques (naturelles ou artificielles) servent à la communication. Selon cette hypothèse, les représentations internes propositionnelles auraient une structure (syntaxique) en constituants : les symboles mentaux complexes seraient des séquences de symboles mentaux plus élémentaires.

Distinguons de surcroît entre une représentation directe de l'environnement (une photographie de Bardot) et une représentation de second ordre d'une représentation (une description verbale d'une photo de Bardot). Soit un énoncé linguistique : il représente la pensée du locuteur qui est elle-même une représentation (interne) de l'environnement. L'énoncé est donc une représentation (externe) de second ordre d'une représentation (interne) de l'environnement. On

INFORMATION AND REPRESENTATION – Representations are a challenge to physicalism. Internal representations are distinguished from external ones, analogical representations from digital ones. It is argued that representations of representations are interpretations. The question that needs to be answered is the following: Is representation reducible to information and function?

peut traiter les représentations de second ordre comme des interprétations. Ainsi, la traduction en français d'une phrase énoncée initialement en anglais est-elle une interprétation.

L'information étant une notion plus générale que la notion de représentation, on peut essayer de naturaliser celle-ci en la réduisant à celle-là. Admettons que chaque fois qu'une cause *c* produit un effet *e* conformément à une loi de la nature, l'effet *e* est porteur d'une information sur *c*. Une représentation est une information transmise par un système physique qui a pour fonction de transmettre cette information. Un thermomètre représente la température environnante parce que telle est sa fonction. En outre, dans un thermostat, non seulement la dilatation différentielle de la lame bi-métallique représente la température environnante, mais elle contrôle aussi le circuit électrique qui déclenche la mise en marche de la chaudière. Certains systèmes physiques – les artefacts – tiennent leur fonction du plan de leur ingénieur. Les systèmes biologiques aussi ont des états internes qui ont pour fonction de transmettre des informations et qui servent à coordonner l'action ou le comportement de l'animal ou de la plante. Les états représentationnels des êtres vivants tirent leur fonction tantôt de la sélection naturelle, tantôt de l'apprentissage.

La fonction de transmettre une information permet-elle une réduction naturaliste du contenu des pensées et des croyances (au sens ordinaire) ? La jauge à essence indique le niveau de carburant dans le réservoir du véhicule ; elle indique aussi que la batterie n'est pas déchargée. Mais la jauge à essence n'est pas un voltmètre.

■ Pierre Jacob, chargé de recherche au CNRS, Centre de recherche en épistémologie appliquée (URA 1259 CNRS), Ecole polytechnique, 1, rue Descartes, 75005 Paris.

TÉLÉOSÉMANTIQUE

Les théories téléosémantiques de la représentation mentale proposent de définir les contenus intentionnels par leurs fonctions biologiques et évolutives.

■ Pascal Engel,
Joëlle Proust

De nombreux philosophes ont proposé récemment d'expliquer la nature des représentations mentales en termes évolutionnistes. On appelle "téléosémantique" (ou quelquefois "biosémantique") une théorie d'après laquelle les contenus intentionnels sont déterminés par leur fonctions biologiques et par leur histoire évolutive.

Les conceptions téléosémantiques ont été initialement proposées pour résoudre un problème qui se pose à toute théorie naturaliste des contenus mentaux cherchant à expliquer ces contenus en termes d'une relation causale entre l'organisme et son environnement. Selon ce genre de théorie, une représentation mentale (par exemple le concept *cheval*) acquiert son contenu en vertu d'une relation (nomologique) entre l'organisme et des chevaux, ou parce que le système a un mécanisme permettant de lui indiquer la présence de chevaux. Mais comment s'assurer que cette relation est unique, c'est-à-dire que l'organisme produit des représentations du type *cheval* si – et seulement si – des chevaux sont présents, et pas, par exemple, des chevaux ou des ânes ? En d'autres termes, comment rendre compte de la possibilité d'erreurs ou de représentations fausses ?

La solution du téléosémanticien consiste à invoquer la notion de fonction *normale* d'un mécanisme de représentation, et à expliquer les représentations fausses par un fonctionnement anormal du mécanisme. On dira alors que les états intentionnels comme les croyances et les désirs ont une "fonction propre" issue de la sélection naturelle qui en détermine le contenu. Par exemple, la fonction propre d'un désir est de produire un état de choses qu'il contribue normalement à causer, et l'objet intentionnel de ce désir est l'état de choses que le désir produirait s'il remplissait sa fonction propre ; le contenu des représentations se trouve donc fixé par la sélection naturelle. Par exemple, si un insecte noir traverse le champ visuel d'une grenouille, la réponse d'orientation de la grenouille peut être interprétée comme exprimant le contenu *mouche* parce que ce sont les mouches qui forment la condition évolutivement stable de la survie des grenouilles.

Isoler le contenu informationnel d'un état mental

Selon une conception téléosémantique, par conséquent, on ne peut isoler le contenu informationnel d'un état mental que si l'on parvient à déterminer les conditions optimales de fonctionnement du système qui a cet état. Mais cette approche se heurte à plusieurs problèmes. Le premier est que la notion de fonction est indéterminée, ce qui risque de réintroduire le problème de l'erreur : comment, dans l'exemple précédent, s'assurer que la grenouille a un détecteur de mouches plutôt qu'un détecteur de taches noires ? Le second est que l'analyse en termes de normalité ou d'optimalité risque d'être circulaire : comment s'assurer qu'en spécifiant une fonction normale, on ne réintroduit pas le contenu intentionnel que l'on cherchait à expliquer ? Enfin, le recours à l'optimalité est souvent contesté parce qu'on le soupçonne de recourir à ce que Gould et Lewontin appellent le "paradigme panglossien" prêtant une intentionnalité à la sélection naturelle, ou postulant une sorte d'harmonie préétablie entre la nature et l'organisme. Certains auteurs espèrent sauver l'analyse téléosémantique en se concentrant sur les mécanismes individuels d'apprentissage de l'organisme, en combinant l'histoire

TÉLÉOSÉMANTIQUE – *Teleosemantic analysis of the contents of mental states attempts to define mental representation through its biological functions and evolutionary history. But the indeterminacy of the notion of "function" and the use of the concept of optimality raise difficulties.*

particulière à l'histoire des espèces. Mais si l'on peut penser que cette conception peut être vraie pour des structures innées et isolées, elle est plus difficile à maintenir pour des structures complexes et interactives, comme celles qui impliquent des inférences, du contrôle et du comportement dirigé vers un but.

Il semble donc que si les conceptions téléosémantiques paraissent indiscutablement sur la bonne voie quand on cherche à donner une explication naturaliste de l'intentionnalité (comment l'intentionnalité pourrait-elle ne pas être le produit de la sélection ?), les travaux récents sont loin d'avoir démontré la possibilité d'une réduction des représentations mentales aux fonctions biologiques.

■ Pascal Engel, maître de conférences à l'Université Grenoble II, chercheur au Centre de recherche en épistémologie appliquée (URA 1259 CNRS), Université de Grenoble II, Domaine universitaire, BP 47X, 38040 Grenoble Cedex.

■ Joëlle Proust, directeur de recherche au CNRS, Centre de recherche en épistémologie appliquée (URA 1259 CNRS), Ecole polytechnique, 1, rue Descartes, 75005 Paris.



Quel est l'objet informationnel qui est détecté par la grenouille, et qu'elle tente de happer : une mouche, un insecte ? (© CNRS - A. Devez)

ÉVOLUTION BIOLOGIQUE ET COGNITION

Bien que les sciences cognitives, portées par leur formalisme, aient souvent négligé une approche évolutive de leurs problèmes, il existe des raisons, fort différentes, qui les amènent périodiquement à considérer leur rapport à l'évolution biologique.

Jean Gayon

Ce n'est pas d'aujourd'hui que savants et philosophes se sont interrogés sur la pertinence de la perspective évolutionniste pour la compréhension des phénomènes cognitifs. Des confidences tardives de Darwin montrent que, lors de la publication de *L'origine des espèces* (1859), il estimait que la sélection naturelle persistait à modifier les caractères physiques de l'homme actuel, mais n'agissait probablement plus sur son intelligence, en quelque sorte émancipée de l'évolution biologique. Wallace, co-découvreur du principe de sélection naturelle, déclarait au contraire en 1863 que la sélection naturelle ne modifiait plus le physique de l'homme, mais qu'elle continuerait indéfiniment à améliorer ses qualités intellectuelles. Les deux hommes étaient cependant convaincus que les qualités intellectuelles présentes de l'homme constituaient le produit d'un long processus d'évolution adaptative.

Il semble bien que les sciences dites cognitives (psychologie, linguistique, anthropologie, robotique, épistémologie), soient aujourd'hui aussi hésitantes que les fondateurs de la théorie moderne de l'évolution quant à l'intérêt de celle-ci pour l'explication de la cognition. Ces sciences sont sans doute souvent fasciées par les modèles explicatifs de la biologie évolutive d'inspiration darwinienne ; toutefois l'on peut douter que cette référence ait un sens opératoirement clair et univoque.

Deux façons de considérer les rapports entre cognition et évolution

Il est important de comprendre que les sciences de la cognition peuvent explorer leur rapport à la science de l'évolution de deux manières très différentes, et trop souvent confondues. La première relève

de l'analogie. Considérant que les évolutionnistes (particulièrement les généticiens et les écologues) ont construit des outils théoriques puissants pour interpréter causalement l'histoire des systèmes vivants, on peut être tenté de transposer les modèles. C'est ainsi par exemple que les modèles sélectifs ont été repris dans des contextes empiriques et théoriques aussi différents que la psychologie behavioriste de Skinner (qui repose explicitement sur une analogie entre les "contingences" [darwiniennes] de survie et les "contingences de renforcement" du conditionnement), la neurophysiologie (théorie de la "stabilisation sélective des réseaux de neurones" de J.-P. Changeux), les réflexions des sociologues et économistes se réclamant de "l'individualisme méthodologique", certains algorithmes des roboticiens, enfin les épistémologies pour lesquelles l'histoire des connaissances résulte d'un processus de "sélection" des idées (par exemple K. Popper, D. Hull). L'analogie peut être plus ou moins rigoureuse, mais il convient de noter que dans tous les cas, le rapport des phénomènes cognitifs au modèle évolutif est extrinsèque : la notion de sélection est utilisée parce qu'elle apparaît comme un schéma explicatif dont la fécondité heuristique dépasse largement le domaine de la transformation des espèces. On devrait donc en toute rigueur éviter de caractériser de telles approches comme "évolutives", sauf à ignorer la différence entre un objet et une méthode.

Toutefois, il arrive aussi que les sciences de la cognition interprètent de manière littérale leur rapport à la science de l'évolution. Ainsi – dit-on souvent – si l'on admet que les mécanismes cognitifs naturels sont le produit d'une évolution par sélection, l'on ne peut plus raisonner comme si les systèmes cognitifs naturels reposaient sur des règles de fonctionnement indépendantes de tout contexte ; l'on doit plutôt poser en principe qu'ils témoignent de contraintes adaptatives, passées ou actuelles, mais en tout cas historiquement contingentes. Ce parti pris théorique revient à contester l'un des

BIOLOGICAL EVOLUTION AND COGNITION
Due to their formalism, cognitive sciences have often neglected an evolutionary approach to issues in their field, however there are very many and varied reasons that periodically lead them up to examine their ties with biological evolution.

paradigmes heuristiques dominants du "cognitivism", à savoir l'idée que les systèmes de traitement de l'information, tant naturels qu'artificiels, peuvent être étudiés dans leur structure formelle sans tenir compte des conditions particulières de leur genèse.

Une controverse virulente

Quelque virulente que soit cette controverse, on ne doit pas se méprendre sur ses enjeux. Il serait par exemple tout à fait illusoire de croire que l'on expliquerait tel processus cognitif parce que l'on aurait élucidé les circonstances dans lesquelles il s'est construit comme adaptation héréditaire. La sélection naturelle peut sans doute nous aider à comprendre le processus d'acquisition d'une fonction, mais certainement pas les propriétés structurelles qui font qu'un système donné accomplit cette fonction. Inversement, les "cognitivistes" auraient bien tort d'enfermer leurs investigations dans le cadre philosophique d'un transcendantalisme dogmatique. Car si les dispositifs cognitifs sont véhiculés par des programmes héréditairement transmis, on voit mal en vertu de quel miracle ils échapperaient à la loi d'airain de toute information génétique dans les populations naturelles, à savoir la variabilité et la contingence de la valeur adaptative. Refuser de considérer cette dimension (extrêmement probable) des dispositifs cognitifs naturels, ce serait admettre que l'évolution d'*Homo sapiens*, mais aussi celle des outils créés par lui, est close et achevée, sinon déterminée depuis toujours, pour ce qui est de l'essentiel (l'esprit bien sûr...).

Jean Gayon, professeur à l'Université de Bourgogne, directeur du Département de philosophie, Université de Bourgogne, 2, boulevard Gabriel, 21000 Dijon.

ÉPISTÉMOLOGIE DE LA VIGILANCE

L'étude des états de vigilance montre que le parallélisme psychoneural ne peut interpréter les fonctions propres du cerveau. Systèmes parallèles et distribués, modèles connexionnistes rendent plus visible le lien entre fonction et structure.

■ Claude Debru

Les états de vigilance créent les conditions d'exercice des fonctions cognitives. Leur déterminisme, actuellement compris dans ses grandes lignes, repose sur les systèmes diffus monoaminergiques ainsi que sur de nombreux neuropeptides. Les rôles de ces divers neurotransmetteurs les uns par rapport aux autres sont à l'étude. Le sommeil paradoxal, qui correspond au rêve, est le mieux décrit des états de vigilance. Les travaux entrepris sur cet état ont été l'objet d'études épistémologiques. Il est certes difficile d'étendre aux fonctions cognitives usuelles les conclusions issues de l'étude de la vigilance. Cependant, certaines questions générales touchant notre compréhension des fonctions propres du cerveau apparaissent déjà à ce niveau.

La première conclusion est négative. Les états de vigilance montrent clairement qu'il existe un parallélisme global entre activité mentale et activité neurobiologique, mais qu'un tel parallélisme ne peut être utilisé comme instrument d'interprétation des fonctions propres du cerveau. Ceci n'a pas toujours été compris par certains chercheurs qui ont étudié le fonc-

tionnement du système visuel et oculomoteur au cours du sommeil paradoxal. Ils ont cherché à comprendre la corrélation visuomotrice supposée du sommeil paradoxal sur le modèle de la corrélation visuomotrice de l'éveil : le contrôle de la direction du regard serait identique dans les deux cas. Cette hypothèse a été fortement critiquée en France. Elle peut l'être pour des raisons épistémologiques : il est difficile d'admettre que le parallélisme entre les manifestations comportementales et l'expérience vécue a le même sens dans l'éveil et le sommeil paradoxal. Le contrôle de l'oculomotricité, l'intrication entre régulation interne du regard, représentation et intention diffèrent dans les deux situations.

Le déterminisme de la vigilance

La deuxième conclusion est positive. L'étude des structures et molécules impliquées dans le déterminisme des états de vigilance montre une multicausalité qui n'est pas très différente du parallélisme et de la distributivité observés dans le cas de systèmes nettement plus architecturés comme les systèmes sensoriels. Ceci pose la question du démembrement des fonc-

EPISTEMOLOGY OF WAKEFULNESS. Epistemological studies on sleep and wakefulness show that psychophysical parallelism does not allow for a proper understanding of brain functions. In its multicausal determination, paradoxical sleep may be compared to sensorial systems parallelism and distributivity. The biological relationship between structure and function which is less taken into account by functionalism is clearly stated by connectionist models.

tions globales en fonctions plus élémentaires et du langage utilisé pour la description et la modélisation de ces fonctions élémentaires. Il en va de même pour les neurotransmetteurs. Leurs fonctions exactes dans le déterminisme des états de vigilance restent débattues. A quel ordre de conditions appartiennent-ils ? La logique élémentaire, en termes de conditions nécessaires et suffisantes, n'est pas d'un grand secours, et l'expérimentation ne démontre que des conditions suffisantes. La question mérite d'être posée en termes plus physiologiques. Les modèles de type cybernétique, en termes de contrôles positifs et négatifs, ne livrent que le squelette d'un fonctionnement. Tout comme les protéines allostériques, les molécules neurotransmettrices ont vraisemblablement plusieurs fonctions corrélées par leur intermédiaire. Ainsi pourrait s'éclaircir le problème des fonctions neurobiologiques du sommeil paradoxal, et plus profondément la relation des états de vigilance aux fonctions cognitives supérieures.

La troisième conclusion est neurophilosophique. La thèse fonctionnaliste, proposée par certains philosophes proches de l'informatique, repose sur une distinction entre programme et réalisation, fonction et structure, difficile à admettre telle quelle pour un biologiste. Le sommeil paradoxal de l'animal pourrait correspondre à la mise en jeu de programmes comportementaux inscrits dans le plan de câblage du système nerveux, réalisant le lien entre fonction et structure. Les modèles connexionnistes, plus évolués, rendent visible dans sa dynamique ce lien entre fonction et structure, et paraissent aptes à décrire des phénomènes de ce type.

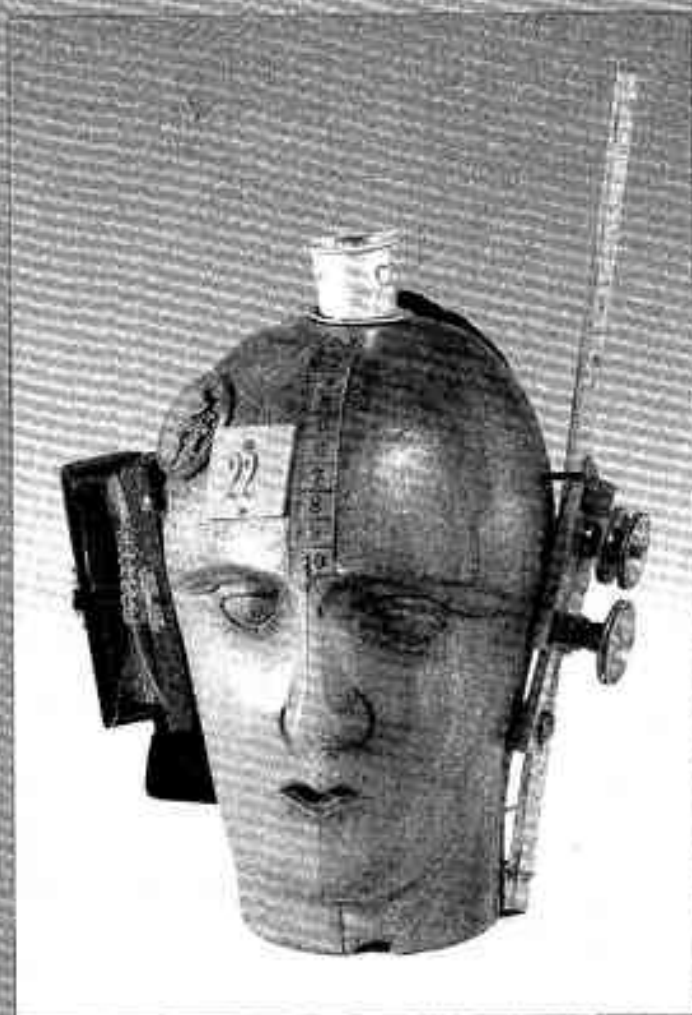
■ Claude Debru, directeur de recherche au CNRS, directeur du Centre européen d'histoire de la médecine, Faculté de médecine, 4, rue Kirschleger, 67000 Strasbourg.



Dans la forêt primaire du Gabon, un chimpanzé mâle adulte dans la toute dernière phase de son sommeil, quelques secondes avant qu'il ne s'éveille (© CNRS - Ecotrop / A. Devez).

INDEX DES AUTEURS

Amalberti René	100	Franceschini Nicolas	47	Pailhous Jean	53
Andler Daniel	6, 82, 91	Frégnac Yves	62	Pernier Jacques	88
Azencott Robert	82, 93	Ganascia Jean-Gabriel	71	Perrin François	88
Balacheff Nicolas	69	Gardin Jean-Claude	107	Perruchet Pierre	60
Barrouil Claude	35	Gaume Bruno	30	Petitot Jean	90
Bastien Claude	38	Gayon Jean	119	Pierrel Jean-Marie	11
Baudonnière Pierre-Marie	78	Giard Marie-Hélène	86	Piolat Michel	108
Beaudouin-Lafon Michel	105	Grainger Jonathan	14	Politzer Guy	27
Beauvillain Cécile	15	Granier-Deferre Carolyn	74	Pollock Jean-Yves	8
Berthoz Alain	48	Grantyn Alexej	52	Poucet Bruno	65
Bertoncini Josiane	72, 75	Guiard Yves	53	Prade Henri	29
Bertrand Olivier	88	Hoc Jean-Michel	98	Proust Joëlle	118
Beuscart Régis	101	Holley André	1, 44	Puel Michèle	24
Bloch Vincent	64	Imbert Michel	42	Pynte Joël	16
Borillo Andrée	17	Israël Isabelle	48	Quinqueton Joël	56
Borillo Mario	27, 30	Jacob Pierre	115, 117	Récanati François	21
Boucheron Stéphane	91	Jacobs Arthur M.	14	Renault Bernard	82, 86
Bourrelly Louis	33	Jakubowicz Celia	23	Requin Jean	40
Boysson-Burdies (de) Bénédicte	75	Jeannerod Marc	7	Richard Jean-François	36
Burnod Yves	49, 76	Jodelet Denise	109	Richle Alexa	46
Carbonnel Serge	25	Joseph Jean-Paul	50	Roll Jean-Pierre	45
Carbonell Noëlle	11	Jouen François	78	Roman François	63
Cardebat Dominique	24	Kail Michèle	22	Roubertoux Pierre	80
Chournaqui Eugène	33	Kayser Daniel	36	Royer Véronique	35
Corbin Danielle	12	Kennedy Henry	79	Sabah Gérard	19
Cornulier (de) Benoît	20	Krivine Jean-Paul	37	Sallantin Jean	70
Crusio Wim E.	80	Laborde Jean-Marie	69	Schaal Benoist	74
Danion Jean-Marie	61	Lucaille Jérôme	93	Schonen (de) Scanin	72, 76
Debru Claude	120	Laumond Jean-Paul	51	Seal John	46
Deconchy Jean-Pierre	110	Le Ny Jean-François	18	Segui Juan	8
Dehay Colette	79	Lecanuet Jean-Pierre	74	Sellal François	61
Demany Laurent	43	Lécuyer Roger	77	Seube Nicolas	97
Demolombe Robert	31	Lepeocq Jean-Claude	78	Siérot Eric	59
Démonet Jean-François	24	Leroy-Willig Anne	85	Soumireu-Mourat Bernard	63
Demongeot Jacques	96	Liénard Jean-Sylvain	98	Sperber Dan	114
Denis Michel	56, 66	Livet Pierre	112	Streri Arlette	77
Deruelle Christine	76	Lowenstamm Jean	12	Thiauc-Blanc Catherine	65
Desclés Jean-Pierre	67	Martiel Jean-Louis	96	Thorpe Simon	42
Devouge Claire	93	Martin Eric	91	Tiberghien Guy	58
Dreyfus Gérard	95	Matrouf Karim	104	Trotter Yves	49
Droulez Jacques	52	Mazoyer Bernard	84	Valdois Sylviane	26
Drozda-Senkowska Ewa	111	McAdams Stephen	43	Valot Claude	100
Dubois Didier	29	Mehler Jacques	10	Vauclair Jacques	81
Dubois Danièle	68	Mongin Philippe	113	Vergnaud Gérard	39
Dubucs Jacques	32, 116	Mosconi Jean	116	Vidal Pierre-Paul	52
Dupoux Emmanuel	10	Moscovici Serge	106	Vivet Martial	103
Dupuy Jean-Pierre	112	Mougeot Mathilde	93	Walliser Bernard	113
Engel Pascal	118	Nadal Jean-Pierre	92	Wiener Sidney	48
Fagot Joël	81	Néel Françoise	104	Younes Laurent	93
Falzon Pierre	102	Neapoulos Jean-Luc	8, 24	Zavidovique Bertrand	54
Fariñas del Cerro Luis	31	Nguyen Xuan Anh	34		
Fieschi Marius	101	O'Regan Kevin	16		



CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
15, AVENUE PARLAIRE - 91000 EVRY-COURCOURONNES
TÉLÉPHONE (01) 69 15 55 00 - TÉLÉFAX (01) 69 15 55 01