

Le courrier du CNRS 69-70

Auteur(s) : CNRS

Les folios

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

85 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 69-70, 1987-12

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

Consulté le 03/02/2026 sur la plate-forme EMAN :

<https://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/159>

Copier

Présentation

Date(s)1987-12

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 pages85

Notice créée par [Valérie Burgos](#) Notice créée le 05/10/2023 Dernière modification le 11/12/2024

LE COURRIER DU CNRS

DOSSIER

De la perception...



69-70

CNRS
Dépot des archives
de la Délégation Paris Michel-Ange
- Bâtiment 19
1, avenue de la Terrasse
91196 GIF-sur-Yvette



... à l'action.

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Juillet - Décembre 1987 - 30F



**Directeur
de la publication :**
Goëry Delacôte
Rédacteur en chef :
Véronique Brossollet-Condé
**Secrétaire
de rédaction :**
Françoise Bescond
Secrétariat :
Martine Roche
Entretiens :
Monique Mounier-Kuhn

**Comité
de rédaction :**
Robert Barbault,
Jean Bourdon,
Georges Chapouthier,
Bernard Dormy,
Claire Dupas,
Catherine Fuchs,
Jean-Philippe Genet,
James Hébliot,
Louis Jauneau,
Jean Leca,
Jacqueline Mirabel,
Jean Montuelle,
Janine Rondest,
Sylvie Sahal,
Hervé Théry,
Maryvonne Tissier,
Guy Vidal-Naquet.

**Membres
correspondants :**
Nadine Chalem-Gouarin,
Gérard Lilamand,
Jean Chouty.

Légendes

Page 1 de couverture :
© Pictor International

Page 4 de couverture :

*Photo de l'arc lumineux détecté dans l'amas
de galaxies Abell 370.
Ce cliché pris en septembre 1985 avec une
caméra CCD au télescope de 3,6 m Canada-
France-Hawaii, montre une structure
lumineuse en forme d'arc. Située au dessous
d'une galaxie géante de l'amas, cette
structure semble relier plusieurs galaxies de
l'amas. Il s'agit d'un mirage gravitationnel,
l'arc étant l'image d'une galaxie se situant
loin derrière l'amas, celui-ci jouant le rôle de
lentille gravitationnelle. (© Télescope
Canada-France-Hawaii, CNRS, Observatoire
Midi-Pyrénées) (voir article page 6).*

*Distribution géographique des anomalies de
fréquences propres. Les zones négatives
(bleues) correspondent à des zones de vitesses
sismiques rapides, c'est-à-dire des régions
froides. On voit en particulier clairement
l'effet des zones de subduction du Pacifique
Ouest. Les zones positives (rouges)
correspondent à des vitesses lentes, donc des
régions plus chaudes. Elles sont associées en
particulier aux zones de dorsales océaniques
(S - Roullet et Romanowicz, 1987) (voir article
page 11).*

Revue bimestrielle comportant cinq numéros
par an. Vente au numéro : 20 F, numéros
spéciaux : 40 F, ce numéro : 50 F. Nous
remercions les auteurs et les organismes qui
ont participé à la rédaction. Les intertitres et
les chapitres introductifs ont été rédigés par
la rédaction. Les textes et illustrations
peuvent être reproduits sous réserve de
l'autorisation écrite du directeur de la
publication.

Direction artistique : Brillant et
Associés/Pierre Gachacoff, 56, rue
Boissonade, 75014 Paris. Réalisation : Roto-
France Impression, boulevard de Beaubourg,
Emmerainville, 77200 Torcy.
Commission paritaire : AD 303 - ISBN :
2-222-04175-9- ISSN : 0-153-985-X
© Centre national de la recherche
scientifique.

LE COURRIER DU CNRS

CNRS
Délégation du Siège
Service logistique
Dépôt des archives Bâtiment 19
Avenue de la Terrasse
91191 Gif-sur-Yvette
Tel : 01 69 82 39 17



69-70

**ENTRETIEN AVEC CHARLES PIETRI,
DIRECTEUR DE L'ÉCOLE FRANÇAISE DE ROME.
ITINÉRAIRE SUR LES SITES ARCHÉOLOGIQUE
DE MEGARA HYBLAEA ET LIPARI.**

Entretien avec Charles Pietri, directeur de l'Ecole française de Rome

Redonner par l'étude force et vie aux valeurs des civilisations de la Méditerranée latine, tel est le rôle de l'Ecole française de Rome, lieu de travail et de rencontre pour tous les spécialistes qui viennent au Farnèse.



Charles Pietri est directeur de l'Ecole française de Rome depuis 1983. Né à Marseille en 1932, ancien élève de l'Ecole normale supérieure, il est agrégé d'histoire et docteur ès lettres. Il a été membre de l'Ecole française de Rome en 1959, puis attaché de recherche au CNRS. Charles Pietri est historien du Christianisme et spécialement du Christianisme romain. Il est professeur à la Sorbonne où il a succédé à Henri-Irénée Marrou à la chaire d'Histoire du Christianisme. Auteur de nombreux articles et ouvrages sur l'histoire du Christianisme, l'histoire de Rome et l'Antiquité tardive, dont « *Roma christiana* » (1976). Charles Pietri est membre, depuis 1985, de l'Académie pontificale d'archéologie romaine. Il dirige l'unité associée 1011 du CNRS « *Institution ecclésiastique à la fin du Moyen Âge* ».

Monique Moumier-Kahn : *Qui sont les premiers fouilleurs ?*

Charles Pietri : L'archéologie a une longue histoire mais je n'aime guère le terme de « fouilleur ». Chateaubriand l'utilise comme synonyme de « niveleur » ou de « déracineur ». Le mot évoque un peu les chercheurs de trésors, qui dès l'Antiquité, pillent en Egypte les tombes royales et à Rome les catacombes. Jérôme Carcopino a décrit le cheminement de ces « fouilleurs » dans les décombres de Pompéi ensevelie par les laves.

Or, l'archéologie n'est pas destruction, nivellement, au contraire elle est une expression particulière de la recherche historique, de cette curiosité scientifique pour le passé qui veut rendre de nouveau vivantes pour les contemporains les valeurs humaines du passé. Le mot lui-même *archaologia* apparaît avec Thucydide ; l'historien grec donne l'un des premiers exemples du raisonnement archéologique ; il explique que les Phéniciens et les Cariens étaient, à l'origine, des peuples de pirates insulaires et il donne une preuve : la découverte, dans l'île de

Délos, de leurs sépultures identifiables grâce aux armes ensevelies avec les cadavres.

Platon, dans l'un de ses dialogues, l'*Hippias Majeur*, définit l'archéologie, « l'histoire des héros et des hommes, les établissements de population, la manière dont furent fondées, dans les temps anciens, les cités, tout ce qui est relatif à l'Antiquité ». Nous pensons toujours que l'étude du passé doit utiliser, autant que possible, le témoignage des textes et celui des monuments. Le philologue et l'archéologue travaillent l'un et l'autre au service de l'histoire.

M.M.-K. : *Quand l'archéologie moderne est-elle née ?*

C.P. : Les antiquaires, les humanistes s'intéressaient depuis la Renaissance à l'étude des objets et des œuvres d'art, ils collectionnaient les inscriptions, les bagues, les outils et compilèrent des « trésors », des recueils qui portent le nom de *Thesaurus* et qui illustrent, au XVIII^e siècle, comment le goût de la collection a finalement servi la recherche systématique des vestiges antiques. Deux signes attestent la naissance d'une science moderne : la publication en 1764 d'une *Histoire du Dessin* par Winckelmann et aussi l'intervention d'une jeune princesse saxonne arrivée dans le royaume de Naples. Devenue reine des Deux-Siciles, celle-ci obtint l'ouverture de galeries au flanc du Vésuve, près de la mer, là où une grande éruption avait enseveli une ville antique, comme on l'apprit très vite : Herculaneum. L'archéologie, qui débute ainsi en Italie mobilise les soldats du génie et un humaniste, le directeur de la bibliothèque royale de Naples.

Au XIX^e siècle interviennent, dans la Péninsule, des savants français attirés par les récits de voyage qui, depuis Montaigne, Mably, le président De Brosses et Stendhal, évoquaient la richesse du patrimoine méditerranéen. La recherche s'organisa dans un premier temps avec la fondation d'une Académie pontificale

d'archéologie romaine et avec un Institut de correspondance archéologique qui rassembla des savants venus de toute l'Europe, en particulier des érudits de langue allemande, des Italiens et des Français. Ceux-ci se regroupaient en une section nationale active et la France n'imaginait pas de créer une école d'archéologie comme elle l'avait fait en Grèce, à Athènes. On se contentait simplement d'envoyer, pour un séjour propédeutique, les « Athéniens » à Rome où ils s'arrêtaient plusieurs mois avant de rejoindre la Grèce.

M.M.-K. : Pourquoi la création de l'Ecole française de Rome voici plus d'un siècle ?

C.P. : Le décret du 20 novembre 1875 qui institua l'Ecole française de Rome (EFR), signé par le Maréchal de Mac-Mahon, fut promulgué à la demande du ministre de l'Instruction publique, Henri Wallon, un grand historien qui est également le père de la Troisième République. Les meilleurs esprits de l'époque, Lavis, Liard, Taine, Wallon lui-même, souhaitaient préparer par la science, avec la reconstruction de l'université, la « revanche » sur l'Allemagne victorieuse et dominante. En 1871, cette création s'imposait, puisque une ordonnance du Prussien Guillaume I^{er} avait décidé de transformer l'Institut de correspondance archéologique en un établissement impérial relevant de l'Académie de Berlin, aujourd'hui le *Germanico* avec lequel nous avons tant de liens d'amitié. La France ne pouvait être absente de Rome au moment où la naissance d'une Italie presque complètement unifiée ouvrait des perspectives nouvelles à la recherche et aux échanges intellectuels. Un jeune et savant archéologue, Albert Dumont, destiné à devenir directeur de l'Enseignement supérieur, présenta, dès 1872, le projet concret d'une « Ecole préparatoire d'archéologie et d'histoire de l'art ». Après de multiples négociations, un décret du 26 novembre 1874 ratifiait la création « d'une Ecole d'archéologie » proche du modèle athénien. Mais le premier directeur, Dumont, conçut rapidement que la nouvelle Ecole installée à Rome ne pouvait ignorer les multiples possibilités d'études offertes par le patrimoine documentaire de la ville et de l'Italie. Il associa aux archéologues un historien de l'Eglise, l'abbé Duchesne, un spécialiste de l'art italien au temps de la Renaissance, un chartiste. Un nouveau décret du 20 novembre 1875 accorde les textes avec la réalité en réglementant l'organisation de l'Ecole française de Rome. Auguste Geoffroy traita clairement la leçon : « Nous nous appelons Ecole française de Rome et non Ecole d'archéologie ; nous sommes une école d'étude, dont le cadre paraît devoir se modeler d'après les ressources très variées qu'offrent non seulement le sol, mais les bibliothèques et les archives d'Italie ».

La même année, en décembre 1875, le directeur s'installait au deuxième étage du Palais Farnèse tandis que l'Ambassade de France auprès de la monarchie occupait le premier étage : dès l'origine, le nouvel établissement liait son histoire à l'un des palais les plus prestigieux de Rome. Ces premières décennies dans la vie de l'Ecole, placée au début du siècle sous la



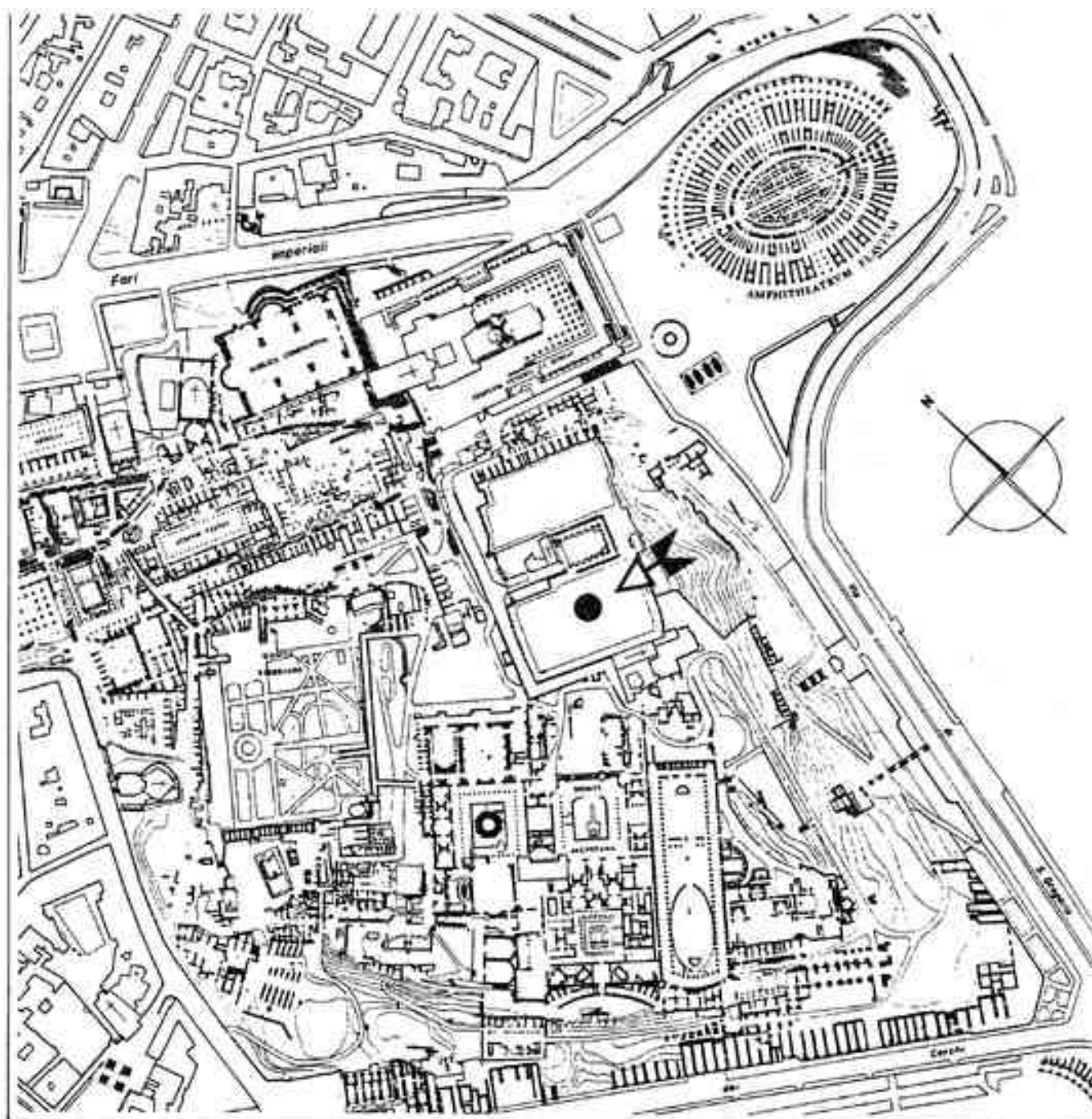
Plan et vue générale du centre monumental de Rome. Le Nord est en haut à gauche. Au centre, légèrement à droite du cliché, la Vigna Barberini (flèche) entre le Colisée, l'Arc de Constantin, le temple de Vénus et de Rome au Nord, les Palais impériaux au Sud (tiré de A. Coraciolo et F. Quilici, *Roma, una capitale singolare* ; nég. EFR, VB 853).

direction prestigieuse de Monseigneur Duchesne (de 1895 à 1922), marquent l'orientation et le style qui sont encore les nôtres.

L'Ecole reçut alors les instruments indispensables à son épanouissement, une bibliothèque et, constituée à partir de 1880, une revue, les *Mélanges d'archéologie et d'histoire* qui permettaient aux « Farnésiens », ainsi qu'à des savants français et étrangers, de publier les résultats de leurs travaux. Depuis 1876, une Bibliothèque des Ecoles françaises d'Athènes et de Rome accueillait les mémoires, les comptes rendus des missions, les thèses rédigées par les membres des deux institutions : une centaine d'ouvrages au début du XX^e siècle. Ces publications reflètent la diversité des activités farnésiennes : l'ouverture de chantiers archéologiques en Italie, comme celui d'A. Grenier près de Bologne et, de plus en plus en Afrique du Nord où, de l'Algérie à la Tunisie, puis au Maroc, les

« Farnésiens » réalisent une œuvre pionnière dans la découverte, l'étude et la conservation des monuments antiques. En 1877, le chartiste E. Berger ouvre une autre voie : l'étude des archives vaticanes et italiennes et il inaugure, avec les registres d'Innocent IV, la deuxième série de la Bibliothèque consacrée à la publication des documents pontificaux du Moyen Âge. La présence de savants prestigieux tels que M. Prou, Ch. Samaran, Camille Jullian, Michel-Charles Diehl, Pierre de Nolhac, Jérôme Carcopino illustre, dès l'origine, la vocation de l'Ecole placée sous la tutelle intellectuelle et morale de l'Académie des inscriptions et belles-lettres et sous l'autorité du ministère de l'Instruction publique.

Sur cette diversité qui associe l'archéologie à l'histoire, l'étude de l'Antiquité et du Moyen Âge à celle des Temps modernes, je puis donner en témoignage le jugement de l'orientaliste, Philippe Berger, président de l'Académie des inscriptions,



qui en 1902, félicite l'Ecole de « son allure plus libre, d'une grande variété de recherches : elle est en quelque sorte, continuait-il, l'image de la Ville éternelle où l'on trouve, superposés aux ruines vivantes de la Rome antique, les chefs-d'œuvre de la Rome des papes et de la Renaissance ».

M.M.-K. : *Quels sont, pour l'Antiquité, les principaux champs de recherche ?*

C.P. : Pour répondre à cette question, je préfère choisir quelques exemples et éviter un bilan nécessairement abstrait et succinct sur les dix-sept chantiers dont l'EFR a la responsabilité. Permettez une remarque préalable : on ne devrait pas, sauf pour les commodités d'un exposé, distinguer l'histoire, la philologie et d'autre part, l'archéologie ; comme l'indique son titre, la vocation de l'EFR est d'associer l'analyse des monuments et

celle des textes : Ecole d'histoire et d'archéologie. Après avoir rappelé les interventions, traditionnelles depuis l'après-guerre, en Etrurie et en Grande-Grèce, les grands chantiers de Bolsena et de Mégara, après avoir évoqué les interventions en Vénétie, au Frioul, en Ligurie, dans le Salento, bientôt en Sardaigne, je prendrai l'exemple de Rome, précisément parce qu'il a le soutien particulier du CNRS (c'est un programme privilégié de la convention) : l'EFR n'avait guère les moyens de participer aux premières campagnes à la fin du siècle dernier ; lorsque reprennent les grandes entreprises dans les années trente, non plus : on ne voulait pas d'elle. Au contraire, aujourd'hui, la générosité intellectuelle de la Surintendance et de son responsable, Adriano La Regina, a facilité l'intervention de l'Ecole. Celle-ci œuvre dans un premier temps à la périphérie de la ville antique ; dans la zone des jardins et des riches *domus*, sur le Pincio, plus loin

encore près de la voie de Porto, dans la zone du Bois sacré des Arvales ; au nord-est du Palatin, sur la prestigieuse colline, dans la Vigna Barberini, chaque année depuis 1985 se succèdent, pour six à sept mois d'investigations, cinq équipes*.

Cette zone, constituée par une terrasse artificielle définitivement aménagée au début du III^e siècle, entourée par une grande enceinte percée de portes monumentales, ensevelit une forte pente par laquelle on gagnait le sommet de la colline

* Ces cinq équipes sont les suivantes : celle de Pierre Gros qui dirige l'Institut de recherche sur l'architecture antique (I.P. 5500), celle de Jean-Paul Morel, responsable du Centre Camille Jullian (U.A. 284), celle de Philippe Pergola du CNRS, celle de Françoise Villardieu et Marie-Brigitte Carré du CNRS et enfin avec l'architecte de l'Ecole, H. Broise, celle de Y. Thébert (Saint-Cloud).

Convention entre le Centre national de la recherche scientifique et l'Ecole française de Rome - 1985

Cette convention conclue pour cinq ans, est renouvelable pour la même durée par tacite reconduction.

L'EFR et le CNRS en se référant au protocole d'accord passé le 13 janvier 1984 entre le ministère de l'Education nationale et le CNRS, conviennent de coordonner leurs efforts en vue de :

1 - développer, dans certains domaines des sciences humaines et sociales, des recherches intéressant l'Italie et les zones voisines de la Méditerranée occidentale (Maghreb, Yougoslavie en particulier) ;

2 - assurer, en ces domaines, la formation de chercheurs et la diffusion de l'information scientifique ;

3 - coordonner les coopérations diverses qui relient l'EFR à des unités et à des chercheurs du CNRS et assurer enfin entre le CNRS et l'EFR le cadre d'échanges durables, pouvant inclure la participation des établissements d'enseignement supérieur et de recherche italiens coopérant par contrat avec l'EFR.

La coopération entre l'EFR et le CNRS, objet de la présente convention, se développe dans le respect des missions assignées à ces établissements par les textes les régissant et par leurs autorités de tutelle.

Cette coopération porte notamment sur :

— la programmation, les conditions et la structuration de la recherche ;

— l'accueil des personnels et la formation appropriée ;

— le programme informatique et le développement des banques de données ;

— la documentation et la diffusion scientifiques ;

— l'information mutuelle en matière de conventions et d'accords dans le cadre de la coopération scientifique franco-italienne dans le domaine d'activité concerné.

Une commission mixte examine chaque année l'application de la convention.

sous la République et au début de l'Empire. Les premières campagnes précédées de toutes les recherches techniques (détection électro-magnétique, relevé photogrammétrique de l'enceinte antique délimitant la Vigna) ont élucidé un peu l'histoire de la région à l'époque impériale : la transformation de ce qui était probablement un quartier d'habitations en zone religieuse, un jardin auquel s'attache le souvenir d'Adonis, avec un temple qui date dans son premier état, du temps de Marc Aurèle (plus précisément de 160-175) ; on connaît mal encore les vestiges antérieurs à la fin du I^{er} siècle ; mais la découverte d'un cryptoportique, qui a été aménagé pendant les premières décennies du I^{er} siècle, donne une indication précise et ce n'est pas la seule. Nous en savons assez désormais pour dire que cette zone, pratiquement dépouillée de tous les vestiges d'époque médiévale ou moderne par l'installation d'une vigne et même pendant la Première Guerre d'un potager, conserve pour les époques antérieures des informations sûrement précieuses. Il faudra arracher ces documents enfouis de l'histoire républicaine ou augustéenne en progressant patiemment, en analysant un matériel assez considérable qu'il faut étudier grâce au traitement informatisé de l'information.

J'aimerais pouvoir citer les documents qui récompensent ici ou là le zèle des chercheurs : à Ladispoli, à quelques dizaines de kilomètres au nord de Rome, c'est le relevé d'une grande villa maritime impériale, dont les dimensions sont considérables : cinq cents mètres de long sur cent soixante mètres de large ; à Musarna, les responsables du chantier ont découvert pendant cet été un trésor de neuf cent quatre-vingt-quatorze pièces d'argent qui datent du I^{er} siècle avant notre ère. J'ajoute que de façon générale la découverte est une étape essentielle ; mais elle ne conclut pas l'entreprise ; l'archéologue n'est pas un fouilleur qui part à la recherche d'un bel objet pour constituer une collection. Il s'efforce de se représenter tout ce que les monuments et les objets, souvent utiles pour fixer une chronologie, peuvent nous dire de la société et de la culture, de l'histoire des hommes dans l'espace d'un quartier romain, d'une villa rustique, d'une petite ville étrusque ou d'une colonie grecque de l'Occident.

M.M.-K. : Pour le Moyen Age, sur quels sujets portent les travaux en cours ?

C.P. : Pour la section médiévale, je me contenterai également d'exemples ; mais je commencerai en rappelant l'importance particulière que l'archéologie médiévale occupe, depuis quelques années, à l'Ecole ; un chiffre paraît assez important : le budget archéologique pour le Moyen Age a doublé en quatre ans : du cinquième aux deux cinquièmes du financement des fouilles farnésiennes. Cette évolution illustre évidemment les progrès remarquables de l'archéologie médiévale, une discipline qui a été introduite très récemment ; mais l'Ecole a peut-être la responsabilité particulière de maintenir une attitude intellectuelle qui lui est propre en associant étroitement le travail dans les archives et la recherche de terrain. Ainsi l'initiation archéologique constitue une propédeutique utile pour les médiévistes, comme elle l'a été pour les



Musarna (à quelques kilomètres au Nord de Rome). Trésor monétaire de deniers d'argent constitué dans le courant du premier quart du I^{er} siècle avant Jésus-Christ. A - Revers d'un denier de D. Silius (Crawford: 91 av. J.-C.) : victoire sur un bête, char à deux roues. B - Revers d'un denier de L. Titulus (Crawford: 89 av. J.-C.) : le châtiment de Tarpeia (© EFR).

philologues spécialisés de l'antiquité. Il y a même quelque urgence à proposer cette formation, pour prémunir les jeunes chercheurs contre ces déviations surgies çà et là qui privilégient la technique pour elle-même, au détriment des textes. Cette méthode apparaît clairement dans les programmes d'une archéologie extensive : l'expression est un peu insolite mais elle a été consacrée pour désigner la synthèse de méthodes traditionnelles et de procédés plus récents pour une prospection étendue à tout un territoire, clairement délimité. En Sabine, dans les Abruzzes, dans les Pouilles, en Sardaigne, bientôt en Calabre, des équipes entreprennent une investigation systématique qui permet de repérer souvent le réseau d'occupation et parfois d'identifier un type d'habitat ; ainsi, le repérage dans les Pouilles du casale d'époque romaine. Les chantiers proprement dits impliquent un effort financier plus appuyé ; à Calatharnet en Sicile, l'enquête s'achève, avec l'étude d'un château normand qui précède un établissement fortifié d'époque sarrazine (un témoignage exceptionnel sur l'époque arabe au nord de la Sicile). Dans les Pouilles, à Fiorentino, les investigations ont commencé sur un site assez exceptionnel ; on doit imaginer, à une trentaine de kilomètres de Foggia, une ville abandonnée au XVI^e siècle, d'abord un site byzantin, puis la résidence de l'empereur Frédéric II, enfin un évêché. L'œuvre est confiée, pour ce grand chantier, à une équipe franco-italienne, dans laquelle intervien-

ment, pour la partie française, des chercheurs du CNRS et pour la partie italienne, tout un groupe de l'Université de Bari.

J'évoquerai, en prenant un exemple, ce chantier traditionnel et irremplaçable qu'ouvre l'étude des archives : au siècle dernier, l'Ecole a commencé la publication des registres pontificaux : depuis lors, les médiévistes du Farnèse donnèrent leur contribution à cette entreprise considérable. Aujourd'hui, l'indexation automatisée, réalisée grâce au généreux concours de Lucie Fossier, l'analyse historique de cette documentation enrichissent et renouvellent l'une des traditions précieuses de l'activité farnésienne. J'insiste sur ce programme parce qu'il est confié à une unité de recherche associée au CNRS* et conduite par l'Ecole avec la collaboration d'un chercheur du CNRS, Jean-Claude Maire-Vigueur. Prenons un exemple : les savants (je pense à Mme Hayez en particulier) qui avaient la charge de publier les vingt-huit mille lettres communes du pape d'Avignon Urbain V (1362-1370), ont édité ces textes sous la forme, beaucoup plus économique, de registres. Ils ont reçu pour cette entreprise, l'appui précieux du service départemental des Archives et du Conseil général du Vaucluse, dont l'intervention généreuse a permis de renouer les liens qui unissaient autrefois les deux capitales des pontifes romains. Le traitement informatique de tous ces textes a permis de présenter commodément, dans un premier volume, l'index des toponymes, un instrument de travail précieux pour notre connaissance de la chrétienté médiévale et dans un deuxième volume, également publié, le corpus d'une prosopographie chrétienne à la fin du XIV^e siècle, tous les personnages qui de toutes les régions d'Europe s'adressèrent au pape d'Avignon. Un tel recueil donne une base irremplaçable pour l'histoire sociale de la chrétienté. Les équipes organisées au sein de l'unité associée prolongent l'enquête en étudiant le gouvernement central de l'Eglise. Tout ce corpus de documentation cristallise des recherches nouvelles pour lesquelles s'activent des groupes de savants rattachés à cette unité : l'étude économique de l'institution ecclésiastique, l'analyse des résistances à l'Eglise dans l'Italie communale ; celle des pouvoirs « informels » établis en marge de la hiérarchie : spirituels, prophètes. Ainsi, autour du thème privilégié par le programme éditorial, s'organise, directement ou plus lointainement rattaché à celui-ci, le thème central d'une enquête sur l'institution et la société de l'Eglise à la fin du Moyen Age.

On se limitera à cet exemple, pour ne pas donner une réponse trop longuement exposée ; mais j'aurais pu évoquer l'étude des sociétés rurales dans l'Italie médiévale, une enquête qui privilégie l'histoire, l'analyse patiente des textes d'archives sans négliger le témoignage de l'archéologie.

M.M.-K. : Comment étudie-t-on l'histoire moderne et contemporaine, plus proche de nous, et plus particulièrement l'évolution de l'Eglise ?

C.P. : L'histoire moderne et aussi l'histoire contemporaine appartiennent aux traditions intellectuelles de l'Ecole ; mais pour les périodes les plus récentes, après une parenthèse, les recherches ont été activement restaurées. Cette fois encore prenons quelques exemples : l'un des thèmes privilégiés de la recherche relève tout spécialement de l'histoire sociale et de la démographie historique, en étudiant « Famille et parenté dans l'Italie méridionale à l'époque moderne ». L'enquête portait, il y a quelques années avec la découverte d'un *Libro magno di famiglia*, un document d'état civil conservé dans un gros bourg agricole des Pouilles, à Manduria, situé à une quarantaine de kilomètres à l'est de Tarente. Il faut se représenter tout l'intérêt exceptionnel d'un texte de ce genre, où se trouvent consignés depuis le XVI^e siècle jusqu'à nos jours, près de

trente-cinq mille mariages ; l'enquête peut reconstituer des généalogies qui se ramifient depuis l'aube des temps modernes. Une telle documentation imposa la collaboration de nombreux chercheurs et aussi la conjugaison de techniques diverses : s'associèrent ainsi avec l'inventeur du document, Gérard Deille, les savants d'un laboratoire du Collège de France et ceux de l'université de Rome : le traitement informatique de cette documentation (grâce à un logiciel élaboré au Collège) a ébauché, à travers l'analyse de dix mille alliances, l'étude des structures de parenté, dans un milieu homogène, une sorte d'isolat. Cette caractéristique précieuse permettait même l'application de l'enquête historique à la recherche médicale, scellée par une convention avec l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (INSERM). En effet, ces généalogies peuvent aider l'étude de l'hérédité dans l'étiologie d'une affection locale, l'anémie méditerranéenne. Le logiciel utilisé pour le *Libro* de Manduria sert également dans une enquête parallèle, plus largement étendue à l'histoire sociale de l'Italie moderne : l'étude des Noblesses, de leur comportement démographique, de leurs politiques matrimoniales. Je pourrais signaler d'autres chantiers (on me permettra cette commodité de langage, destinée simplement à illustrer que

Manduria (Pouilles), *Libro Magno delle Famiglie* (Grand Livre des familles) colonnes 179 et 180, généalogie de la famille Cocciola (© EFR).



* UA 1011 « Institution ecclésiastique à la fin du Moyen Age » : localisée au Palais Farnèse et dont le responsable est Charles Pietri.

le financement de ces opérations est analogue à celui des entreprises archéologiques), un répertoire sur les sources concernant la Révolution française qui illustrera la participation de l'EFR à la célébration du bicentenaire, un catalogue des cadastres anciens, l'exploitation des Archives de la *Propaganda Fide*, pour laquelle l'Ecole apporte son soutien aux spécialistes d'ethnographie historique venus de l'Ecole pratique des sciences sociales. On sait que ce dicastère de l'Eglise a conservé un patrimoine considérable d'archives, de mémoires, de relations de voyages, de dictionnaires de langues et de dialectes ; tous ces documents ont été rédigés par les missionnaires catholiques sur les populations évangélisées d'Afrique, d'Asie, des Amériques depuis le début de l'époque moderne.

Je ne voudrais pas oublier l'étude de l'art italien qui appartient aux plus anciennes traditions de l'Ecole. Celle-ci doit continuer d'accueillir des boursiers et des membres : une Farnésienne étudie présentement, dans les perspectives d'une histoire sociale de la culture, le développement des collections romaines, en particulier les plus prestigieuses d'entre elles, les collections cardinalices de la Rome moderne.

L'histoire de l'Italie contemporaine avait connu un certain écart sous la direction d'A. Geffroy et du temps de Monseigneur Duchesne, avec G. Goyau, A. Dufourcq. Je crois pouvoir dire que depuis une dizaine d'années, l'EFR assure pleinement la responsabilité de ses traditions. Par exemple, pour l'histoire sociale et politique du XX^e siècle : à l'origine, une petite équipe liée au centre d'études italiennes de la Fondation nationale des sciences politiques avait entrepris une enquête sur les migrations italiennes, en particulier dans la province de Parme. Cette recherche a été ainsi durablement étendue grâce à la générosité intellectuelle du directeur général de l'*Archivio di Stato*, le professeur R. Grispo. Il proposait aux chercheurs français l'étude du *Casellario politico centrale*, un fichier des opposants compilé au temps du fascisme : près de cent mille fiches, dans lesquelles on compte celle des *fuorusciti* (tel le président Pertini !), mais aussi des Italiens arrêtés ou simplement surveillés dans l'Italie de l'entre-deux guerres. Un tel dossier reflète en négatif, en quelque sorte, la société italienne ; il ouvre sur la société politique, y compris sur toute cette part qui accepta le régime, des perspectives nouvelles qu'éclaire un peu plus la découverte de dossiers sur le recrutement des « Faisceaux », en telle ou telle province. Bien entendu, cette sorte d'enquête implique l'analyse d'échantillons et leur traitement informatique. Et j'ajoute qu'il sera utile (dès que se mobiliseront les chercheurs compétents) d'étendre au-delà de la vie politique ces investigations sur le développement de l'économie italienne. N'importe, le chantier ouvert est déjà considérable.

En évoquant Goyau, Dufourcq et Duchesne, je pensais à l'histoire du catholicisme romain au XIX^e et au XX^e siècle. L'ouverture des Archives du Vatican facilite l'intervention des chercheurs. Depuis quelques années peuvent être consultés des dossiers qui portent sur les premières décennies de notre siècle, à une époque où

l'Eglise doit surmonter la crise moderniste et aussi où la rivalité des grandes puissances devient plus âpre et aboutit à une première guerre mondiale. Mais les historiens du présent ont également l'immense chance de pouvoir utiliser toute une documentation orale ; même lorsque les dossiers de l'*Archivio* restent encore clos, ils ont le devoir de confronter les textes publiés, les souvenirs rédigés qui réinterprètent à travers le filtre des mémoires individuelles des événements récents, avec les témoignages oraux des acteurs et des observateurs qui assistaient aux grands événements de la catholicité. Telle était l'intention de deux grands colloques qui réunirent en 1983 et en 1986, acteurs, témoins et historiens pour étudier le pontificat de Paul VI (les actes ont été publiés) et le deuxième Concile du Vatican (dont les actes paraîtront à la fin de l'année). Une fois encore, je me limite à ces exemples pour présenter, dans sa diversité, l'activité de l'Ecole : ils évoquent le présent et illustreront, j'en espère, l'avenir des recherches farnésiennes.

M.M.-K. : Qui vient à Rome ? Quelles spécialités se côtoient et se complètent chez les Farnésiennes ?

C.P. : L'Ecole accueille seize membres qui passent en principe trois ans à Rome et qui partagent leur temps entre un programme de recherches personnelles, sanctionné avant la fin du séjour romain par la soutenance d'une thèse et par l'envoi d'un mémoire soumis à l'examen de l'Académie des inscriptions et belles-lettres. Antiquaires, médiévistes, spécialistes d'histoire moderne et contemporaine : depuis sa fondation, l'EFR recrute dans le monde des jeunes historiens, des archéologues ou de jeunes savants qui sont un peu tout cela. Je n'oublierai pas non plus les historiens du droit, toujours présents parmi nous, et également les historiens de l'art. Le Farnésien reste fidèle à une tradition illustrée par Eugène Müntz, par Pierre de Nolhac, par Bataillon ; le premier fut membre de l'EFR dès l'origine, en 1873 ; le second, une dizaine d'années plus tard. On sait ce que leur doivent les études sur l'humanisme et sur l'art de la Renaissance. Les spécialistes de littérature italienne peuvent trouver légitimement place à l'Ecole comme tous les autres spécialistes des sciences humaines dont les recherches impliquent un séjour italien, par exemple les préhistoriens, les géographes. En un mot, l'Ecole ne s'inquiète pas de choisir, parmi les nombreux candidats qui sollicitent le recrutement, des spécialistes immédiatement disponibles pour ses programmes actuels : elle souhaite accueillir les jeunes chercheurs dont les qualités de sérieux et d'innovation permettent d'enrichir et de renouveler la vie scientifique de l'établissement.

Car les programmes scientifiques dont j'ai ébauché la présentation pour chacune des sections et les chantiers archéologiques mobilisent la collaboration de chercheurs qui n'appartiennent pas à l'Ecole ; elle fait appel à d'anciens membres de l'EFR, poursuivant, à l'occasion de séjours réguliers, des recherches inscrites dans l'une des activités de l'EFR. Tel membre de l'Ecole qui prépare actuellement un doctorat d'Etat sur les migrations italiennes au XX^e siècle continuera

après son séjour farnésien une enquête, programmée par l'EFR pour l'étude de précieuses archives conservées à l'*Archivio di Stato*.

Mais il faut ajouter le réseau de collaborations très variées que tisse le système des bourses accordées par l'Ecole (133 mensualités par an) distribuées également entre les trois sections (Antiquité, Moyen Age, Histoire moderne et contemporaine) : ces bourses qui permettent l'accueil à la *Foresteria* de Piazza Navona, sont offertes à tous les chercheurs titulaires du DEA et, bien entendu, aux universitaires, chargés de recherche, assistants, maîtres assistants et maîtres de conférences. L'Ecole accueille également comme boursiers (un tiers au total au moins) des jeunes chercheurs italiens, tunisiens, marocains, yougoslaves, venus de tous les pays et de toutes les institutions avec lesquels elle établit des collaborations régulières.

M.M.-K. : La Bibliothèque contribue beaucoup au rayonnement de l'Ecole. Quelle est votre politique en matière de publications ?

C.P. : L'Ecole publie des livres : une vingtaine de volumes, il y a quatre ou cinq ans, actuellement près d'une trentaine : les thèses des anciens membres et aussi celles d'auteurs qui ont écrit sur des sujets intéressant la compétence de l'Ecole ; les thèses d'Etat, ces livres dont on dit beaucoup de mal, sans bien les connaître, sans bien se rendre compte que la Bibliothèque des Ecoles françaises de Rome et d'Athènes avec ses trois cents volumes depuis 1887 constitue un apport irremplaçable et donne, aux yeux de la communauté internationale, une illustration prestigieuse de la science française. Certaines thèses peuvent être tout à fait oubliées mais beaucoup restent utiles, parfois irremplaçables, pour le progrès de la science contemporaine. L'EFR publie également les actes des colloques, les comptes rendus des recherches farnésiennes (investigations dans les archives, comptes rendus des fouilles). L'Ecole, qui est l'éditeur, et le conseil scientifique, qui examine les projets de publication, ne s'inquiètent que de la qualité de la science et de la recherche. Ils ne demandent pas à l'auteur d'écrire pour séduire ou pour faire plaisir au public en cherchant l'effet et l'éclat passagers. Et malgré tout, ces livres spécialisés et techniques se vendent en France, en Italie, et de plus en plus dans les pays anglo-saxons. Assurément l'Ecole ne prétend pas aux grands tirages mais ces ventes sont d'autant plus indispensables qu'elles financent les publications futures, en un temps où il est devenu pratiquement impossible d'obtenir des subventions pour les thèses. L'EFR publie évidemment en français, avec un centre éditorial établi dans la Péninsule où il trouve aisément une diffusion. Elle publie également en italien, tout particulièrement dans la revue farnésienne, les *Mélanges* (quatre volumes chaque année, deux pour l'Antiquité, deux pour le Moyen Age et les Temps modernes). De cet exemple, on retiendra peut-être qu'il y a place, dans notre communauté scientifique, pour les éditions savantes et aussi pour l'usage international de notre langue.



Palais Farnèse. (© EFR).

M.M.-K. : *Comment voyez-vous, Monsieur le Directeur, le rôle actuel de l'Ecole et son orientation dans les années à venir ?*

C.P. : L'Ecole a passé avec des établissements scientifiques italiens et français des conventions, organisant ainsi un système d'accords qui illustrent les techniques d'une coopération franco-italienne et qui en manifestent également l'esprit et le style. Car il n'est pas d'opération farnésienne qui ne soit franco-italienne. Cette attitude qui traduit, depuis la direction de Georges Vallet, un choix délibéré ne se justifie pas seulement pour tous les avantages pratiques que vaut cette collaboration, j'insisterai sur les raisons intellectuelles et psychologiques d'une osmose scientifique qui réalise concrètement, sans tapage, par un effort tenace, une entreprise commune redonnant vie pour le présent, aux valeurs enfouies dans un passé ancien ou récent, de notre commune tradition méditerranéenne. La même remarque vaut pour les relations de l'Ecole avec le milieu scientifique français : l'Ecole, dans les limites de sa compétence, a la responsabilité de représenter, le mieux

qu'elle le peut, la communauté savante de notre pays, dans toute la richesse de sa diversité. C'est dire tout le prix que l'Ecole attache à organiser, avec les établissements scientifiques français, une collaboration régulière : des universités (parisiennes et provinciales), des grands établissements (Collège de France, Ecole des chartes, Ecole pratique des hautes études en sciences sociales, Fondation nationale des sciences politiques). Au premier rang de toutes ces institutions : le Centre national de la recherche scientifique avec lequel l'EFR a passé une convention qui formalise et renforce une coopération déjà ancienne. Les équipes du CNRS et le Centre donnent un appui efficace à quelques-uns des programmes farnésiens : les recherches sur Rome, sur l'habitat rural au Moyen Age, sur la « Famille et la parenté », sur les migrations italiennes. Je souhaite que cette sorte d'accord facilite les échanges de chercheurs, permette le plus largement possible l'accueil des spécialistes français dont le programme implique un séjour italien.

Dans ce réseau d'échanges et de collaboration, l'Ecole voudrait définir un peu

sa raison d'être, le style de son action : j'y placerais au premier rang le souci de liberté, le refus des préjugés et des querelles épistémologiques, le souci d'une sorte d'œcuménisme intellectuel, si vous me pardonnez ce terme un peu spécialisé. J'ajouterai la volonté délibérée de concilier le caractère personnel, individuel, de toute recherche avec la nécessité d'une programmation assurant la continuité et l'efficacité des grandes enquêtes.

Car en fin de compte, si vous me permettez une défense et une illustration des sciences humaines, je crois qu'une noble tâche est assignée à l'historien comme le disait mon maître, Henri Marrou, celle de rendre vivantes pour le présent les valeurs enfouies dans le passé. Au moment où se constitue l'Europe, redonner par l'étude force et vie aux valeurs des civilisations de la Méditerranée latine, telle est bien la mission confiée depuis sa fondation à une Ecole établie à Rome. □

Entretien réalisé
par Monique Mounier-Kuhn.

La passion de Signora Madeleine

La médaille d'argent du CNRS a récompensé la qualité et l'originalité des travaux de Madeleine Cavalier, réalisés en constante collaboration avec le surintendant de Syracuse, Monsieur Giuseppe Voza.



A Lipari, on l'appelle Signora Madeleine. Les habitants ont adopté cette archéologue française qui a choisi leur île pour y construire son œuvre scientifique, c'est-à-dire sa vie : l'histoire de l'archipel éolien, du Néolithique à la Grande-Grèce, de Rome aux Barbaresques.

Madeleine Cavalier, directeur de recherche au CNRS, conservateur du Musée archéologique éolien, rayonne, à 57 ans, de l'éternelle jeunesse de ceux qui réalisent leur passion.

Son itinéraire est singulier. Elle n'a aucun titre universitaire, pas même le baccalauréat. Menacée de cécité, l'adolescente renonce aux études. Mais son goût précoce pour l'archéologie s'affirme. Rétablie, elle assimile géologie, mythologie, littérature pour devenir une familière des mondes de l'Antiquité.

La volonté, la curiosité, cette bienveillance attentive et souriante qui lui vaut tant d'amitiés sont déjà, et demeurent aujourd'hui, les traits distinctifs de Madeleine Cavalier.

Elle a la chance de rencontrer à l'Institut d'études ligures, où elle vient compléter son bagage, l'archéologue italien Luigi Bernabò Brea, qui lui apprend ses techniques et ses méthodes de recherche. En 1951, il lui confie la responsabilité des fouilles des îles Éoliennes, qu'elle dirige depuis lors, en étroite collaboration avec la surintendance des Antiquités de Syracuse.

Madeleine Cavalier s'installe à Lipari. Situé au nord de la Sicile, l'archipel éolien est formé de sept îles volcaniques, cônes colorés d'ocre et de gris, posés sur le bleu intense de la mer Tyrrhénienne. Îles de vent et de feu, elles avaient vécu 3 000 ans de civilisation avant la naissance de Rome. Eole, dont le culte remonte sans doute à l'époque mycénienne, régnait sur Lipari. Vulcano, Vulcanello étaient encore en activité, et comme aujourd'hui, le Stromboli grondait dans la nuit. L'île des Cyclopes, l'autre d'Héphaïstos, les « Plinčiai », ces îles de pierre ponce qui flottent dans la mer, toutes ces légendes antiques sont nées des volcans.

Des volcans aussi sont nées les richesses : l'obsidienne, dont on fait armes et outils, exportée vers le continent pendant tout le Néolithique, apporte la prospérité ; la pierre ponce, encore exploitée aujourd'hui, fait l'objet d'un commerce fructueux ; le kaolin et l'argile sont à l'origine des poteries qu'on trouvera dans toute la Grande-Grèce, avec leur facture propre. Des centaines de fragments attestent la régularité et l'intensité des échanges entre les Éoliennes, la Grèce mycénienne et les Cyclades.

De là mer, sont venus en ondes successives les hommes : navigateurs créant des comptoirs, colons s'installant sur les pentes fertiles, puis se repliant sur les hauteurs devant de nouveaux envahisseurs. Des « cabanes », comme celles exhumées au-dessus d'une crique à Panarèa, marquent les lieux du peuplement primitif. Les urnes funéraires, les diverses tombes montrent les rites. Les amphores, les épaves indiquent les lieux de naufrage.

Patiemment, Madeleine Cavalier organise les fouilles et parcourt, site après site, tout le champ des civilisations qui ont marqué l'archipel. Les vestiges sont souvent mis en valeur sur le terrain, par exemple les tombeaux du centre de Lipari ou la « Tholos mycénienne », découverte exceptionnelle due à Madeleine (voir encadré).

Le Musée archéologique éolien a été créé, dès 1953, pour présenter les matériaux mis au jour. Il comprend tout ce que les îles ont reçu et produit d'objets antiques. Aux trois sections initiales : préhistoire, colonisation grecque, archéologie sous-marine a été ajoutée une salle de volcanologie, seule de ce type en Italie.

Les quelque douze mille visiteurs qui viennent chaque année faire du tourisme culturel dans l'archipel prennent ici conscience de la liaison dangereuse et féconde entre l'homme et son environnement.

□ Madeleine Cavalier, directeur de recherche au CNRS, conservateur du musée archéologique de Lipari (îles Éoliennes), est membre de l'équipe dirigée par Georges Vallet (UA 1220 CNRS). Les recherches, qui portent sur la Préhistoire et la Protohistoire, sont conduites en étroite coopération avec les autorités italiennes et en particulier les surintendants de chaque région concernée.



Petits modèles en terre cuite, pour la reproduction des masques de tragédie (I^{er} moitié du IV^e siècle av. J.-C.) (D.R.).

Chaque collection du musée est disposée et légendée par Madeleine : les pièces de bronze, le petit lion sculpté cher à Eole, symbole de Crète, les masques de la Tragédie et de la Comédie, ceux des dieux et des héros, les représentations de Dionysos, dieu du vin et des béatitudes ultra-terrestres... Ce défilé des figures de l'Antiquité se poursuit sur les vases à fond noir, par des quadriges et des victoires ailées, des brodeuses et des fileuses, images de guerre et de paix.

Une vitrine retient particulièrement le regard, celle qui réunit les coupes décorées par un maître de l'époque hellénistique : « le Peintre de Lipari » (III^e siècle av. J.-C.) qui traite, dans une vive polychromie, selon un dessin d'une harmonieuse souplesse, des scènes de mariage et de festins ou la réunion de l'âme à la divinité.

Dans la monographie qu'elle lui a consacrée, Madeleine Cavalier étudie le style et l'influence de cet artiste, chef de file d'un art local désormais connu. Elle est aussi l'auteur du catalogue exhaustif des Trésors du Musée, et d'importants volumes dans la série « Meligunis Lipara », synthèse des recherches sur l'archipel éolien.



Petit lion en bronze trouvé dans le puits sacré (le lion était le symbole de la ville de Crète), (D.R.).

Madeline vient de lancer un nouveau chantier avec dix fouilleurs du pays, sur l'enceinte de Lipara (IV^e siècle av. J.-C.). Au Musée, l'exposition consacrée aux masques a été un succès cet été. Des communications, des publications sont au programme des mois à venir. Et elle a planté de sa main des lauriers-roses et des bougainvillées pour embellir encore le décor de sa recherche.

M.M.-K.

La Tholos

Pour expliquer sa découverte récente, la Tholos mycénienne de San Calogero, sur une des hauteurs de Lipari, une étuve thermique chauffée par les vapeurs sulfureuses des terres volcaniques, l'archéologue se fait conteuse.

« Les sources chaudes de Lipari, citées par Diodore et Strabon, étaient les plus fameuses du monde antique. Jean Houel, peintre de Louis XVI, en voyage dans nos îles, a laissé une description et un dessin de cet édifice, qu'il croyait d'époque romaine. Nous étions parfois entrés dans l'étuve, mais sans pouvoir l'étudier, du fait de l'obscurité et de l'air saturé d'aux émanations volcaniques. La rénovation des thermes en 1984 nous a permis d'examiner la vieille coupole, enfin éclairée et accessible. C'était incroyable ! Nous avions là une fusée coupole, construite en blocs équarris, en assises isodomes superposées en saillies, et formant des cercles concentriques de plus en plus petits vers le haut : une structure ressemblant aux « Tholoi » mycéniens.

Les sondages ont confirmé notre impression. Les fouilles nous ont livré des témoignages de toutes les époques, de la fondation de la Lipara crétienne vers 580 av. J.-C. à la fin de l'Empire romain. Pour la datation, nous disposons de deux séries de fragments de l'Age de bronze : une trentaine de tessons d'une forme constamment associée à la poterie proto-mycénienne I et II, dans les cabanes de notre acropole et dans l'île de Filicudi, le Capo Graziano. Cette découverte, à Lipari, d'un monument caractéristique de l'architecture mycénienne — le premier trouvé en Méditerranée occidentale — complète le tableau qui résulte de 40 ans de recherches.

Au II^e millénaire, les îles éoliennes, qui dominent une des voies les plus importantes de la navigation dans l'Antiquité, celle qui traverse le détroit de Messine, étaient les bases avancées de l'expansion et du commerce égyptien vers l'Occident. Notre Tholos confirme et renforce cette certitude historique ».

EDITH LE COURRIER DU CNRS



Nike (Victoire) en vol, sur une petite coupe datée des environs de 470 av. J.-C. (D.R.).

Megara Hyblaea, une des premières cités grecques d'Occident

Une visite du site avec Georges Vallet.

Georges Vallet est le responsable scientifique des fouilles de Megara depuis quelque quarante ans. Il explique l'enjeu des recherches :

« Fondée au VIII^e siècle av. J.-C., vaincue par Syracuse en 483 et rasée, encore détruite en 213 après un siècle d'une nouvelle colonisation hellénistique, Megara Hyblaea ne sera jamais reconstruite. Au XVIII^e siècle, les voyageurs découvrent en Sicile les « curiosités » de la nature et parmi d'autres lieux célèbres par les auteurs anciens, « Megare ».

L'Italien Paolo Orsi dirige les premières fouilles régulières, de 1880 à 1920. À partir de 1946, Albert Grenier examine les possibilités de recherche. C'est un endroit désert, épargné par l'urbanisation, où des paysans cultivent quelques champs. L'essor industriel de la région n'a pas commencé. Malgré une faible épaisseur de terre, c'est un site exceptionnel qui offre une grande liberté de travail.

Qu'est venue étudier dans l'immédiat après-guerre l'Ecole française de Rome, qui est ici le maître d'œuvre, sur les plateaux calcaires de Megara Hyblaea ? Tenter de comprendre sur un site où une recherche systématique était possible, la naissance et le développement d'une cité coloniale, c'est-à-dire une ville nouvelle, une ville de fondation. Il y avait le problème des échanges (je pense aux travaux de François Villard), le problème de la cité et de son territoire (comment oublier l'apport du regretté Paul Auberson), avec tous les contacts entre les colons grecs et le monde indigène. Tout cela a donné un programme de travail établi en commun avec nos amis italiens, pour les fouilles de Naxos, Syracuse, Camarina, et des résultats spectaculaires, régulièrement publiés.

La valorisation du site et du matériel archéologique de Megara est assurée par la Surintendance et la région sicilienne : sur place, des tables d'orientation, des plans, un circuit commenté, en fonction des phases historiques, en liaison avec chaque *Antiquarium* et avec le nouveau musée de Syracuse, inauguré en janvier 1988 par le Président de la République italienne.

Nous travaillons dans une atmosphère de collaboration féconde. D'où notre reconnaissante amitié pour les surintendants qui se sont succédé à Syracuse et tout le personnel technique et scientifi-



que. Nous avons toujours reçu ici un accueil extraordinaire de la part des autorités et de nos collègues italiens, depuis le début des recherches jusqu'à aujourd'hui.»

La fondation

Ce vaste plateau de terre et de pierres, entre la mer Ionienne et les monts Hybléens, est un site vieux de vingt-sept siècles.

Megara Hyblaea est fondée vers 730 av. J.-C. par des Doriens de Megare, rivale d'Athènes, abordant, sous la conduite de Lamis, au rivage oriental de la Sicile.

A l'arrivée, chacun reçoit une égale parcelle de terrain : ce lot, certains l'ont joué, d'après un poète grec, comme leurs effets, sur le bateau pendant la traversée. La cité est fondée selon un plan ambitieux, prévu dès le début. On voit grand.

Megara, du nom de la cité-mère, Hyblaea, en référence à l'arrière-pays sicule, est l'une des premières fondations grecques de Sicile, dix générations après la Guerre de Troie, indique Strabon.

Au Nord, des Chalcidiens créent Naxos, Catane, Lentini, près de l'Etna ; au Sud, des Corinthiens s'installent à Syracuse. Sur la côte méridionale de l'Italie, Sybaris, Crotona, Metaponte vont être fondées par des Achéens, et Tarente, par des Spartiates.

Ainsi, au VIII^e siècle, les Grecs essaient vers la Méditerranée occidentale, dans ce nouveau monde qui deviendra la Grande-Grèce, avancée d'une civilisation en expansion.

La cité et son territoire

Megara couvre environ soixante hectares ; à vingt kilomètres au Nord, Lentini, à vingt kilomètres au Sud, Syracuse. A

l'Ouest, sur vingt kilomètres également, les limites du « territoire » dépendant de la polis. A l'Est, sur vingt-trente kilomètres environ, pénétrant vers l'intérieur le long de gorges encaissées, le « territoire » proprement dit de la nouvelle cité. Au-delà, l'arrière-pays où étaient fixés les Sicules : leur chef Hyblon a dû concéder l'espace nécessaire à cette fondation.

La vie publique s'ordonne dans la polis, l'organisation spatiale du territoire correspondant aux structures sociales urbaines, puisqu'il reflète la localisation des terres. Le tracé de la ville est géométrique. Les principaux axes ont cinq mètres ou trois mètres de large. Les rues, orientées Est-Ouest et Nord-Sud, délimitent des îlots de vingt-cinq mètres de côté. Des palissades de bois protègent les premières installations. Plus tard, une enceinte énorme flanquée de tours assurera la sécurité de la ville, face aux attaques des « barbares » de l'intérieur, des pirates de la mer Tyrrhénienne, et surtout face aux colons rivaux des cités voisines.

Au cœur, l'Agora, spacieuse, forme un trapèze de 2 400 mètres carrés, où se dressent les monuments publics : les temples massifs, aux puissantes colonnes doriques, le sanctuaire dédié au héros fondateur, la Palestre, et les édifices civils des magistrats, le Prytanée.

A la périphérie, les nécropoles : les tombes reçoivent, en dépôt sacré ou en signe d'affection, le beau vase corinthien ou attique, la statuette votive, des fibules, des choses de la vie évoquant les travaux et les jours, et aussi les croyances.

Rien de plus simple, de plus rudimentaire que la maison des premiers colons : une seule pièce carrée (4 m x 4 m) alignée sur la rue, puis la famille venant, on construit une seconde pièce, puis une troisième. C'est là le module de la maison coloniale, ouvrant au Sud sur la cour avec le puits, le four, des appentis.

L'économie repose sur les richesses du « territoire » et sur les échanges avec le monde grec, par la mer, avec les groupes indigènes par l'intérieur. Rapports que l'on peut imaginer au fil du temps, entre arrivants et autochtones. Pensons au rapt des Sabines...

Ces hommes, comment vivent-ils ? De la terre, plus fertile qu'aujourd'hui : il pouvait davantage et les collines étaient boisées ; des céréales, de la vigne, l'olivier, bref Demeter, Dionysos, Athena, la Triade méditerranéenne. Dans l'arrière-pays, les moutons (le fromage et la laine de Sicile étaient réputés en Grèce), les chevaux des nobles cavaliers doriens, et surtout les abeilles, avec le fameux miel de l'Hybla que chantera Virgile.

On fait le pain, mieux : la galette, à la maison (les meules) ; on y tisse la laine (les peons) ; on échange les produits de la terre avec les objets de l'artisanat grec ; la céramique, si connue, des denrées périssables aussi, et les luxueux habits des hymnes homériques...

Outre les marbres importés, on utilise le calcaire blanc du pays, d'une taille facile. Les Grecs implantent leur architecture, en même temps qu'ils transforment le paysage.

Les mondes indigènes et la colonisation grecque en Italie méridionale et dans les îles.

Ce titre de l'équipe dirigée par Georges Vallet illustre exactement l'orientation actuelle : l'étude de la naissance des civilisations occidentales à travers la circulation des personnes, des croyances, des produits entre l'arrière-pays indigène et les colonies fondées par les Grecs.

Les recherches portent sur la préhistoire et la protohistoire, puis sur les fondations grecques, du VIII^e au V^e siècle, en Italie du Sud, de Naples à Tarente, et en Sicile.

Les programmes sont établis en étroite coordination avec l'Ecole française de Rome. Le sol, les inscriptions, les textes anciens : telles sont les sources d'information.

Les chercheurs français du CNRS et des universités travaillent ici, comme dans toute l'Italie, dans le cadre d'accords passés avec la Surintendance de chaque région et en liaison avec les établissements italiens.

Les publications paraissent dans les revues ou les collections scientifiques des deux pays. L'Ecole française de Rome a publié notamment les résultats des fouilles de Megara, comme elle l'a fait pour le monde étrusque, à Bolsena.

Principaux thèmes de travail :

— la cité et le territoire des colonies grecques : urbanisme, espace colonial, rites, arts, à Cumae, la plus ancienne fondation grecque d'Occident, à Syracuse, Megara, Naxos, Rhegium, Lipari.

— histoire de la Terre et archéologie : l'évolution du climat et du littoral, les phénomènes volcaniques et sismiques sont analysés par rapport à leurs effets sur la vie des hommes : en Campanie (Vésuve, Champs phlégréens...), en Sicile (Etna), dans les îles Eoliennes (Stromboli). Géologues et volcanologues collaborent avec les archéologues au programme mis au point par Claude Albore-Livadie, maître de recherche au CNRS.

— préhistoire et protohistoire : fouilles sur un habitat de l'âge du cuivre, à Piano di Sorrento, sur un établissement de l'âge du bronze à Nola, sur les centres indigènes de l'intérieur, à Capoue, à Calatia ; fouilles à Amendolara (Juliette de La Genière). A Paestum, les recherches réunissent sous la direction de la Surintendance des équipes du CNRS, de l'Ecole française, de l'Institut oriental de Naples.

Cette équipe du CNRS — l'unité associée 1220, Département des sciences de l'Homme et de la Société — comprend seize chercheurs dont neuf du CNRS. Son responsable est Georges Vallet, directeur de recherche au CNRS, historien et archéologue, ancien directeur de l'Ecole française de Rome, de 1970 à 1983. L'UA est basée à Naples, au Centre Jean Bérard, avec lequel la collaboration est constante, en particulier pour les publications.

Le Centre Jean Bérard, dont le directeur est Olivier de Cazanove, relève du ministère des Affaires étrangères.

◀ Megara Hyblaea (Sicile) : plateau Sud ; rue C 1 vue du Nord (largeur cinq mètres).
© EFR M1101141.

Le Musée

Un *Antiquarium* existe sur place. Mais l'essentiel du matériel provenant des fouilles est groupé au nouveau Musée de Syracuse, conçu pour valoriser non seulement des objets mais des recherches.

Construit par F. Minissi, l'architecte du Musée Etrusque de la Villa Giulia à Rome, le Musée Paoli Orsi, inauguré en janvier 1988, présente Megara, Ortygie, Syracuse... selon une démarche esthétique et didactique conforme aux exigences scientifiques actuelles.

Aux typologies horizontales, — les « collections » d'antan — on substitue « la verticalité de l'histoire ». Chefs-d'œuvre de l'art et objets du quotidien sont insérés, pour chaque époque, dans leur contexte historique, illustrant les techniques, les usages, les cultures qui se côtoient avant de se mêler.

Ici, en effet, se côtoient un monde grec et des mondes indigènes, comme le montre la statuaire de Megara. Une première pièce du VIII^e siècle magnifique dans sa simplicité archaïque, le Xoanon, puis au milieu du VI^e siècle, une belle statue de

Kouros, un médecin dans le plus pur style grec, et à la même date, une déesse-mère, vêtue d'un ample manteau, allaitant deux enfants, qui évoque « la profondeur des mentalités indigènes ».

Ce parcours, on peut le faire maintenant, grâce à l'œuvre scientifique accomplie par tous, et présentée à chaque pas dans le récit de Georges Vallet, à Megara. □

□ Monique Mounier-Kuhn, chargée de mission pour les affaires culturelles à la Direction de l'information scientifique et technique du CNRS, 15, quai Anatole-France, 75700 Paris.

Hors-série du *Courrier du CNRS* n° 69-70 — septembre-décembre 1987.

Directeur de la publication : Goëry Delacôte.
Rédacteur en chef : Véronique Bressollet-Condé.
Commission paritaire : AD 303. ISSN : 0-153-885-X.
© Centre National de la Recherche Scientifique.

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
15, QUAI ANATOLE-FRANCE 75700 PARIS, TÉL. (1) 45 55 92 25, TÉLEX 260 034



LE COURRIER DU CNRS

CNRS
Bureau des archives
Délégation Paris Michel-Ange
3, rue Michel-Ange
75794 Paris cedex 16



69-70

**UNE INTERVIEW
DU DIRECTEUR GÉNÉRAL
PAR MARTINE BARRÈRE***
7 octobre 1987

Entretien avec Serge Feneuille, Directeur Général du CNRS

Martine Barrère - En juin 1986, Alain Devaquet a pris la décision, dans les circonstances que l'on connaît, de suspendre les travaux du Comité National du CNRS. Jusqu'au printemps 1987, le fonctionnement administratif de l'organisme a été bloqué. Que s'est-il passé au CNRS pendant tout ce temps ?

Serge Feneuille - Effectivement, le fonctionnement administratif du CNRS a été partiellement bloqué. Mais si vous êtes allée dans des laboratoires, vous avez pu constater que les équipes continuaient à travailler et à produire. Lorsqu'on regardera plus tard la production de 1986-87 en termes de résultats scientifiques, on n'observera pas de creux, j'en suis convaincu. Le CNRS n'est pas une administration : ce n'est pas seulement le 15, quai Anatole France. Le CNRS c'est, avant tout des laboratoires. C'est là que se passent les choses intéressantes. Cela étant dit, le « blocage » dont vous parlez a eu deux conséquences graves :

- la première, évidente, concerne le recrutement des chercheurs. Nous avons maintenant complètement redressé la situation, mais cela a été long. Il a fallu que paraissent de nouveaux décrets, il a fallu organiser des élections. Elles se sont déroulées dans un temps record et je voudrais d'ailleurs remercier tous ceux qui s'en sont occupés. Puis il a fallu attendre les nominations du Comité National et ouvrir un concours. C'est toujours très long. Je regrette personnellement la lourdeur de ces procédures. Mais, dans le cas présent, je puis vous assurer qu'au CNRS, nous avons fait aussi vite que possible ;

- la seconde touche à l'image que le CNRS offre aux jeunes chercheurs ; cette aventure laissera des traces et cela est grave.

M. B. - Les commissions du CNRS n'existaient plus et, par là même, l'évaluation scientifique ne put être menée à bien. Cela n'a-t-il pas porté tort au CNRS ?

S. F. - Oui cela a porté tort ; mais pas au niveau où on le croit. Pour la gestion quotidienne et l'attribution des crédits, il y a une certaine continuité dans l'action scientifique. L'absence de Comité National, et c'est plus grave, nous a gênés pour

l'élaboration de notre politique scientifique. Exprimer une politique scientifique sans l'avoir fondée sur une instance d'évaluation et de prospective n'a pas de sens, j'en suis convaincu. Aussi, j'ai tenu à réunir des commissions d'experts dès le mois de septembre 1986 pour mener cette réflexion prospective que je crois indispensable. Il en est sorti, par exemple, un *Rapport de prospective* sur les sciences de la vie. Il a été présenté au Conseil d'Administration il y a un mois. Il sortira dans le grand public après discussion par le nouveau Comité National.

Par ailleurs, en cas d'urgence, il faut aussi savoir ne pas s'enfermer dans les procédures du Comité National. Quelquefois, il faut aller très vite et anticiper ses avis. Prenez l'exemple des supra-conducteurs à haute température : le CNRS est l'organisme qui a réagi le plus vite sur ce sujet. On a mis, en milieu d'année, une somme de l'ordre de cinq millions. Or, sortir cinq millions d'un budget affecté est difficile. Je vais vous donner d'autres exemples de décisions qui ont pu être prises en cours d'année ; elles devront bien sûr être examinées par le Comité National puisque, encore une fois, il faut fonder la légitimité de notre politique scientifique. Un effort important a été poursuivi dans le domaine de la biologie végétale. Il avait été lancé par nos prédécesseurs, à Strasbourg en particulier ; nous sommes en train de l'amplifier à Gif-sur-Yvette. Ce sont des opérations qui coûtent des dizaines de millions. Pourtant il faut les réaliser car elles correspondent à un objectif clair : renforcer la biologie végétale en France. Autre exemple, la décision d'implanter, près de l'Ecole Normale Supérieure de Lyon, un laboratoire propre du CNRS en chimie des protéines. Là aussi, nous avons le sentiment qu'il y a une faiblesse au niveau national. Dernier exemple qui a été l'un des axes de notre politique : le développement de nos relations avec les entreprises et celui des laboratoires mixtes.

M. B. - Finalement, votre discours en terme de politique scientifique apparaît en continuité avec les options de votre prédécesseur ?

S. F. - Heureusement. Ce n'est pas un hasard s'il y a une grande continuité ! J'ai le plus grand respect pour ce qu'a fait mon prédécesseur et mes prédécesseurs d'une manière plus générale... Prenez les laboratoires mixtes qui avaient été lancés en 1985-86. Notre objectif est la création d'une cinquantaine de laboratoires mixtes en cinq ans. Je crois que nous y parviendrons, car ce sont les industriels eux-mêmes qui viennent me dire « Et si nous faisions un laboratoire mixte ! ». Il est

une chose qu'il faudrait que l'on comprenne en France : la recherche demande une continuité de l'effort et nécessite une politique qui soit cohérente pendant un certain nombre d'années. Nos voisins, les Allemands en particulier, savent très bien faire cela. Nous, nous ne le faisons pas assez.

Dans le fonctionnement du Comité National, nous avons rappelé très fortement la nécessité de la prospective et, à cet effet, nous avons imposé aux commissions d'avoir une réflexion prospective sur un sujet particulier au moins une fois tous les deux ans.

M. B. - Pourquoi n'a-t-il fallu attendre l'arrivée de Jacques Valade pour demander au Conseil d'Etat lui-même les implications réelles de son avis et les suites qu'il fallait lui donner ?

S. F. - Vous me posez une question qui va bien au-delà de mes compétences. Je ne suis pas moi-même juriste, mais je peux vous dire qu'au mois de juillet 1986 tous les juristes que M. Alain Devaquet avait contactés et auxquels il avait demandé conseil, étaient unanimes pour penser qu'en dehors d'une loi de validation, la seule solution était de refaire des élections. On m'a expliqué plus tard que M. Devaquet aurait dû au préalable annuler les élections antérieures, mais je ne veux pas entrer dans cette polémique.

Honnêtement, je n'ai pas d'avis sur cette question. Dès qu'on aborde le domaine du législatif, on risque de toucher le domaine politique que je me refuse à analyser. Laissez-moi cependant poser une question : dans le contexte de juillet 1986, une loi de validation aurait-elle été votée par le Parlement ?

M. B. - On ne saura jamais ! Je veux bien croire que les juristes consultés par Alain Devaquet disaient tous la même chose. Mais d'autres juristes s'exprimaient haut et fort à l'époque et avançaient une position bien différente. Pourquoi ne pas les avoir aussi écoutés ? Pourquoi n'avoir pas adopté en juin 1986, la solution finalement prise en mars 1987 ?

S. F. - Encore une fois, il m'est difficile de vous répondre parce que cette affaire touche au domaine législatif et juridique sur lequel je n'ai rien à dire. Mon seul souci a toujours été que ces concours puissent se tenir le plus vite possible. A chaque fois que je rencontrais les juristes qui suivaient cette affaire, dans cette Maison ou au Ministère, je leur disais « faites ce que vous voulez, mais surtout trouvez-moi la solution pour débloquer la situation ! ».



© ORFÈVRE

M.B. - Vous n'êtes pas un homme qui fuit de la politique et vous ne passez pas de lois ; qu'avez-vous fait pendant cette période ?

S.F. - Je vais vous dire ce que j'ai fait. Mon rôle était d'essayer de minimiser les conséquences de cette affaire, de faire que la « Maison » puisse tourner. Là encore, la communauté ne s'y est pas trompée. Bien que certains nous aient critiqués d'avoir proposé des contrats à durée déterminée, n'oubliez pas que cela a permis à environ deux cent soixante-dix jeunes d'avoir des moyens de subsistance décents pendant un certain nombre de mois pour attendre les concours. D'autre part, nous avons eu une action beaucoup moins directe mais tout aussi efficace, qui a été de solliciter les industriels, les sociétés savantes et autres fondations, afin qu'un grand nombre de jeunes chercheurs puisse subsister pendant cette période. Finalement quand vous regardez le résultat du concours qui s'est déroulé, vous vous rendez compte que nous ne nous étions pas beaucoup trompés dans nos attributions, parce que la plupart de ceux

qui ont bénéficié de contrats ont intégré le CNRS. Notre deuxième action a été de faire notre possible pour remettre rapidement un nouveau Comité National en place. C'était pour moi la priorité des priorités.

M.B. - Là encore, pourquoi a-t-il fallu tant de temps pour que le nouveau Comité se mette en place ? Plusieurs mois ont été perdus.

S.F. - Je n'ai pas à faire de commentaires là-dessus. Tout ce que je peux dire, c'est que les élections se sont déroulées en un temps record. A chaque étape de mon « tour de France », j'ai dit à ceux que j'ai rencontrés : « Nous aurons terminé les élections avant le 15 mai ». Nous les avons terminées vers le 19. Quatre jours de retard, ce n'est pas si mal, croyez-moi, avec une énorme machine de 80 000 électeurs... ! Quant aux nominations, je vous rappelle que, dans le passé, il a toujours fallu de trois à six mois pour qu'elles soient effectives.

M.B. - Ce qui a caractérisé, en particulier, cette période, c'est le manque de communication de la part de la direction, tant interne qu'externe. Pourquoi une telle attitude ?

S.F. - Je ne suis pas d'accord avec votre perception. La vérité est que j'ai donné la priorité à la communication interne. J'ai fait un travail de terrain. Je vais vous faire une confidence : à quoi le Directeur Général du CNRS passe-t-il son temps ? Eh bien, je passe la plus grande partie de mon temps à recevoir des scientifiques, des partenaires du CNRS et à discuter avec eux, soit dans mon bureau, soit chez eux quand je me déplace, et je me suis beaucoup déplacé ; j'ai même fait un véritable tour de France, comme je vous l'ai dit il y a quelques instants.

Par ailleurs, quand la situation le demandait, j'ai choisi une forme directe de communication interne qui est une lettre, envoyée à tous les personnels — courte, brève — pour essayer de les informer directement. Je crois qu'une partie de la communauté scientifique a ressenti cela d'une manière très positive.

M. B. - Sans doute. Mais la transparence réelle n'apparaît-elle pas la meilleure façon de couper court aux colosses. J'avoue par exemple avoir mal compris la réforme de structure que vous souhaitez mettre en place.

S. F. - J'ai expliqué ce projet à de nombreux responsables de la communauté scientifique et en particulier aux directeurs de laboratoires. Je l'ai aussi présenté aux représentants du personnel et il a été examiné deux fois par le Conseil d'Administration.

A l'heure actuelle, qu'est-ce que l'on constate ? Un directeur général assez seul, qui a d'ailleurs des pouvoirs très étendus, et à côté de lui, des départements qui peuvent mener, s'ils le veulent, des politiques très diverses. Or, pour que le CNRS vive en tant qu'institution scientifique, il lui faut une stratégie plus unifiée, plus cohérente. Pour diriger cette Maison, il faut une équipe soudée, choisie par l'homme qui en a la responsabilité.

Quand je suis arrivé ici, j'ai trouvé près de cinquante collaborateurs directs. Bâtir une réflexion stratégique avec cinquante personnes est impossible. D'autre part, je ne suis pas un Pic de la Mirandole : se placer en expert scientifique sur l'ensemble du champ scientifique serait sombrer dans le ridicule. Il faut donc une équipe de taille limitée qui se place au niveau stratégique, c'est-à-dire qui réfléchisse sur les grandes questions qui se posent sur l'avenir de l'organisme.

M. B. - Qui étaient ces cinquante personnes ?

S. F. - Les directeurs scientifiques, les conseillers, les administrateurs délégués, les délégués scientifiques régionaux, les chargés de mission, les directeurs fonctionnels, les directeurs de PIR (1) qui relevaient directement du Directeur Général. La situation n'était pas satisfaisante car elle pouvait entraîner une certaine opposition entre la politique de la direction générale et la politique menée par les départements, ceux-ci ayant par nature tendance à se refermer sur eux-mêmes. J'ai été chargé de mission dans cette maison il y a dix ans — à cette époque-là le Directeur Général n'en avait qu'un. J'ai vu la solitude des directeurs généraux. Je les ai tous connus depuis Pierre Jacquilot. Ils avaient deux solutions : — soit avoir un domaine réservé — cela a été un peu à l'origine des programmes interdisciplinaires qui d'ailleurs fonctionnent bien, — soit avoir une petite équipe travaillant à côté du système.

Compte tenu de ces expériences, j'ai réagi de manière différente en essayant de mettre en place ce que j'appelle un niveau stratégique, avec des hommes qui auraient participé à la direction générale. D'ailleurs je voulais qu'ils soient directeurs généraux adjoints. Ils auraient oublié qu'ils étaient biologistes, chimistes ou physiciens et auraient eu la charge des problèmes stratégiques, problèmes de personnels, relations avec nos partenaires, communication, etc. A côté de ces adjoints, je souhaitais avoir de vrais responsables de départements, les directeurs scientifiques d'aujourd'hui. Ils sont avant tout des opérationnels qui doivent connaître tous leurs directeurs de laboratoires

et être sur le terrain. Ils reçoivent une large délégation de pouvoir du Directeur Général.

J'aurais voulu que les départements n'aient pas de barrières disciplinaires strictes. Les problèmes de demain vont naître de disciplines qui ne sont pas les grandes disciplines traditionnelles. Un exemple sur lequel nous venons de prendre des décisions : l'interaction entre les sciences cognitives, les neurosciences et l'informatique. Cela ne peut se passer qu'au CNRS. C'est ce qui à la fois fonde la valeur de cette Maison et sa nécessité. S'il n'y avait pas le CNRS, si vous aviez par exemple seulement l'INRIA (2) et l'INSERM (3), je suis sûr qu'une telle rencontre serait beaucoup plus difficile à organiser du fait des structures mêmes.

M. B. - Vous pensez que de nouvelles disciplines scientifiques vont naître. Vous en avez cité une. Avez-vous d'autres exemples ?

S. F. - Les matériaux par exemple. Nous avons insuffisamment su faire émerger le véritable domaine des matériaux ; nous sommes encore au niveau du balbutiement dans ce domaine. Il y a encore des

visions trop « physique des matériaux », « caractérisation des matériaux », « chimie des matériaux ». Mais la dimension « génie des matériaux », avec des hommes qui ont « l'approche » matériaux est encore trop rare. Nous avons fait un très gros effort, en nous appuyant beaucoup sur l'industrie. Nous avons créé trois laboratoires mixtes sur les matériaux avec Saint-Gobain, la Société européenne de propulsion (SEP), Rhône-Poulenc. C'est là une discipline qui est en pleine émergence.

Comment articuler ces laboratoires sur l'ensemble du dispositif de recherche ? Prenons un exemple : nous sommes en train de créer avec la SEP à Bordeaux un laboratoire mixte sur les composites thermostrostructuraux. Simultanément, nous montons un groupement scientifique avec l'ensemble des équipes qui, en France, travaillent sur ce sujet à Caen, à Limoges, à Nantes, avec le souci de mettre en cohérence la communauté scientifique, mais sous une forme souple.

Pour donner une liste qui soit illustrative plutôt qu'exhaustive, je voudrais citer aussi : la recherche de base en informatique, ses relations avec les sciences cognitives et avec les sciences de l'homme, les neurosciences où il se passe des choses passionnantes, la recherche de base en amont des biotechnologies. Voilà trois exemples. Il y en a beaucoup

(1) PIR : Programme interdisciplinaire de recherche.
(2) INRIA : Institut national de recherche en informatique et en automatique.
(3) INSERM : Institut national de la santé et de la recherche médicale.



d'autres. Ainsi, dans le PIRTEM (4) « Travail - emploi - modes de vie », on mélange des approches techniques et des approches sociologiques.

M. B. - Un dernier point sur les structures. Pourquoi le décret est-il si long à venir ?

S. F. - Il ne m'appartient pas de répondre à cette question. Un décret relève de la compétence du gouvernement.

M. B. - Le budget 1988 du CNRS est pratiquement équivalent en francs courants à celui de cette année. Vous satisfait-il néanmoins ?

S. F. - Il est vrai que tous les projets ne pourront être entrepris. Naturellement, j'aurais préféré un budget en croissance. Mais je crois que le problème majeur concernant le budget réside en fait dans son utilisation.

Les constantes de temps qui gouvernent l'évolution de la recherche sont beaucoup trop longues en France. Elles tendent dans certains cas vers l'infini. Une vraie question au sein du CNRS est de savoir quels sont les nouveaux domaines à venir : comment les faire éclore ? Comment les soutenir en terme de moyens ? Aussi notre problème est-il de dégager un pourcentage de notre budget pour soutenir des projets nouveaux. Cette année nous allons essayer de garder une marge de manœuvre de 6 %. Apparemment c'est peu, mais en vérité, qualitativement, c'est très important.

Bien sûr si le budget était meilleur, cette marge serait plus grande, mais le problème du redéploiement se poserait de toute façon. Un système de recherche doit se méfier avant tout du conformisme. Je suis convaincu que nous avons de bonnes équipes, le système de recherche est globalement bon — mais je crois qu'il ne suffit pas d'être bon, il faut aller au-delà. Il faut que dans beaucoup de domaines la communauté scientifique soit plus aventureuse.

M. B. - Comment allez-vous faire pour la rendre plus aventureuse ?

S. F. - Mon objectif essentiel est de faire émerger les patrons de demain, et je prends le mot « patron » dans le sens traditionnel qu'il a dans la recherche. Il faut que nous soyons capables de donner leur chance aux jeunes de 35 ans comme les gens de ma génération l'ont eue. Je suis frappé de constater que dans certains domaines, on n'a même plus de projets à cause d'une véritable auto-censure : auto-censure qu'il faut lever.

Nous donnerons une chance à ceux qui viendront nous présenter des projets solides, même si en fin de compte il y a des échecs. Il faut réaffirmer le droit à l'erreur. Il est normal que des expériences échouent pour que d'autres réussissent. Cela relève du même état d'esprit que les « Jeunes équipes » lancées par Jacques Ducloux il y a sept ou huit ans. Nous avons fait le bilan de ces jeunes équipes. Il est positif. Il ne faut pas laisser la recherche devenir une sorte d'institution vénérable. A l'inverse, je me méfie de cette tendance qui voudrait faire croire que c'est en sauvegardant trois ou quatre îlots d'excellence, indépendants et sans cohé-

rence entre eux, que l'on va faire une véritable politique scientifique. Nous devons toujours trouver un bon équilibre entre ces deux tentations afin de préserver à la fois notre rôle d'organisme et notre rôle d'agence de ressources.

M. B. - Les structures d'évaluation du CNRS ont la réputation d'être relativement conformistes. Vous paraissent-elles prêtes, elles aussi, à évoluer pour apprécier les projets nouveaux ?

S. F. - Oui, tout à fait. Il appartient au Comité National de lancer des réflexions prospectives qui éclairent le futur et je suis sûr qu'il le fera. J'ai reçu les présidents de sections il y a huit jours. Je leur ai tenu ce langage. Dans l'ensemble, j'ai le sentiment qu'ils sont prêts à relever le défi.

M. B. - Reprenons l'histoire récente de la supraconductivité. La France disposait, semble-t-il, du potentiel de recherche nécessaire pour découvrir les fameux matériaux « supra-conducteurs à haute température ». Qu'a-t-il manqué pour qu'il en soit ainsi ?

S. F. - Vous touchez là un point essentiel. Le manque de relations entre les diverses équipes de recherche appartenant à une même université : il y a eu un phénomène de dégradation lente de la notion de départements universitaires et les relations locales entre chercheurs sont à présent trop faibles. Nous avons malheureusement en France un système de recherche qui ressemble à la carte du réseau ferré. Des relations fortes existent entre un laboratoire de l'université de Pau ou de Toulouse et le CNRS à Paris. Ce sont les « grandes lignes ». En revanche, il n'existe aucune relation entre le chercheur en chimie de l'université X et le physicien de la même université. Il nous faut supprimer ce système en « étoile ». Naturellement, cela ne pourra se faire que si les universités ont une vie scientifique intense et une véritable politique d'établissement.

M. B. - Quels devraient être les liens entre le CNRS et les universités ? Comment concilier une politique nationale (CNRS) et une politique locale (universités) ?

S. F. - Ça, c'est un vrai problème ; c'est pour cela que nous sommes obligés de travailler en profondeur avec les universités. Comme vous le savez, le CNRS a été conçu, dès son origine, en 1939, comme un organisme de recherche et comme une agence de ressources. Avec un petit nombre de laboratoires propres hors des campus universitaires, il avait pour mission d'initier des disciplines non encore reconnues dans les universités ou d'organiser des recherches demandant un effort coordonné au plan national. En tant qu'agence de ressources, il soutenait des laboratoires universitaires, avec comme seul critère de choix la qualité des projets présentés. Plus tard, en 1963, sont nés les laboratoires associés au CNRS. Ceux-ci, pour la plupart universitaires, ont bénéficié progressivement d'un soutien plus continu, en hommes et en moyens, de la part du CNRS. Cette action a joué un rôle déterminant dans le développement et parfois même dans la survie de la recherche universitaire française. Malheureuse-

ment, le système s'est progressivement alourdi et le CNRS a peu à peu perdu la marge de manœuvre qui lui est nécessaire pour jouer ce double rôle. La place du CNRS dans le système de recherche « académique » doit donc être repensée.

Avec ses laboratoires propres ou mixtes, dans lesquels il a une responsabilité d'orientation et de direction, le CNRS peut entreprendre des actions fortes et structurées au niveau national, sans chercher à couvrir la totalité du champ scientifique. Un exemple : la physique des hautes énergies. Comment voulez-vous que les universités s'attaquent seules à la physique des hautes énergies ? Le LAL (5) à Orsay, avec quatre cents personnes, n'a pas la taille d'un laboratoire d'université. L'évaluation également doit se faire au niveau national et le Comité National est bien armé pour le faire.

Dans les unités associées, en revanche, le CNRS devrait jouer strictement son rôle d'agence de ressources. Il aurait un rôle d'évaluation et de soutien, en moyens financiers et en personnel. Le seul critère serait la qualité et la créativité des équipes, sans négliger pour autant la nécessité de concertation et de collaboration entre ces équipes. Cette politique implique, de la part des universités, des grands établissements ou des écoles, une égale volonté de construire localement une véritable politique de recherche. Je crois beaucoup à l'implantation des universités au niveau régional. J'ai reçu Madame la Présidente de l'Université de Caen. Elle m'a dit que certains laboratoires de son université travaillaient sur le lait et surtout sur le système prairial en Normandie. De même, une grosse partie de la recherche lyonnaise est en relation avec les pétroliers. Tout cela me semble sain.

Dans bien des cas enfin, le CNRS peut jouer le rôle d'« entremetteur » entre les laboratoires du CNRS et une ou plusieurs universités. C'est le but des groupements de recherche.

Certains pensent qu'il y aura une hiérarchie entre ces trois modes d'actions. Ce ne sera évidemment pas le cas. Il s'agira seulement d'une différence de mission. Le CNRS pourra ainsi, d'une part soutenir — comme auparavant — la recherche universitaire, d'autre part, contribuer à l'élaboration et à la mise en œuvre de véritables politiques nationales autour de thèmes ou de programmes bien définis.

J'ai rappelé par ailleurs que l'équilibre actuel de nos moyens, environ 50 % en terme d'organisme et 50 % en terme d'agence de ressources, ne devrait pas être modifié de façon significative. Il n'est donc en rien question d'un repliement du CNRS sur ses structures propres d'organisme.

Cela étant dit, le système de recherche français est un ensemble complexe d'établissements d'enseignement, d'organismes et d'autres partenaires de la recherche. Ce nouveau point d'équilibre dans les responsabilités de chacun, que nous souhaitons encourager, ne sera pas atteint brutalement. Toute évolution trop rapide serait porteuse de risques graves, le CNRS ne pouvant lui-même évoluer de façon indépendante et sans concertation.

(4) PIRTEM : Programme interdisciplinaire de recherche sur la technologie, le travail, l'emploi et les modes de vie.

(5) LAL : Laboratoire de l'accélérateur linéaire.

M. B. - Le CNRS doit-il continuer à être présent dans tous les secteurs de recherche ?

S. F. - Oui, si l'on parle de recherche de base. Pour moi, c'est essentiel. Le CNRS ne doit pas forcément avoir la maîtrise d'œuvre, mais il doit être présent. J'ai subi des pressions, au moment de ma nomination, pour sortir les sciences humaines et sociales du CNRS. J'ai affirmé à ce moment-là qu'elles devaient rester au sein du CNRS. Comment pourraient se rencontrer les sciences cognitives et les neurosciences, l'archéologie et les mesures physico-chimiques si les sciences humaines et sociales n'étaient plus au CNRS ? En outre, le CNRS doit jouer un rôle dans l'évaluation car celle-ci ne peut être que nationale.

M. B. - Dans l'état actuel des choses, existe-t-il de nombreux laboratoires qui n'ont plus leur raison d'être ?

S. F. - Je ne veux pas porter de jugement global. Mais une partie de notre système de recherche a vieilli et empêche l'émergence de nouveaux sujets. Certains laboratoires devront donc disparaître ou du moins connaître de fortes évolutions, et ceci est vrai aussi bien pour les laboratoires propres que pour les laboratoires associés. Dans les deux cas, l'exigence doit être la même.

Nous avons des équipes de recherche en pleine explosion qui manquent de chercheurs et, d'autre part, un certain nombre de laboratoires qui en ont peut-être trop. Notre objectif est de mettre en concordance les besoins et les moyens. Nous n'allons pas le faire de façon autoritaire, mais progressivement, par voie d'affichage.

M. B. - Il y a déjà eu par le passé des opérations d'affichage. Elles n'ont pas forcément été couronnées de succès !

S. F. - Nous suivrons une politique plus volontariste. C'est un acte de politique scientifique qu'il faut assumer avec courage en s'appuyant sur les recommandations et les avis du Comité National. Le Comité National, la communauté scientifique en général, est une communauté qui a ses traditions. Elle sait être sévère quand il s'agit du jugement scientifique. Je connais peu de milieux aussi durs dans leurs jugements. Cependant, cette communauté n'aime pas les décisions brutales quand il faut agir et, à partir de là, la direction doit prendre ses responsabilités. La communauté scientifique doit exprimer clairement ses orientations. Cette année, nous avons commencé, à titre expérimental, par une campagne d'affichage pour les emplois techniques et administratifs, fondée sur la mobilité volontaire. Maintenant, nous allons entreprendre une opération similaire avec certains chercheurs afin de les inciter à rejoindre les équipes les plus performantes.

M. B. - En ce qui concerne l'emploi, deux faits notables sont à signaler dans le budget 1988 : la suppression de 36 postes d'ITA (10) et seulement la création d'une centaine de postes de chercheurs. La situation de l'emploi vous paraît-elle grave au CNRS ?

S. F. - La suppression des postes d'ITA nous pose problème car la recherche devient de plus en plus technique. C'est notamment le cas pour le fonctionnement des très grands équipements, mais aussi pour des sciences réputées moins « lourdes » comme la biologie par exemple. Le CNRS doit maintenant disposer d'un « corps technique » nombreux et de très grande qualité. A charge pour nous de l'utiliser au mieux pour une bonne adéquation entre les besoins et les ressources. En ce qui concerne les chercheurs, on confond souvent deux problèmes :

— l'un d'ordre démographique : nous connaissons en effet un problème de renouvellement de génération en 1993-1994 ;

— l'autre lié à la pyramide des âges : cette pyramide doit-elle être un cylindre, en d'autres termes, le nombre de chercheurs de 60 ans doit-il être le même que ceux de 25 ans ? C'est une vraie réflexion à mener.

Je pense à ce propos qu'il y a un gâchis considérable dans l'utilisation des scientifiques dans notre pays. Je me réjouis des mesures prises à l'ANVAR (7) cette année, pour envoyer des chercheurs dans l'entreprise ; des chercheurs confirmés qui ne feront pas de la recherche mais pratiqueront d'autres métiers. Voilà un vrai défi, développer et diversifier l'emploi scientifique.

Certes, nous ne savons pas bien utiliser notre potentiel humain, mais je ne puis accepter que l'on donne une image ridicule des chercheurs, comme par exemple dans le dernier roman de Jean Dutourd ! Les chercheurs sont en vérité des gens fantastiques. C'est comme pour le saut à la perche. Si vous sautez cinq mètres, vous n'êtes pas un très grand champion, mais par rapport au reste de la population, vous êtes tout de même très bon. La plupart de nos chercheurs sont très bons, certains sont même des champions toutes catégories ! Vous savez, presque tous les chercheurs qui sont partis dans l'industrie y ont très bien réussi. Ils y ont réussi parce qu'ils possèdent une rigueur d'approche, une culture, des méthodes que peu d'hommes maîtrisent. Quand je vois la place que tiennent dans les entreprises les consultants et quand je mets en regard toute la culture et la rigueur intellectuelle que possèdent les chercheurs, aussi bien dans les sciences de la matière ou de la vie qu'en sciences humaines, je me dis que dans ces domaines comme dans bien d'autres, il reste beaucoup à faire. Je regrette que la société française ne sache pas mieux utiliser ses scientifiques.

M. B. - De quels moyens dispose un directeur général pour régler ces problèmes d'embauche, de pyramide des âges, etc. ?

S. F. - En dehors de la gestion, le premier rôle d'un directeur général est un rôle de promotion de l'organisme. J'ai rencontré en un an et demi de nombreux chefs d'entreprises et présidents de Chambres de commerce et d'industrie. A chaque

fois, je répète le message suivant : « Vous devriez mettre un scientifique dans votre comité exécutif ou dans votre hiérarchie... ». Cette idée progresse lentement. Les récentes mesures gouvernementales vont heureusement dans ce sens. Celle dont je parlais tout à l'heure — l'aide à l'emploi scientifique — est inspirée d'une action menée en Allemagne depuis plusieurs années. Des milliers de scientifiques ont été engagés dans les petites et moyennes entreprises. Vous vous rendez compte du chemin qu'il nous reste à parcourir !

M. B. - En matière de sciences de la vie, où se trouve le partage entre l'INSERM et le CNRS ?

S. F. - C'est une affaire difficile parce qu'il est vrai que l'imbrication entre la recherche de base et la recherche médicale est forte. La recherche de base est devenue de plus en plus nécessaire dans ce domaine. Quoi que l'on fasse, il y aura toujours un recouvrement important entre les activités de l'INSERM et les activités du CNRS. C'est exactement dans ce genre de cas que la création de laboratoires mixtes est idéale. Il en existe environ une trentaine.

M. B. - Est-ce qu'une stratégie nationale « Sciences de la vie » peut être élaborée en commun par le CNRS et l'INSERM ?

S. F. - Je reconnais que nous n'en sommes par encore là et que nous devons y venir. Néanmoins, chacun doit avoir sa spécificité et la redéfinir. Une partie des recherches de l'INSERM ne doit pas être réalisée au CNRS, la recherche clinique par exemple. Le système hospitalier devrait normalement assurer ce type de recherche. A l'inverse, pour les recherches très fondamentales, ne concernant pas l'homme en particulier, il est évident que l'INSERM n'a pas vraiment à les conduire, même si cela doit avoir un impact sur la médecine à long terme. Je crois que nous aurons toujours des petits problèmes parce que les hommes sont jaloux de leur territoire ; d'ailleurs une certaine compétition peut être bénéfique, mais il ne faut pas que cette compétition aille jusqu'à mettre en péril le fonctionnement d'une communauté. La meilleure façon de travailler est de rester constamment en contact. Prenons l'exemple du SIDA : la collaboration INSERM-CNRS est tout à fait exemplaire.

M. B. - Plus généralement, avez-vous des relations privilégiées avec les organismes de recherche ?

S. F. - Bien sûr ! Prenons l'INRA (8). Les recherches en biologie végétale se font en liaison très étroite avec cet organisme. C'est un secteur important puisque l'enjeu de l'agro-alimentaire pour la France est considérable. Nous avons également des relations étroites avec d'autres organismes comme le CEA (9). C'est important au plan stratégique en ce qui concerne les grands instruments ou l'opération de mise en commun des moyens d'analyses chimiques sur l'ensemble du territoire. Je pourrais vous citer bien d'autres exemples, comme celui-ci : une réunion aura lieu avec le CNES (10) à la fin de ce mois ; le sujet en sera : « Comment

(6) ITA : Ingénieurs, techniciens, administratifs.
(7) ANVAR : Agence nationale de valorisation de la recherche.
(8) INRA : Institut national de recherche agronomique.
(9) CEA : Commissariat à l'énergie atomique.
(10) CNES : Centre national d'études spatiales.

renforcer la technologie spatiale ? Que peut apporter le CNRS en amont à cette technologie ? »

M. B. - Entendez-vous favoriser la recherche européenne ?

S. F. - Comment pourrait-il en être autrement ? Je suis convaincu que le CNRS doit jouer un rôle moteur dans la construction d'une Europe de la Science, mais dans le cadre d'une politique nationale définie. Il est tout à fait évident que la taille de nos pays n'est plus aujourd'hui à la mesure des enjeux scientifiques et économiques qui vont surgir dans les prochaines années. L'Europe n'est pas facile à faire et, surtout, il n'existe pas de voie unique pour faire l'Europe. C'est pourquoi nous travaillons dans des directions très diverses. Nos laboratoires sont naturellement impliqués dans les programmes européens et ils ont toute liberté pour y coopérer. Dans le cadre du projet Euréka, les laboratoires du CNRS — ou associés au CNRS — jouent un grand rôle, que les industriels français y soient ou non représentés.

Au-delà de ces programmes ou projets, nous entretenons des rapports constants avec nos homologues européens, sous forme de conventions, de contrats. Nous souhaitons d'ailleurs prolonger ces rencontres, à partir de l'idée de partenariat, en créant avec eux des laboratoires mixtes.

Le dernier point de cette coopération européenne est celui qui concerne les grands instruments. De par leur taille, ces instruments ne peuvent être qu'euro-péens. Le synchrotron que nous sommes en train de construire pour produire du rayonnement X en est un bon exemple. Il va servir dans les domaines de la biologie, de la physique, de la chimie, etc. Nous sommes associés avec les Allemands, les Anglais, les Italiens, les Espagnols et, maintenant, les Suisses et les Pays scandinaves. Ces grands instruments joueront un rôle tout à fait déterminant dans la construction de la Communauté scientifique européenne. Les chercheurs y travaillent de concert et ils y font réellement l'Europe.



© 1987

M. B. - En conclusion, comment voyez-vous l'avenir du CNRS ?

S. F. - Il serait naïf de croire que les critiques ont cessé. Cependant beaucoup ont compris que même si cette Maison a quelques défauts, elle reste essentielle au bon fonctionnement de la recherche française et elle doit rester unitaire pour tirer pleinement profit de cette conjonction unique de toutes les disciplines scientifiques. Cette prise de conscience va bien au-delà de la communauté scientifique. Je n'en veux pour preuve que l'intérêt des débats

qui ont lieu au Conseil d'Administration. Grâce aux hommes et aux femmes de nos laboratoires, la moisson de résultats scientifiques a une fois de plus été particulièrement riche au cours de cette année. Ceci se reflète parfaitement dans la confiance qu'a aujourd'hui le Directeur Général que je suis, dans le CNRS et dans la recherche scientifique française (1).

(1) Depuis cette interview, l'attribution du prix Nobel de Chimie à Jean-Marie Lehn est venue renforcer cette conviction.

* Entretien réalisé le 7 octobre 1987 par Martine BARRÈRE, chef de rubrique à *La Recherche*.

Hors-série du *Courrier du CNRS* n° 69-70 — septembre-décembre 1987.
 Directeur de la publication : Goëry Delacôte.
 Rédacteur en chef : Véronique Broasollet-Condé.
 Commission paritaire : AD 303. ISSN : 0-153-985-X.
 © Centre National de la Recherche Scientifique.
 Imprimerie du CNRS.

69-70 — LE COURRIER DU CNRS

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
15, QUAI ANATOLE-FRANCE 75700 PARIS, TÉL. (1) 45 55 92 25, TÉLEX 2600034



LE COURRIER DU CNRS

CNRS
Délégation du Siège
Centre Logistique
Département des Publications - Bâtiment 19
1, Avenue de la Terrasse
91190 Gif-sur-Yvette
Tél : 01 69 82 39 17



SOMMAIRE DU N° 69-70

Editorial :

Vers un nouveau Courrier du CNRS 5
Goëry Delacôte

Flash actualités :

L'arc lumineux détecté dans un amas de galaxies : un mirage gravitationnel 6

Mimas, un nouvel infecteur pour Saturne 6

Débats et positions : De la perception à l'action

Présentation 7
Georges Chapouthier, Michel Imbert

De la perception à l'action 8
Jacques Pallard

Le contrôle visuel des mouvements 10
Daniel Benabaton

Applications en robotique : la main artificielle 14
Philippe Coiffet

Commande vocale d'un bras articulé, ou la construction d'une pyramide... de cubes grâce à la voie humaine 15
Joseph-Jean Mariani

Le cortex cérébral et les fonctions sensorimotrices 16
Marc Jeannerod

Une nouvelle classe de neurones sensorimoteurs 18
John Seal

La perception visuelle du mouvement 19
Claude Bonnet

Mouvement et perception des déplacements chez le nourrisson 23
François Jouen

Activité du regard et perception visuelle 23
Ariane Levy-Schoen et Kevin O'Regan

L'identification visuelle 24
Simon Thorpe et Michel Imbert

L'innervation motrice des fuseaux neuromusculaires 25
Léna Jami

Perception du mouvement et représentation de l'espace 26
Alain Berthoz

Le noyau ventro-latéral du thalamus et l'acquisition motrice 31
Michèle Fabre-Thorpe

Mouvement et posture : antagonisme et coopération 32
Jean Masson

Attention et mouvements 33
Jean-Marie Coquery

Aspects cardiaques de la préparation à l'action chez l'insecte 34
Berhard Thon

Distinction :

Art de la molécule et chimie bien tempérée : Jean-Marie Lehn, Prix Nobel de Chimie 1987 36
Maryvonne Tissier

A la recherche :

L'évolution des techniques salinières : la modernisation jadis et aujourd'hui ... 38
Jean-Claude Hocquet

Nouveaux noyaux exotiques 41
Monique Bernas, Françoise Pougheon, Pierre Roussel

Le projet GEOSCOPE 48
Barbara Romanowicz, Michel Cara

La rage : un problème actuel 52
Anne Flamand

Les Pygmées d'Afrique, maillon de l'histoire 56
Serge Bahuchet, France Clourec-Heiss, Simha Arom

**Index des articles
parus en 1986-87** 61

Editorial :

Towards a new Courrier du CNRS
Guéry Delacôte

5

Flash news :

Giant luminous arc detected in the cluster of galaxies : gravitational lens

6

Mimas, a new injector for Saturne

6

Debates and opinions : From perception to action ...

Presentation
Georges Chapouthier, Michel Imbert

7

From perception to action
Jacques Paillard

8

The visual control of movement
Daniel Beaulaton

10

Applications of robotics : the artificial hand
Philippe Colffet

14

Voice control of an articulated arm and construction of a pyramid of cubes by means of the human voice
Joseph-Jean Mariani

15

Cerebral cortex and sensorimotor functions
Marc Jeannerod

16

A new class of sensorimotor neurons ..
John Scal

18

The visual perception of movement
Claude Bonnet

19

Movement and perception of movement in the infant
François Joux

23

Ocular activity and visual perception ...
Ariane Levy-Schoen and Kevin O'Regan

23

Visual identification
Simon Thorpe and Michel Imbert

24

The motor innervation of neuromuscular spindles
Léna Jami

25

Perception of movement and representation of space
Alain Berthoz

26

Ventrolateral nucleus of the thalamus and motor acquisition
Michèle Fabre-Thorpe

31

Movement and posture : antagonism and cooperation
Jean Massion

32

Attention and movements
Jean-Marie Coquery

33

Cardiac aspects of preparation for action in the insect
Bernard Thon

34

Distinction :

Molecular artistry and well-tempered chemistry : Jean-Marie Lehn, 1987 Nobel Prize for Chemistry
Maryvonne Tissier

36

Research reports :

The change in salt production techniques : modernisation yesterday and today
Jean-Claude Hocquet

38

New exotic nuclei
Monique Bernas, Françoise Pougheon, Pierre Roussel

41

The GEOSCOPE project
Barbara Romanowicz, Michel Cara

48

Rabies : a current problem
Anne Flamand

52

The African Pygmies, a link in history ..
Serge Bahuchet, France Cloarec-Heiss, Simha Aron

56

Index of articles published in 1986-87

61

Vers un nouveau Courrier du CNRS

Ce numéro du Courrier (69-70) est le dernier du genre. En effet, après une réflexion menée par la direction générale et le comité exécutif, il apparaît nécessaire de réorganiser notre dispositif de communication. Le principe de cette réorganisation a été exposé dans le n° 1 du Journal du CNRS, nouveau mensuel de communication interne de l'organisme, sorti en janvier 1988.

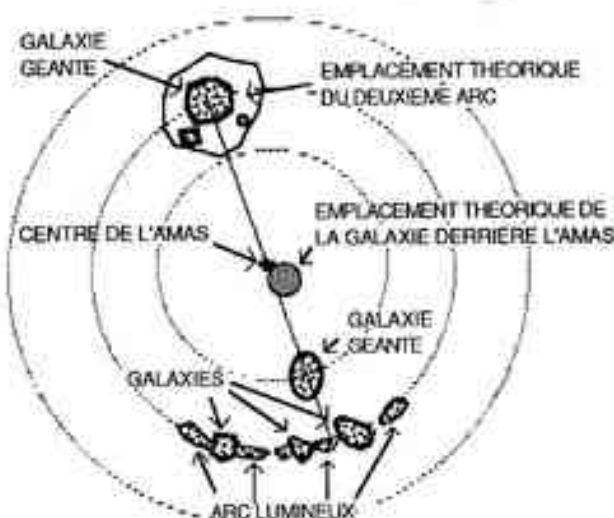
Le Courrier du CNRS va évoluer. Plusieurs des rubriques qui figuraient dans la formule actuelle seront reprises dans le cadre du Journal du CNRS. Un double emploi eût été fâcheux.

Par ailleurs, les évolutions récentes ont montré le succès de la formule « dossier » lorsque celle-ci était pratiquée pour le Courrier du CNRS. Le dossier « Imagerie scientifique » en est le dernier exemple. C'est donc vers une formule exclusivement de type dossier que va évoluer le Courrier. L'objectif est de faire connaître le travail scientifique réalisé au CNRS dans un domaine donné en l'inscrivant dans un cadre plus large et en tentant d'en cerner les enjeux. Un effort accru sera tenté pour les dossiers à venir tant pour la définition du public concerné que pour la clarté de l'écriture, l'agrément de la présentation et la variété des angles d'attaque.

Chaque agent pourra comme par le passé recevoir un exemplaire de ces dossiers. Il suffira que la demande en soit faite après annonce de la parution. La publication de ces dossiers étant régulière et s'inscrivant dans une ligne de produit uniforme, il sera également possible de se les procurer à l'extérieur du CNRS, soit par achat individuel, soit par abonnement annuel.

En vous présentant ce dernier numéro édité sous la formule ancienne, nous vous remercions, cher lecteur, pour la fidélité témoignée jusqu'à ce jour et souhaitons vivement que la nouvelle formule du Courrier du CNRS retienne tout votre intérêt.

Goéry DELACÔTE
Directeur de la publication



L'arc lumineux détecté dans un amas de galaxies : un mirage gravitationnel.

Une équipe d'astronomes français de l'Observatoire de Toulouse, utilisant le télescope de 3,6 mètres Canada-France-Hawaii, a détecté dans l'amas de galaxies Abell 370 un arc lumineux géant. De nouvelles observations spectrales effectuées avec le télescope de 3,6 mètres de l'ESO au Chili et la confrontation avec les modèles théoriques élaborés par des chercheurs de l'Observatoire de Paris, section de Meudon démontrent que nous sommes en présence d'un exceptionnel mirage gravitationnel. Cet arc serait en fait l'image d'une galaxie spirale se situant loin derrière l'amas déflecteur, celui-ci jouant le rôle de lentille gravitationnelle.

En septembre 1985, une équipe de l'Observatoire de Toulouse utilisant le télescope de 3,6 mètres Canada-France-Hawaii détectait, dans le centre de l'amas de galaxies Abell 370, un arc lumineux géant. Cet amas de galaxies est situé à 5 milliards d'années de lumière (décalage spectral de 0,374). Il est très riche en galaxies, avec au centre deux galaxies géantes. De plus, il rayonne dans le domaine des X, preuve de l'existence, au sein de l'amas, de gaz extragalactique très chaud. La structure détectée, qui se situe au sud d'une des galaxies géantes, a la forme d'un arc très fin de 150 kiloparsecs de long (490 000 années de lumière), soit environ 8 à 10 fois la longueur d'une galaxie normale.

En janvier 1986, une équipe américaine de l'Observatoire de Kitt Peak, en Arizona, confirmait la détection de cet arc et signalait la présence d'un objet similaire dans l'amas CL2244-02.

Depuis septembre 1985, l'équipe d'astronomes français a effectué des études détaillées de cette structure et de son environnement, en utilisant les télescopes de l'Observatoire Canada-France-Hawaii et de l'European Southern Observatory (ESO) au Chili.

Ils ont pu obtenir, notamment, un spectre de l'extrémité est de l'arc (voir photo couleur au dos de la couverture).

Cet arc présente une signature spectrale ressemblant à celle d'une galaxie spirale dont le décalage spectral est de 0,39, indiquant une distance beaucoup plus grande que celle de l'amas.

En collaboration avec un astronome de l'Observatoire de Paris, section de Meudon, ils ont proposé un modèle d'optique gravitationnelle prenant comme déflecteur le centre de l'amas, et comme source une galaxie spirale située à une distance correspondant au décalage spectral de 0,39. L'analyse fait apparaître que la source serait une galaxie de 8 kiloparsecs de diamètre (soit 26 000 années de lumière) qui se situerait derrière l'amas, pratiquement au niveau du centre géométrique de A370. Ils en ont également déduit que dans cette configuration, le deuxième arc, qui doit être observé à l'opposé de l'arc détecté, se situerait très exactement au voisinage de la deuxième galaxie géante. Celle-ci perturberait le cheminement optique des rayons lumineux et ne laisserait qu'un éventuel vestige de cette image à l'emplacement de deux petits objets observés au-dessous de cette galaxie.

Nous serions donc en présence de la première observation d'un mirage gravitationnel par le cœur d'un amas. Après la galaxie IC324, il s'agirait du deuxième cas de mirage gravitationnel s'appliquant à une galaxie. D'autre part le modèle permettrait de mesurer la masse de l'amas de galaxies. Dans ce cas, cette théorie prévoit, pour A370, une masse de $1,5 \cdot 10^{14}$ masses solaires, ce qui est beaucoup plus important que la masse de toutes les galaxies observées dans cet amas, confirmant ainsi l'existence d'une masse cachée. Des analyses spectrales détaillées sont envisagées afin de confirmer cette hypothèse.

Mimas, un nouvel injecteur pour Saturne

Le Laboratoire national Saturne (association CEA-IRF/CNRS-IN2P3) fondé en 1978 autour du synchrotron Saturne II a pour vocation de contribuer à la physique des énergies intermédiaires située à l'interface de la physique nucléaire et de la physique des particules.

Dans cette optique le LNS a régulièrement développé depuis bientôt dix ans ses équipements techniques et scientifiques pour faire face à une demande croissante en particules polarisées (deutons, neutrons, protons) et en ions lourds (carbone, azote, oxygène, néon, argon).

C'est ainsi qu'après la source de particules polarisées hyperion (1981) et un pré-injecteur Cryobis-RFQ (1984), le LNS vient d'achever (octobre 1987), la mise en exploitation du synchrotron injecteur Mimas, étage intermédiaire à haute transmission entre les sources et Saturne. Il remplace à ce niveau le linac à protons de haute intensité (1968) qui présentait pour cette nouvelle variété d'ions des limitations de transmission.

Mimas est un mini-synchrotron de 17 mètres de circonférence qui permet une adéquation parfaite des caractéristiques des sources aux impératifs de Saturne. Sa réalisation est basée sur les plus performants ingrédients d'un synchrotron moderne : ultravide ($5 \cdot 10^{-9}$ Pa), déviateurs magnétiques rapides (moins de 0,2 μ s), décélération bréton (500 Wh/s), plage de fréquence des cavités accélératrices (160 kHz à 2 400 kHz), informatique intégrée aux équipements et diagnostic.

Après une mise en œuvre de quelques mois, les résultats sont excellents et en tout point conformes aux études théoriques menées au laboratoire.

Grâce à Mimas une intensité de $1,6 \cdot 10^{11}$ deutons polarisés par cycle a été accélérée à 1,15 GeV/nucleon dans Saturne sans perte de polarisation (> 85 %). Le record mondial déjà obtenu par Saturne est largement dépassé (gain d'un facteur 5).

Des ions lourds comme le carbone, l'azote, l'oxygène, le néon et l'argon ont été également injectés par Mimas dans Saturne qui les accélère à pleine énergie avec des intensités allant de 10^8 à $4 \cdot 10^9$ charges électriques par cycle. Le gain est d'un facteur dix pour les ions jusqu'au néon et c'est de plus une première des argons dans Saturne.

La récente exploitation du complexe Mimas-Saturne pour tous ces ions (polarisés et lourds) en ligne avec les utilisateurs a démontré la grande stabilité et la souplesse opérationnelle du scénario adopté.

On voit ainsi que la mise en service de Mimas qui assure à Saturne une complémentarité sans faille à Ganil (Caen) pour les ions lourds jusqu'à l'argon, dans la gamme du GeV/nucleon le place aussi résolument hors d'attente des concurrents internationaux (Canada, États-Unis, URSS, Suisse) dans le domaine des particules polarisées.

Au cours des années à venir un effort sera développé en vue de la production de krypton, de xénon et d'une intensité dépassant $2 \cdot 10^9$ en particules polarisées.

DE LA PERCEPTION A L'ACTION

Le problème des relations entre la Perception par nos systèmes sensoriels des informations, qui guide notre comportement, et l'Action, qui constitue les modalités d'expression de ce comportement, est l'un des domaines de recherches les plus importants des neurosciences modernes. Comme le remarque Jacques Paillard : « Poser le problème des relations entre Perception et Action revient à poser le problème du fonctionnement psychique dans toute sa complexité ».

Les difficultés rencontrées par une telle recherche n'ont, comme toujours en science, été que des défis auxquels des techniques nouvelles ou des innovations conceptuelles ont permis de répondre. On s'en rendra compte à la lecture des diverses contributions de ce dossier qui, chacune, illustre une facette de cette démarche expérimentale incessante par laquelle s'élabore la connaissance.

L'ensemble du dossier est introduit par un exposé synthétique de Jacques Paillard qui replace les unes par rapport aux autres les différentes contributions et en tire les conclusions générales. Celles-ci témoignent de la maturité des neurosciences d'aujourd'hui, où l'analyse des éléments moléculaires ou chimiques du système nerveux permet d'aborder ce qui paraissait inabordable il y a quelques années : les fonctions cognitives du cerveau.

**Georges CHAPOUTHIER,
Michel IMBERT**

■ Georges Chapouthier, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de physiologie nerveuse (I.P. 2212 du CNRS), 91190 Gif-sur-Yvette.

■ Michel Imbert, professeur à l'université Paris XI, responsable du Laboratoire des neurosciences de la vision (U.A. 1199 CNRS), université Pierre et Marie Curie, 4 place Jussieu, 75230 Paris.

De la perception à l'action

Comment réagit-on aux stimulations venues du dehors ? Les organismes vivants sont-ils de simples machines ?

Jacques PAILLARD

La sonnerie du téléphone qui déclenche le mouvement de notre main vers le combiné, l'odeur de brûlé qui nous fait courir à la cuisine, le petit signe familier issu de la vessie qui nous incite à nous rendre aux toilettes, le visage ami que l'on reconnaît et qui fait que nous nous dirigeons vers lui, autant de situations familières où s'exprime l'étroite dépendance dans laquelle nos actions se trouvent vis-à-vis de signaux que nous détectons soit au sein de notre propre organisme, soit dans le monde extérieur et auxquels nous attribuons un sens. Notre activité tout entière, en fait, semble suscitée, orientée, guidée par les informations collectées par nos organes des sens.

Le problème de savoir si les organismes vivants sont de simples machines à réagir aux stimulations venues du dehors par la voie de la sensorialité, ou s'ils sont intrinsèquement dotés d'une force interne qui les incite à agir spontanément sur leur environnement reste un vieux débat philosophique auquel la biologie moderne se trouve à nouveau confrontée. C'est bien en fait l'action, le mouvement, la contraction de nos muscles qui comme données observables, mesurables, enregistrables se sont d'emblée imposés comme l'indicateur privilégié des phénomènes vitaux. L'étude des réponses motrices à des stimulations mesurables et contrôlables devait ouvrir une voie royale à la physiologie de la seconde moitié du XIX^e siècle. Elle a débouché sur la suite remarquable des travaux de Sherrington sur les réflexes médullaires qui jetaient les bases sur lesquelles allait s'édifier toute la neurophysiologie moderne.

La découverte du circuit réflexe le plus simple n'impliquant que deux cellules nerveuses allait mener au démontage systématique des mécanismes nerveux conduisant du stimulus à la production du mouvement. Émission du « message nerveux » au niveau du neurone sensoriel, propagation de l'influx nerveux le long du nerf, sa transmission au neurone

moteur à travers la jonction synaptique, émission du message de commande, sa conduction par le nerf moteur jusqu'au niveau de la jonction neuro-musculaire, enfin genèse du processus contractile dans le muscle : autant de cibles privilégiées désignées à l'ardeur des expérimentateurs. Les progrès technologiques aidant, la progression fut dès lors rapide pour conduire au remarquable développement des neurosciences contemporaines.

Le succès des approches réflexologiques en physiologie devait parallèlement inspirer la démarche des disciplines voisines. C'est, en psychologie, le Behaviorisme de Watson qui affirme sa prétention à l'étude du comportement par la seule voie d'une étude objective des lois unissant le stimulus à la réponse de l'organisme. C'est aussi la physiologie de Pavlov qui aspire à considérer le cerveau comme simple machine associant stimulations et réponses, enrichissant la vie mentale de la combinatoire des liaisons conditionnées.

On parle aujourd'hui de la stratégie de la « boîte noire » pour caractériser ce style de démarche. Stratégie qui choisit délibérément d'ignorer le contenu de la boîte pour ne s'intéresser qu'aux relations identifiables entre les entrées du système et ses sorties. L'étude de ces relations devait cependant très tôt conduire les psychologues à prendre en compte les variations du délai qui sépare une réponse objectivable du stimulus qui la suscite : variations qui deviennent indicatives de la nature des opérations internes de transfert. Le temps mis par un sujet pour répondre à un événement bien défini contrôlable par l'expérimentateur (ce qu'on appelle le « temps de réaction ») varie en effet de façon importante en fonction du canal sensoriel utilisé, de l'intensité du stimulus, de la nature et de la complexité de la réponse motrice. Ce temps devient révélateur des processus mentaux intermédiaires supposés intervenir entre les sollicitations du milieu et l'élaboration des réponses. D'où la réapparition en psychologie des fameuses « variables intermédiaires » de Tolman qui rendent compte des opérations mentales interposées entre la perception et l'action. Les notions de prédisposition mentale, d'attitude préparatoire, d'attention, de représentation imagée, de processus de décision, etc..., autant de notions qui nourris-

sent le courant de la psychologie cognitive moderne. Le concept de « représentation » y redevient central comme substrat du modèle interne de la réalité que construit le sujet dans ses mémoires ; modèle sur lequel s'élaborent les objectifs et les projets d'action, ainsi que le choix des moyens à mettre en œuvre pour les réaliser.

La neurologie de son côté décrit les troubles des fonctions dites « praxiques » qui se traduisent chez le malade par son incapacité à accomplir intentionnellement un geste habituel sur commande alors que ce geste se déclenche automatiquement dans un contexte familier. L'idée d'une commande volontaire qui prendrait son origine non plus dans une perception directe du monde externe mais dans une « représentation » ou une « image mentale » de l'acte à accomplir reprend aujourd'hui sa valeur d'interpellation en direction des neurosciences modernes. La distinction jacksonienne du volontaire et de l'automatique et l'idée d'une classification des circuits impliqués entre le stimulus et la réponse suivant trois niveaux hiérarchisés restent valables : au premier niveau, les réflexes caractérisés par des liaisons relativement directes entre voies sensorielles et structures de commandes. Les réponses sont ici rigidelement liées à la forme du stimulus et à son intensité. Au second niveau, les réponses automatiques traduisent l'existence soit de circuits génétiquement préétablis, soit de connexions renforcées par l'utilisation répétée des mêmes combinaisons motrices. Les réponses préétablies qui constituent le répertoire primitif des réactions biologiquement utiles pour la survie de l'individu, souvent dès sa naissance, sont déclenchables électriquement à partir de sites topographiquement bien identifiés dans les structures nerveuses.

Contrairement au réflexe où l'amplitude de la réponse dépend de l'intensité de la stimulation, tout se passe comme si le stimulus n'agissait ici que comme un signal purement déclencheur d'un programme autonome tout prêt à fonctionner. On a souvent évoqué à ce propos l'idée du signal « presse-bouton », où le stimulus doit atteindre une intensité seuil qui déclenche le programme en « tout ou rien ». Au regard de ces réponses automatiques innées, il n'est pas établi que les réponses automatisées qui résultent de l'apprentissage moteur et de l'acquisition des habitudes relèvent également du déclenchement « presse-bouton » d'un « programme câblé ». On évoque plutôt l'idée d'un processus dynamique de programmation qui se consomme dans les boucles cérébelleuses de contrôle du cortex moteur.

Un autre critère de différenciation des niveaux d'automatisme est à rechercher dans leur plus ou moins grande pénétrabilité par les contrôles attentionnels ou conscients qui vont devenir prépondérants au troisième niveau où l'on trouve les actes volontaires délibérés, traduisant à la fois l'existence d'une intention, d'un projet d'action et celle d'une volonté de traduire cette intention en actes. Les éthologistes évoquent à ce sujet une image de but, les neurologues parlent d'idée motrice et les neurophysiologistes d'une anticipation des conséquences sensorielles

■ Jacques Paillard, professeur à l'université d'Aix - Marseille II, Laboratoire de neurosciences fonctionnelles (LP 28 du CNRS), responsable de l'unité de neurosciences du comportement, 31, chemin Joseph Aiguier, BP 71, 13402 Marseille Cedex 9.

de l'action. Les neurologues ont clairement dissocié les atteintes pathologiques du projet d'action (apraxie idéatoire) et distingué les processus de traduction de l'intention en actes (apraxie idéomotrice) de ceux qui affectent l'initiative motrice elle-même (paralysie de la volonté). D'une manière générale on assiste actuellement, sous l'influence conjuguée des avancées de la psychologie cognitive (stimulées par les progrès de la linguistique et de l'intelligence artificielle) et des apports de la neuropsychologie (qui bénéficie des progrès rapides des sciences du système nerveux sous l'impulsion des approches moléculaires et biochimiques), à l'émergence des neurosciences cognitives. Ces dernières abordent de plain-pied les processus mentaux supérieurs mis en jeu dans la genèse de l'expérience perceptive et des conduites motrices orientées vers un but.

Dès lors, le problème des rapports de la perception et de l'action vient interroger les neurosciences modernes dans un contexte nouveau à la fois plus riche et plus complexe mais plus proche aussi de la réalité des objets mentaux que cernent les approches contemporaines de la cognition. Et il rejoint aussi sur son propre terrain le problème des interprétations physiopathologiques et neuroanatomiques des désorganisations perceptivo-motrices.

Le modèle explicite de cette approche multidisciplinaire désormais convergente des rapports de la perception et de l'action peut se résumer ainsi : d'une part, un équipement d'instruments sensori-moteurs élaborés qui entretiennent avec l'environnement des dialogues directs diversifiés et permanents ; d'autre part, un appareil cognitif qui accumule dans ses mémoires représentatives tous les éléments de structuration d'un modèle interne de la réalité physique.

D'un côté, un ensemble de dispositifs prédisposés à réagir de manière appropriée aux sollicitations diverses du milieu externe et qui fonctionnent sur un mode réactif parfaitement conforme aux modèles réflexologiques classiques. De l'autre, un appareil psychique complexe doté de la capacité d'extraire de l'environnement les régularités, les invariances, les stabilités qui vont lui servir à élaborer sa représentation interne de l'environnement le plus probable et le mieux prévisible. Cet appareil fonctionne essentiellement sur un mode prédictif en se référant à ses expériences antérieures (dont il a conservé les traces en mémoire), ce qui lui confère toutes les capacités d'anticipation et de prévision requises pour concevoir des projets d'action autonomes.

Ici se mesure toute la distance qui sépare le lien qui unit le stimulus à la réponse au niveau du réflexe et la relation qui associe la perception et l'action dans les formes supérieures d'élaboration des conduites comportementales. Percevoir la réalité du monde c'est, en fait, reconnaître dans notre expérience perceptive ce qui est conforme à la représentation interne que nous en avons constitué dans nos mémoires et que nous avons le pouvoir d'évoquer consciemment. Agir (et non pas simplement réagir) c'est d'abord prévoir les conséquences de nos projets d'actions futures sur la base de nos expériences passées, concrétiser l'intention dans un plan d'action et prédisposer les



© Photo: Tony Duffy, All Sport Agency, Vandystadt

instruments moteurs à répondre aux prescriptions d'un programme d'exécution. Agir c'est aussi être capable de suspendre l'action projetée, d'inhiber la réaction à un stimulus externe ou à une motivation endogène. On conçoit, dès lors, que poser le problème des relations entre perception et action revient à poser le problème du fonctionnement psychique dans toute sa complexité. C'est cet ambitieux défi que relèvent les neurosciences contemporaines.

Les textes qui ont été rassemblés ici ne constituent qu'une illustration fragmentaire de l'importante contribution que les chercheurs du CNRS apportent à l'étude de ce domaine actuellement en plein développement au niveau international.

On trouvera dans la présentation de Daniel Beaubaton un bel exemple d'approche de type psychophysique qui conduit, à partir de l'étude du geste de pointage chez l'Homme, à identifier les opérations fonctionnelles assurant l'initialisation, la programmation et le guidage du geste vers une cible visuelle. Étendu au singe ce type d'analyse conduit ensuite à interroger les structures nerveuses supposées impliquées dans ces opérations en pratiquant leur exclusion réversible au moyen de techniques de refroidissement localisées.

La contribution de Marc Jeannerod illustre le mode d'approche de la neuropsychologie qui exploite les désordres des fonctions perceptivo-motrices consécutives à des lésions identifiables des structures néocorticales afin d'en inférer les mécanismes.

L'article de Claude Bonnet concerne une approche psychophysique de la perception visuelle du mouvement qui joue un rôle central dans la structuration de l'espace où se déploient nos activités motrices. Le problème de la représentation interne de l'espace dans le système nerveux est un champ nouvellement ouvert par les neurosciences modernes. Il reste fondamental pour la compréhension des mécanismes cérébraux de la perception de l'espace et de ceux qui contribuent à la coordination des actions. Alain Berthoz aborde le problème dans une perspective neurophysiologique.

Jean-Marie Coquery aborde enfin au plan psychophysique les mécanismes attentionnels qui président au choix et à la

sélection des informations sensorielles qui suscitent, orientent et guident nos actions.

Les encarts évoqueront brièvement quelques-uns des multiples problèmes posés par l'étude des relations sensori-motrices et par l'identification des boucles fonctionnelles intervenant dans leurs régulations.

Sur le versant des entrées sensorielles c'est la relation étroite qui lie les mouvements des yeux à la saisie des informations visuelles (Ariane Lévy-Schoen et Kevin O'Regan) ou encore le réglage moteur de la sensibilité des capteurs intramusculaires de mouvement (Léna Jami). C'est aussi le problème du développement de la perception du mouvement chez le nourrisson (François Joven) ; et c'est encore, en comparaison avec les performances de l'ordinateur dans le domaine de l'analyse d'image, l'étude des étonnantes capacités d'étiquetage catégoriel dont le système nerveux s'avère capable (Simon Thorpe et Michel Imbert).

Sur le versant des sorties motrices on trouvera une illustration des travaux sur les rapports de la posture et du mouvement (Jean Massion) et sur les structures impliquées dans la préparation à l'action et dans les processus d'apprentissage moteur et d'automatisation du geste (Michèle Fabre-Thorpe). L'intérêt porté par la robotique aux problèmes abordés par les neurosciences est souligné par la contribution de Philippe Coiffet et par celle de Jean-Joseph Mariani. Alors que la neuroéthologie nous révèle que l'insecte lui-même n'est pas un automate réagissant aveuglément aux sollicitations directes de son milieu, mais qu'il présente en présence de la situation environnementale tous les signes d'une analyse anticipatoire de la situation et d'une préparation de la réponse (Bernard Thon).

On pourra enfin, avec la présentation de John Seal, apprécier comment le neurophysiologiste peut aujourd'hui observer les réponses de neurones isolés impliqués, au niveau de structures associatives néocorticales, dans la transaction entre l'information sensorielle et la commande motrice. Ces neurones aux propriétés particulières peuvent être considérés comme représentatifs de la structure d'interface qui existe entre le versant perceptif et le versant moteur de nos activités comportementales.

Le contrôle visuel des mouvements

La vision et la motricité sont étroitement associées dans la plupart de nos comportements et pourtant la connaissance de plus en plus précise que nous avons de leurs mécanismes propres ne suffit pas à expliquer leur mutuelle dépendance.

Daniel BEAUBATON

Le contrôle visuel des segments corporels implique le traitement d'une série d'informations d'origines diverses : éléments statiques ou mobiles de l'environnement, indices de position ou de mouvement liés aux postures ou aux déplacements du corps.

Bien que l'on sache depuis longtemps qu'un geste réalisé sans contrôle visuel présente une certaine imprécision spatiale, les raisons de cette imprécision ne sont pas encore complètement élucidées. Inversement, le profit que nous tirons du recours aux informations visuelles pour contrôler nos actions mérite d'être explicité. Quels sont les indices visuels que nous traitons ? A quel moment ces indices deviennent-ils critiques et pour quel type de mouvement ? En fait, la réponse à ces questions se trouve particulièrement compliquée par l'existence d'interactions permanentes entre l'espace visuel et les mouvements propres de notre corps. L'organisme doit, en effet, non seulement intégrer les éléments statiques ou mobiles perçus dans l'environnement externe mais également la vision des segments corporels (par exemple, la main

qui se déplace vers un objet) ou le flux optique résultant du déplacement de l'ensemble du corps.

L'exemple de la saisie manuelle

Pour prendre un cas relativement simple, et qui a été souvent discuté (1-2-3), l'atteinte et la saisie manuelle d'un objet supposent l'intervention des informations visuelles dans une série d'étapes fonctionnelles :

— L'information visuelle va d'abord être utilisée comme signal d'alerte pour mettre en jeu le système oculo-moteur et réaliser une fixation du regard en direction de l'objet. Cette fonction de détection qui va déclencher des mouvements associés de la tête, voire de l'ensemble du corps, assure en fait le maintien de l'élément repéré sur la fovéa, zone privilégiée de la rétine pour les fonctions de reconnaissance perceptive et de localisation spatiale.

— L'élaboration du programme de mouvement est déterminée par la spécification d'un projet fondé sur la reconnaissance de l'objet à atteindre, à saisir ou à transformer. Ce sont les informations visuelles à fonctions identificatrices (taille, forme, texture, etc.) qui vont servir à anticiper la saisie en « préparant » la main selon un répertoire postural préalablement constitué. Parallèlement, la spécification des paramètres du programme de transport de la main vers l'objectif suppose le traitement des signaux de localisation nécessaires à l'évaluation de la direction et de la distance de l'objet par rapport au corps.

— Le transport de la main vers l'objet à saisir peut enfin nécessiter l'intervention d'opérations correctrices, au cours des différentes phases de la trajectoire. Dans ce contrôle, les informations visuelles peuvent être traitées en tant qu'indices de position, responsables des détections d'erreurs pour un codage des relations spatiales entre la main et l'objectif ou comme indices de mouvement utilisables, par exemple, pour corriger la direction de la trajectoire par rapport à l'axe du regard.

Vision de la main et précision spatiale

Afin de mieux analyser les interactions complexes qui se créent entre les indices visuels statiques et dynamiques, entre ceux provenant du corps et ceux issus de l'environnement, on peut restreindre expérimentalement l'étude à un mouvement de projection de l'index vers une cible visuelle fixe (figure 1). Cette performance visuo-motrice simple, facilement standardisable, peut faire l'objet d'une description de ses

L'organisation de tout mouvement de saisie suppose la détection, la localisation et l'identification de l'objet à atteindre. Des canaux de traitement spécialisés, des messages visuels sont utilisés pour extraire les informations nécessaires à l'élaboration du programme moteur.

■ Le 28 juin dernier, peu de temps après avoir rédigé cet article, Daniel Beaubaton et son épouse trouvaient la mort dans un accident de montagne. Daniel Beaubaton était âgé de 41 ans. Il avait fait toute sa carrière de chercheur au CNRS à l'Institut de neurophysiologie et de psychophysiologie de Marseille sous la direction du professeur Paillard. Docteur d'Etat ès-Sciences en 1983 il fut promu directeur de recherche en 1986. Tout récemment nommé professeur de psychologie à l'Université de Provence, il devait y prendre ses fonctions en octobre 1987.

Daniel Beaubaton avait déjà à son actif une œuvre importante de grande audience internationale. Ses études sur la programmation du mouvement et les coordinations visuomotrices sur le singe à cerveau dédoublé par section chirurgicale des commissures interhémisphériques ont marqué ses premiers travaux. Sa thèse d'Etat devait tirer parti de la mise au point de méthodes d'exclusion réversible par sondes cryogéniques de structures nerveuses localisées, qu'il appliqua avec un remarquable succès à l'analyse des mécanismes de contrôle du mouvement. Cette thèse eut un grand retentissement. L'ouverture de ses travaux sur les champs d'application à la neurologie, à la rééducation, aux activités sportives, à l'amélioration des conditions de travail, à la robotique, faisait de Daniel Beaubaton un chercheur très sollicité et très apprécié pour sa compétence, sa largeur d'esprit et sa grande disponibilité.

Secrétaire de la section 30 du Comité National, Daniel Beaubaton y jouissait d'une grande autorité morale.

* Laboratoire de neurosciences fonctionnelles (I.P. 28 du CNRS), 31, chemin Joseph Aiguier, B.P. 71, 13277 Marseille Cedex.

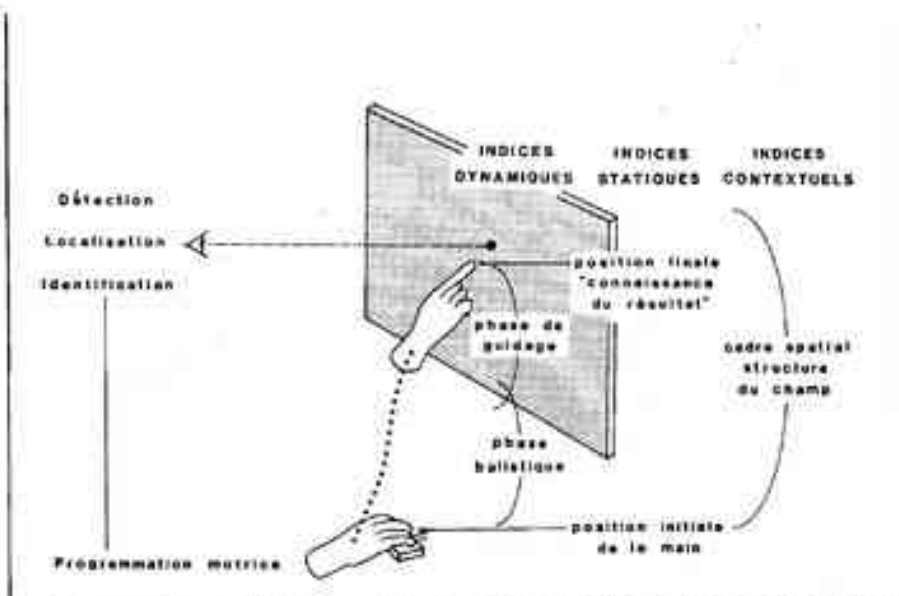


Fig. 1 - Aspects fonctionnels d'un mouvement simple, consistant à toucher du doigt une cible visuellement repérée. Les différents types d'indices visuels impliqués dans la planification et le contrôle du mouvement sont indiqués.

La suppression des informations visuelles relatives au mouvement exécuté diminue la précision spatiale des réponses. Cependant, les manifestations différentes de la dépendance visuelle au cours de l'enfance traduisent la relative complexité d'interprétation de ce phénomène.

caractéristiques spatio-temporelles ; par exemple, la durée d'exécution et la précision de l'impact sur la cible. De plus, divers aménagements techniques permettent de varier la nature, la position, la durée de présentation des cibles, de supprimer totalement, ou partiellement, la vision du mouvement, de modifier les conditions de vision de l'environnement expérimental.

La première question qui peut se poser est de savoir s'il est nécessaire de voir sa main pour contrôler précisément un geste. Le moyen le plus simple de répondre à cette question est évidemment de supprimer la vision du membre déplacé, alors que l'objectif reste visible. Cette expérience classique depuis Woodworth (1899) a conduit tous les expérimentateurs à observer une imprécision spatiale assez importante, notamment dans la phase finale de la trajectoire. Il est intéressant de constater que cette dépendance que nous présentons à l'égard des indices visuels pour optimiser nos performances évolue de façon non-monotone au cours de l'ontogenèse. En effet, les enfants de 4 à 6 ans se montrent capables de diriger leur mouvement vers une cible, en l'absence de contrôle visuel, sans que l'efficacité moyenne soit particulièrement perturbée, alors que la période suivante (7-8 ans) est marquée par une difficulté à réaliser ce type de tâche (4). Il semble donc que l'absence de vision de la main affecte la précision spatiale à des degrés divers selon l'âge, suggérant ainsi des changements dans la dépendance vis-à-vis des informations fournies par le geste.

Contrôle visuel et vitesse d'exécution du mouvement

Si en première analyse et chez le sujet adulte, les informations visuelles liées à l'exécution du mouvement sont un facteur critique d'optimisation spatiale, il paraît alors indispensable de prendre en compte le paramètre de vitesse d'exécution. Ce point devient primordial lorsqu'on s'intéresse au problème des gestes rapides, par exemple lors d'activités sportives. Au-delà de l'intérêt pratique, cette question a fait l'objet d'un vaste débat à propos du concept de « programmation motrice ». Il est en effet important de déterminer si les contraintes imposées par l'exécution des mouvements à hautes vitesses interdisent la possibilité de tout contrôle visuel et nécessitent donc que ces mouvements soient complètement organisés

préalablement à l'action. La question revient à savoir quel est le temps minimal de traitement des informations visuelles. Assez curieusement, les travaux successifs réalisés depuis le début du siècle ont conduit à décrire des valeurs décroissantes pour ce temps de traitement ; ce qui semble, en l'occurrence, s'expliquer par une amélioration des techniques de mesure plutôt que par une amélioration des performances visuo-motrices des sujets d'expériences. Nous avons pu, par exemple, montrer (5) que la vision d'un geste, dont la durée est comprise entre 100 et 200 millisecondes, améliore sa précision spatiale (figure 2), suggérant ainsi l'importance de ce type d'information pour une large gamme de mouvements sportifs et professionnels, habituellement réalisés à grande vitesse. Toutefois, il serait erroné de penser que la vision permet, à de telles vitesses, de corriger finement n'importe quel mouvement. Des résultats complémentaires ont permis d'observer que l'amélioration des performances visuo-motrices en fonction de la vitesse d'exécution était différente suivant les caractéristiques biomécaniques du geste à contrôler. Ainsi, la correction d'amplitude du mouvement est plus rapide à opérer que celle portant sur la direction. Ce fait laisse penser que tous les indices visuels ne sont pas impliqués dans des opérations de « correction », au sens habituel du terme ; certains en effet jouent plutôt le rôle de signaux « déclencheurs », qui en cours d'exécution au geste peuvent, avec des constantes de temps très brèves, appeler un sous-programme particulier, nécessaire par exemple à la mise en jeu des groupes musculaires responsables du freinage du mouvement.

Une autre observation a toutefois permis de nuancer l'importance accordée aux indices visuels dynamiques dans le contrôle des mouvements. Il est possible, en conservant le même protocole expérimental de pointage visuo-manuel, de supprimer l'information relative au geste, en laissant les sujets disposer d'indices visuels statiques tels que la position immobilisée de la main, en fin de trajectoire. Dans ce cas, la seule connaissance visuelle de l'erreur contribue assez efficacement à l'amélioration de la précision des mouvements ultérieurs (figure 2). A un système de correction d'erreur immédiate correspond donc un système « adaptatif », intervenant après l'exécution du mouvement et réajustant le programme moteur aux nécessités de l'action future. Un tel système est caractéristique d'une régulation à

Des gestes réalisés à grande vitesse peuvent être contrôlés à partir d'indices visuels de mouvement, ce qui suggère des temps de traitement très brefs pour ce type d'information. Aux indices visuels dynamiques s'ajoutent des indices visuels statiques, utilisables pour apprécier les erreurs et corriger les mouvements ultérieurs.

Même en l'absence de vision de la main, la seule vision d'un environnement structuré suffit à obtenir des réponses relativement précises. La présence d'un contexte visuel est un élément critique du choix de système de coordonnées spatiales dans lequel le mouvement est planifié.

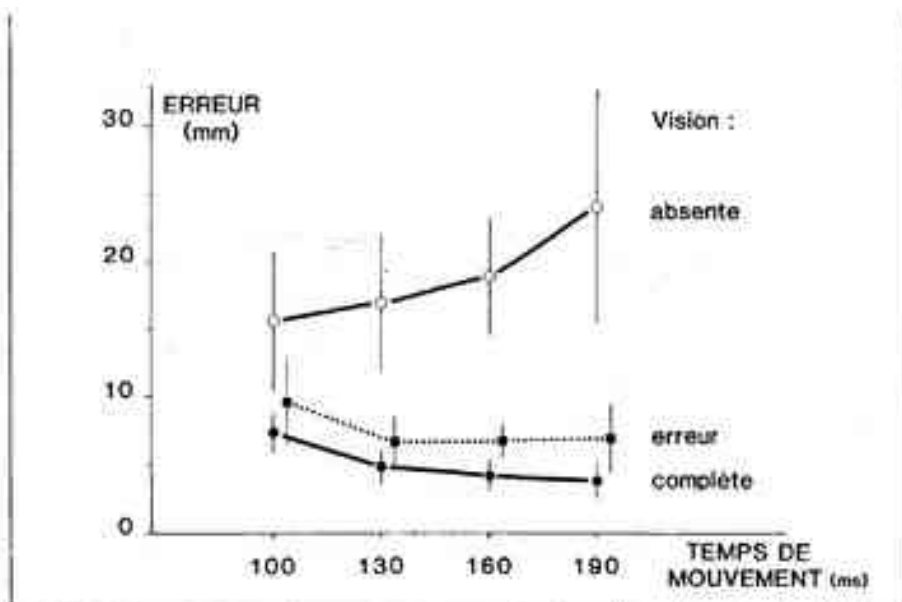


Fig. 2 - Erreurs spatiales observées pour des mouvements de pointage d'une cible, en fonction de la durée d'exécution (entre 100 et 190 millisecondes) et du type d'information visuelle : sans vision du mouvement, avec vision complète de la trajectoire ou seulement de la position stable de la main en fin de trajectoire (erreur). (5).

mémoire dont le but est d'anticiper les contraintes prévisibles, en fonction de l'expérience passée.

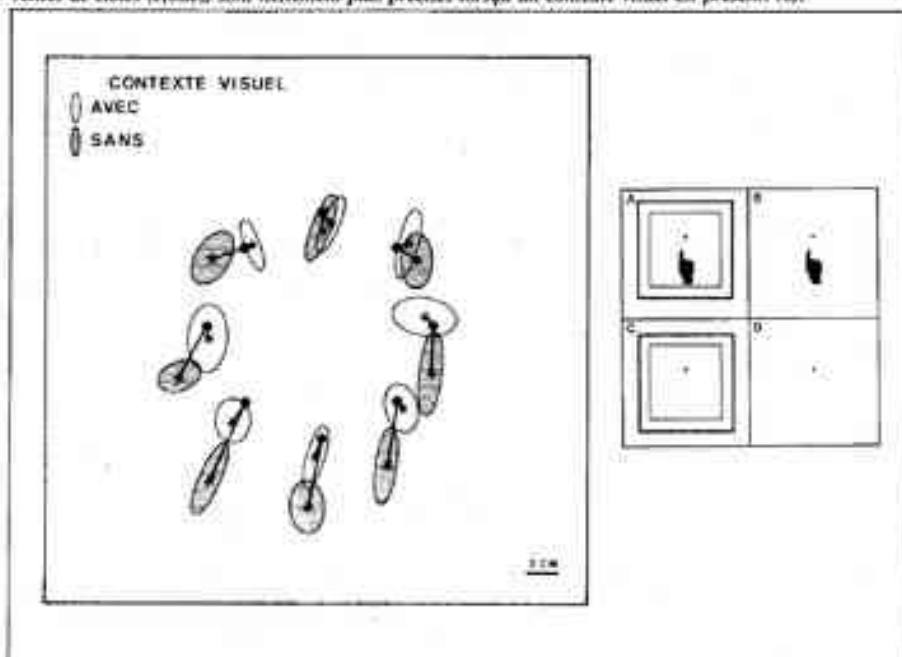
Rôle du contexte visuel

Les résultats précédents permettent de mieux comprendre l'imprécision de gestes réalisés dans l'obscurité et où sont donc supprimées à la fois la vision du mouvement et la connaissance du résultat de l'action. Et pourtant un élément visuel important échappe encore à cette analyse. Si la plupart de nos gestes quotidiens impliquent un contrôle des relations spatiales entre le corps et des objets de l'environnement, ce lien s'établit toujours dans le cadre d'un « contexte » visuel, c'est-à-dire d'un champ structuré. Une fois de plus, on peut s'apercevoir que des facteurs importants de l'organisation motrice résultent de la prise en compte d'indices visuels sur lesquels nous ne portons pas directement notre regard, ou

auxquels nous ne prêtons pas forcément attention.

Les résultats obtenus dans une tâche d'ajustement visuo-moteur (6) montrent que l'amplitude du mouvement est très sensible à la présence d'un contexte visuel (figure 3). Cela est vrai avec, ou sans vision du membre ; mais nous avons suggéré que la fonction des indices environnementaux pourrait être différente dans ces deux cas. Lorsque la main est visible pendant le mouvement, les repères spatiaux externes joueraient un rôle dans le réglage du freinage au voisinage de l'objectif. Par contre, en l'absence de vision du membre déplacé, le contexte visuel semblerait plutôt intervenir d'une part, sur les opérations sous-jacentes à la localisation de la cible et d'autre part, dans les opérations de localisation de la main dans l'espace, vraisemblablement au début du mouvement. La présence d'un contexte visuel dans la phase initiale de mise en relation des positions de la main et de la cible pourrait permet-

Fig. 3 - A droite : représentation des quatre situations expérimentales : A, B : vision du mouvement, avec ou sans contexte visuel (environnement) ; C, D : sans vision du mouvement, avec ou sans contexte visuel. A gauche : représentation spatiale des erreurs de pointage réalisées dans les conditions C et D, c'est-à-dire sans information visuelle sur le mouvement et avec (ellipses vides) ou sans (ellipses hachurées) contexte visuel. On remarque que les distributions des pointages (ellipses de confiance) pour les huit positions différentes de cibles (étoiles) sont nettement plus précises lorsque un contexte visuel est présent. (6).



De nombreux cas de dysfonctionnement cérébral sont à l'origine d'incoordinations visuo-motrices, se traduisant par des imprécisions spatiales des mouvements. Ces perturbations motrices sont souvent significativement compensées par une utilisation accrue, ou différente, des informations visuelles.

tre une planification du mouvement en coordonnées exocentriques (la référence appartient à l'espace physique extra-personnel). Par contre, l'absence de contexte visuel au moment critique où sont localisées la main et la cible favorise une planification du mouvement dans un référentiel de type égocentrique (la référence appartient à l'espace corporel), système moins précis mais relativement indépendant des contraintes de l'environnement physique.

Dysfonctionnement nerveux et contrôle visuo-moteur

En définitive, le constat de différentes sources d'informations visuelles ne peut qu'appeler une confrontation à la physiologie du système qui présente également une grande diversité par l'existence de récepteurs et de systèmes de traitement hautement spécialisés (7). D'autre part, les modalités de traitement des informations visuelles ne peuvent être dissociées des conditions d'exécution et de la finalité fonctionnelle des actes, renvoyant ainsi à une analyse des lois d'organisation motrice propre aux gestes étudiés.

Les résultats obtenus lors de dysfonctionnement nerveux sont à cet égard démonstratifs. Deux exemples peuvent en être donnés en expérimentation animale. Ainsi, après section des voies nerveuses reliant les hémisphères cérébraux, un sujet peut présenter une forte incoordination visuo-motrice (8), mais le simple fait de fournir à l'hémisphère qui commande la main une information visuelle sur le déplacement de cette main suffit à améliorer considérablement la précision des réponses, même si cet hémisphère ne dispose pas d'information directe sur la localisation de l'objectif (figure 4). Par ailleurs l'exclusion de certaines structures d'intégration sensori-motrice (9) conduit, assez paradoxalement, à n'observer que des imprécisions spatiales minimales dans des tâches visuo-motrices. Cependant, la suppression des indices visuels, relatifs à l'exécution des mouvements, induit, dans ce cas, des aggravations importantes de la performance. L'ensemble de ces résultats suggère que certaines perturbations motrices peuvent être, au moins partiellement, compensées par un recours accru aux indices visuels fournis par la mobilité corporelle.

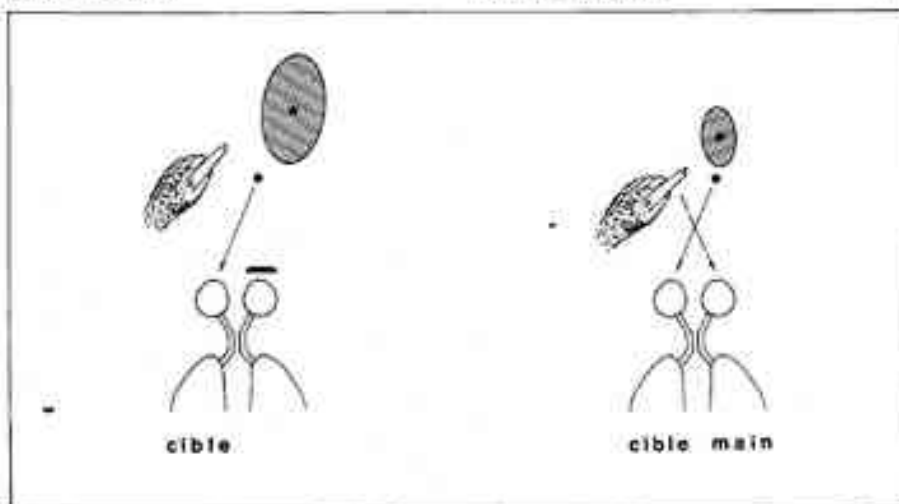


Fig. 4 - Précision d'un mouvement de pointage d'une cible (représentée par un point) chez un singe commisso-tomisé. La section des commissures interhémisphériques et du chiasma optique permet de limiter l'information visuelle fournie à chaque œil au seul hémisphère homolatéral. Un système de filtres optiques autorise une vision sélective de la cible ou de la main. On peut remarquer que la distribution de l'information sur la cible à l'hémisphère gauche conduit à des réponses peu précises (représentées, dans la partie gauche, par l'ellipse de confluence de la distribution des pointages). Au contraire, dans la partie droite, les erreurs et la dispersion diminuent lorsque l'information visuelle relative à la main est fournie à l'hémisphère droit. (8).

BIBLIOGRAPHIE

- (1) Paillard (J.), Beaubaton (D.), De la coordination visuo-motrice à l'organisation de la saisie manuelle. In : *La coordination visuo-motrice à l'organisation du geste*, Hecquen (H.), Jeannerod (M.) Eds., Paris, Masson, 1978, pp. 225-260.
- (2) Jeannerod (M.), Biguer (B.), Visuomotor mechanisms in reaching within extrapersonal space. In : *Analysis of Visual Behavior*, Ingle (D.J.), Goodale (M.A.), Mansfield (R.J.), Eds., Cambridge : MIT Press, 1982, pp. 387-409.
- (3) Arbuth (M.A.), Perceptual structures and distributed motor control. In : *Handbook of Physiology*, Sect. 1, vol. II, *Motor control*, Brooks (V.B.), Ed., Bethesda : American Physiological Society, 1981.
- (4) Hay (L.), Spatial-temporal analysis of movements in children : motor programs versus feedback in the development of reaching. *Journal of Motor Behavior*, 1979, 11, pp. 189-200.
- (5) Beaubaton (D.), Hay (L.), Contribution of visual information to feedforward and feedback processes in rapid pointing movements. *Human Movement Science*, 1986, 5, pp. 19-34.
- (6) Velay (J.L.), Beaubaton (D.), Visual context and accuracy of a pointing movement. *Cahiers de psychologie cognitive*, 1986, 6, pp. 447-456.
- (7) Buser (P.), Imbert (M.), Vision, Paris : Herman, 1987.
- (8) Beaubaton (D.), Paillard (J.), Granger (A.), Contribution of positional and movement cues to visuomotor reaching in split-brain monkey. In : *Structure and Function of the Cerebral Commissures*, Steele-Russell (I.), Van Hof (M.W.), Berlucchi (G.), Eds., London : Pergamon Press, 1979, pp. 371-384.
- (9) Viallet (F.), Trouche (E.), Beaubaton (D.), Legallet (E.), The role of visual reafferents during a pointing movement : comparative study between open-loop and closed-loop performances in monkeys before and after unilateral lesion of the substantia nigra. *Experimental Brain Research*, 1987, 65, pp. 399-410.
- (10) Woodworth (R.S.), The accuracy of voluntary movement. *Psychological Review Monographs*, 1899, 3, pp. 1-114.

La robotique peut être considérée comme la réalisation, par des mécanismes conçus et créés par l'homme, de la boucle perception-décision-action.

Tout système de robots doit, en effet, reprendre ces trois aspects qui font appel à des techniques très diverses.

La perception, c'est l'acquisition des informations nécessaires. Cette acquisition se fait par des capteurs tels que caméras, radars, récepteurs acoustiques, etc.

Ces informations rassemblées sont ensuite traitées et interprétées. Ainsi, les informations obtenues par une caméra seront traitées par un programme de reconnaissance de formes.

Applications en robotique : la main artificielle

Philippe COIFFET

Les phénomènes cachés derrière la boucle perception-décision-action apparaissent comme l'apanage des êtres vivants avec leurs deux grands niveaux de commande : réflexe inconscient et acte moteur réfléchi. Cette boucle semble contenir le secret de la capacité d'adaptation des êtres vivants aux conditions d'environnement lorsqu'ils progressent vers un objectif.

On voudrait donc transférer cette capacité d'adaptation aux machines dont la productivité augmenterait, et qui, surtout, pourraient travailler seules ou presque. C'est ce que l'on recherche en robotique, mais sans obligatoirement se calquer sur les processus physiologiques. Ce sont les fonctions que l'on désire imiter. On ne sait pas dire aujourd'hui si le modèle vivant est celui vers lequel on sera inéluctablement entraîné dans l'avenir. Il possède néanmoins deux intérêts fondamentaux en robotique : d'une part, fournir un modèle de mécanismes dont on peut

s'inspirer ; d'autre part, permettre la conception de machines conviviales.

Sur ce second terrain, un excellent exemple réside probablement dans la main artificielle, véritable robot complexe qui doit s'intégrer au corps humain et à ses organes de contrôle/commande. Redonner l'ensemble des principales propriétés de la main, dont la première est qu'elle est le prolongement naturel du bras, est encore une gageure malgré une vingtaine d'années de recherche internationale active. On n'arrive pas à concilier sur un même système les contraintes liées au poids, à la motorisation, à l'esthétique, à la force suffisante de serrage, au contrôle myoélectrique, à la reproduction du sens tactile et à l'interface avec le bras vivant. Cependant, prise individuellement, chacune de ces propriétés est en passe d'être maîtrisée. Les technologies doivent encore se miniaturiser et l'interface vivant-machine ou vivant-matériau doit être mieux comprise. ■



1/Prototype de main artificielle (Suède). On remarque que la plaque nécessaire à l'équipement électronique englobe une partie de l'avant-bras.

■ Philippe Coiffet, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de robotique du Centre de robotique Intégrée Ile-de-France (CRIIF), Tour 66, 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05.



2/Main artificielle à commande myoélectrique. Dans ce cas particulier, les principaux muscles commandant les mouvements de la main sont existants (bien que lésés). Quand le sujet veut, par exemple, fermer la main, ces muscles se contractent suivant certaines séquences qui sont reconnues via huit capteurs myoélectriques de surface et un traitement informatique relevant de la reconnaissance des formes. Les moteurs sont en conséquence excités convenablement.

la constructi

Parmi les applications des technologies vocales, le dialogue parlé homme-machine pour l'exécution d'une tâche, et en particulier la commande vocale d'un bras articulé qui vient agir sur le monde physique est un exemple générique d'application robotique.

C'est dans la simulation d'une telle application que déjà Winograd, à Stanford University, en 1972, donnait un éclairage nouveau à la linguistique automatique, en montrant la nécessité de prendre en compte dans un dialogue, la représentation du monde physique, et de donner à la machine une faculté de raisonnement. C'est dans ce même domaine que nous avons œuvré, en remplaçant le dialogue écrit de Winograd par un dialogue oral, incluant reconnaissance et synthèse de la parole. Tout d'abord dans un univers simulé, puis dans un univers réel, avec de vrais cubes, déplacés par un vrai bras articulé, système dont la démonstration fut faite à l'exposition « Communication » du CNRS en 1984.

Considérons donc un univers constitué de six cubes de trois couleurs différentes notées 1, 2, 3) et de deux gros-seurs possibles (grand ou petit), et d'une pyramide (figure 1). Tout d'abord, il est nécessaire que le système possède une représentation de l'univers sur lequel il va agir. Cette connaissance peut lui être donnée initialement, en lui communiquant les coordonnées spatiales des objets. Il devra alors périodiquement la mettre à jour en fonction des déplacements d'objets effectués. Mais elle peut être également obtenue par des moyens de perception propres au système, comme la reconnaissance d'image (appelée aussi analyse de scène).

Les actions qui peuvent être demandées au système sont multiples. On peut lui demander de décrire sa perception de l'univers à un instant donné (« où est la pyramide ? »). On peut lui donner une commande (« mets le cube 1 sur le petit cube 3 et la pyramide sur le gros 3 »).

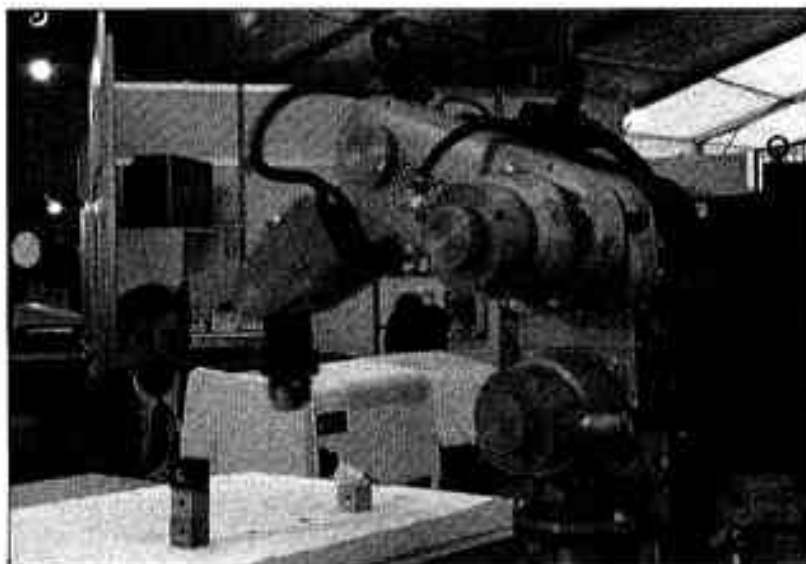
L'éventail des possibilités de décision a été considérablement enrichi par les progrès récents en automatique et en intelligence artificielle. On n'a plus une réaction immuable, mais différentes possibilités de réactions dépendant de manière complexe de plusieurs critères.

Les domaines d'application sont très nombreux : du robot-nettoyeur de la RATP aux systèmes d'armements en passant par l'assemblage de voitures et le métro de Lille.

Il est certain que la robotique est un sujet d'actualité. Les textes de Joseph-Jean Mariani et de Philippe Coiffet qui suivent, en montrant les limites et précisant les problèmes qui restent à résoudre.

Commande vocale d'un bras articulé ou on d'une pyramide... de cubes grâce à la voix humaine.

Joseph-Jean MARIANI



Présentation d'une commande vocale de robot par Angel Otorin du LIMSI, lors de l'exposition « Communication » organisée par le CNRS en 1984. © CNRS, P. Wendling.

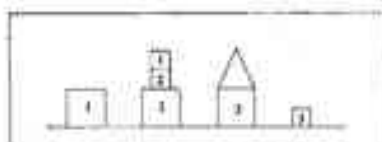


Fig. 1 - Configuration initiale.

■ Joseph-Jean Mariani, directeur de recherche au CNRS, responsable du département « Communication homme-machine », Laboratoire d'Informatique pour la mécanique et les sciences de l'ingénieur (LIMSI), L.P. 3251 du CNRS, université de Paris XI, bâtiment 508, BP 30, 91406 Orsay Cedex.

Pour effectuer correctement l'action qui lui est demandée, le système doit transformer cette commande en une suite chronologique d'actions. Il doit savoir que « mets » signifie « prends, déplace et pose », que c'est la même action qu'il doit effectuer sur la pyramide, bien que le verbe « mets » ne soit pas répété dans la seconde proposition, que « le gros 3 » veut dire « le gros cube 3 ». D'autre part, certaines ambiguïtés ne peuvent être résolues uniquement par raisonnement. C'est le cas pour « cube 1 » qui peut désigner le petit ou le gros cube 1, et ce choix ne peut être fait que si le système pose lui-même une question à l'utilisateur (« est-ce le gros cube 1 ? »).

Il doit être capable, pour effectuer l'action, de construire un plan d'action. Comprendre que pour pouvoir mettre la pyramide sur le gros cube 3, il faut d'abord qu'il enlève le petit cube 2, alors que le petit cube 1, lui, a déjà été déplacé lors de l'action précédente.

D'autre part, savoir qu'il faut qu'il lève suffisamment le petit cube 1 pour ne pas toucher la pyramide lors du déplacement. Il doit finalement être capable d'expliquer la raison de ses actions, avec leur déroulement chronologique (« que fais-tu ? », « que faisais-tu juste auparavant ? »).

Les expériences que nous avons menées nous ont permis également d'en déduire certaines considérations de nature ergonomique. Si le canal vocal est bien adapté à l'énonciation de commandes discrètes, et de haut niveau (« mets le cube rouge sur le cube jaune. »), il est beaucoup moins adapté à des commandes analogiques (« déplace le cube rouge à gauche..., stop !, reviens... »), bien plus facilement et rapidement exécutées avec une télécommande par exemple. S'il est nécessaire de pouvoir corriger des erreurs de reconnaissance pour assurer une sécurité d'utilisation, une demande systématique de confirmation de ce qui a été reconnu devient rapidement fastidieuse et inacceptable. Enfin, la conjugaison de différents médias de communication homme-machine intervenant simultanément est d'un grand intérêt. Pouvoir dire : « mets le cube rouge là » en désignant manuellement l'endroit correspondant sur un écran (avec une souris par exemple) améliore l'efficacité du dialogue.

De fait, le dialogue vocal n'est pas fait pour remplacer systématiquement les autres modes de communication, mais pour les compléter en augmentant l'efficacité et le confort d'utilisation du système complet. ■

BIBLIOGRAPHIE

- Winograd (T), *Understanding Natural Language*, Academic Press, 1972.
Bérouté (D), *Communication parlée avec un système robotisé simulé*, rapport d'activité 1983 du LIMSI, février 1984.

Le cortex cérébral et les fonctions sensori-motrices

Des expériences démontrent le rôle du cortex cérébral dans la genèse des représentations mentales qui contrôlent notre comportement sensori-moteur. Certaines de ces représentations semblent s'élaborer dans le seul hémisphère droit. Cette asymétrie constitue un avantage évolutif.

Marc JEANNEROD

Le cortex cérébral exerce un contrôle de l'aspect cognitif des opérations perceptives et motrices. Il intervient chaque fois que se constitue une représentation mentale de l'objet perçu ou du geste à exécuter, laissant aux régions sous-corticales le contrôle d'opérations plus simples, comme la détection d'un stimulus ou la réalisation d'un mouvement programmé d'avance. Cette spécificité du cortex, domaine d'élection de la neuropsychologie, peut être mise en évidence dans certains cas pathologiques où le cortex est fonctionnellement exclu.

Le contrôle cortical s'exerce selon des modalités différentes des autres régions du cerveau. Les opérations cognitives sont contrôlées par des régions distribuées de manière asymétrique dans les deux hémisphères cérébraux.

Dans le partage du travail qui semble caractériser le fonctionnement du cerveau, particulièrement dans le domaine des fonctions sensori-motrices, le cortex cérébral occupe une place prédominante. Chez l'homme en effet, la destruction pathologique de certaines zones critiques du cortex peut provoquer la désorganisation sélective d'opérations telles que la perception des objets ou la reconnaissance des visages, l'orientation dans l'espace ou la réalisation de séquences de mouvements. Cette désorganisation atteint les niveaux fonctionnels les plus cognitifs de la perception et de l'action, ceux qui impliquent une représentation mentale du monde extérieur et des relations que le sujet entretient avec lui. Nous examinerons ici, à l'aide de deux exemples tirés des résultats de la recherche en neuropsychologie clinique, la nature de ces déficits et leurs relations avec l'anatomie et le fonctionnement de régions déterminées du cortex.

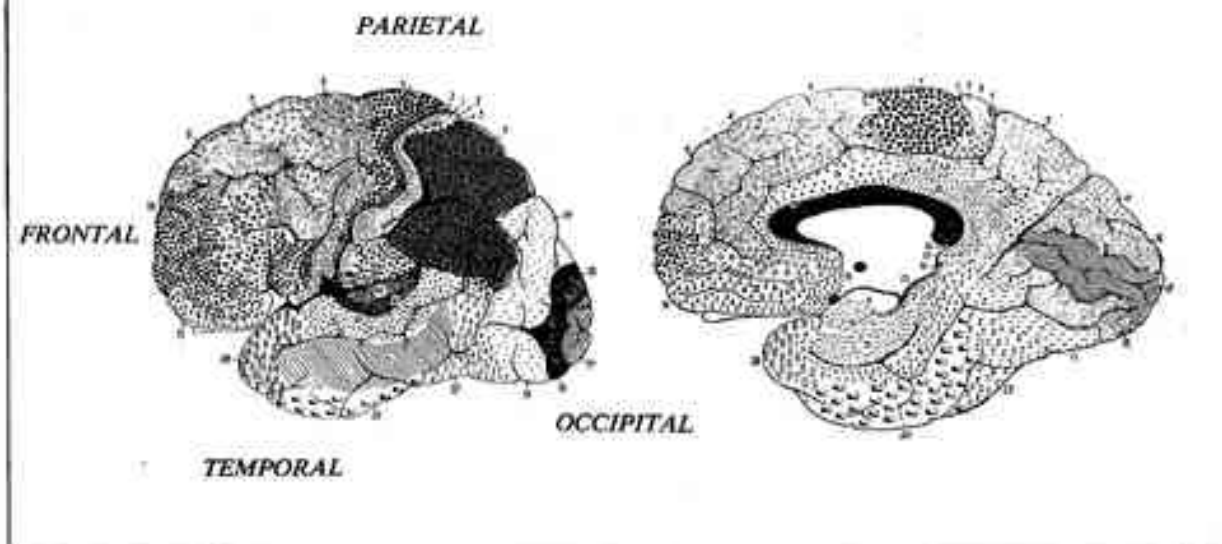
« Voir » sans voir après lésion du cortex visuel

La lésion des régions les plus postérieures du cortex (en particulier la région de la scissure calcarine, où se projette une partie des fibres provenant de la rétine, en couleur claire sur la figure) entraîne des troubles de la vision marqués par une cécité d'un type particulier. Le sujet déclare ne plus voir dans la partie de son champ visuel correspondant à la zone lésée (et dans la totalité du champ si la lésion est bilatérale et complète). Ce fait est cependant surprenant, si l'on considère que la lésion corticale ne détruit qu'une partie seulement des voies nerveuses visuelles et épargne celles qui se distribuent dans les régions sous-corticales du cerveau. Il devrait en effet persister chez de tels malades des capacités visuelles qui témoignent de l'activité de ces fibres épargnées par la lésion. La mise en évidence de cette vision sous-corticale est possible, mais elle requiert une méthodologie particulière permettant d'obtenir du patient des réponses qui sollicitent les capacités de détection des parties restées intactes de son système nerveux, sans faire intervenir nécessairement la représentation

qu'il se fait du monde visuel. C'est en obligeant le patient à produire une réponse chaque fois qu'une cible est présentée dans la partie aveugle de son champ visuel (en y dirigeant le regard ou en pointant du doigt dans sa direction) que l'on parvient à la tester. Dans cette situation, où il doit répondre même s'il n'a rien vu, le patient ne s'oriente en effet pas au hasard : ses réponses font au contraire la preuve d'une capacité de détection relativement précise de la position de la cible. Mais la vision sous-corticale a ses limites, puisque le patient sera incapable de détecter la nature ou la forme de la cible, même si l'on utilise aussi une technique basée sur la « réponse forcée » : les réponses, dans ce cas, se font au hasard. On obtient ainsi grâce à ce type d'examen (qui n'a encore été réalisé que chez un très petit nombre de patients) une dissociation remarquable des réponses en fonction de la nature de la tâche demandée.

Ces faits suggèrent que la spécialisation d'une région du cerveau dépend du type et de la quantité d'informations qu'elle reçoit et de la surface synaptique dont elle dispose pour traiter cette information. Dans le cas de l'information visuelle, le traitement effectué par le cortex aboutit à extraire du monde des objets des attributs d'un degré de complexité élevé, qui peuvent ensuite constituer le matériau de base d'opérations cognitives telles qu'identification, dénomination, catégorisation, utilisation, et qui requièrent par conséquent la présence d'une représentation mentale. Par contre, la détection d'attributs plus simples, comme la position d'un stimulus dans l'espace, qui débouche sur des opérations plus élémentaires comme l'élaboration de réactions motrices, peuvent être prises en charge par des régions du cerveau autres que le cortex, disposant d'une surface synaptique plus restreinte, et dont l'activité ne s'accompagne pas nécessairement d'une expérience subjective. Cette conception modulaire du fonctionnement nerveux est en partie inspirée par les données anatomiques récentes sur les modalités des connexions à l'intérieur du cerveau. Ces données, en effet, ne sont pas compatibles avec un traitement de l'information sur un mode séquentiel et hiérarchisé, qui progresserait par étapes et où les attributs complexes des objets seraient le résultat de l'addition de propriétés plus simples. Les voies nerveuses par où circule l'information comportent en fait de nombreux embranchements. La même information peut ainsi être disponible dans plusieurs régions du cerveau à la fois et être traitée simultanément

■ Marc Jeannerod, professeur de physiologie à l'université Claude Bernard de Lyon, directeur du Laboratoire de neuropsychologie expérimentale, INSERM (unité 94), 16, avenue du Doyen Lépine, 69500 Bron.



Carte du cortex cérébral de l'homme, déterminée d'après l'architecture histologique des couches de cellules de chaque région (d'après Brodmann).

— La zone visuelle « primaire » occupe la partie postérieure de chaque hémisphère (en couleur claire).
— La zone pariétale postérieure est composée de plusieurs aires au carrefour des lobes occipital, temporal et pariétal (en couleur sombre).

A gauche, face externe de l'hémisphère gauche.

A droite, face interne de l'hémisphère droit.

par ces différentes régions, corticales ou autres, qui extraient, en parallèle, de l'environnement les attributs pour lesquels elles sont chacune spécialisées.

Espace et hémisphère droit

Le second exemple, qui révèle un autre aspect essentiel du fonctionnement du cortex cérébral chez l'homme, concerne les effets produits par certaines lésions de la région pariétale postérieure (en couleur sombre sur la figure). Ces lésions entraînent un ensemble complexe de symptômes qui traduisent l'incapacité du patient à s'orienter dans l'espace et surtout à manipuler les notions spatiales par le dessin, le langage ou la mémoire. De fait, les malades qui portent ces lésions sont incapables de dessiner, surtout s'il s'agit d'un dessin comportant une perspective : ils sont incapables de décrire verbalement un itinéraire familier, de dresser le plan de la pièce où ils se trouvent, de situer une ville sur une carte de géographie. Dans certains cas, la désorientation peut porter sur une zone entière de l'espace que le malade ignore dans son comportement et qu'il néglige dans la représentation qu'il se fait de son environnement.

Ce qui rend ce syndrome particulièrement intéressant pour notre propos, c'est non seulement le fait que le déficit porte sur le niveau cognitif de la représentation de l'espace des lieux, mais aussi qu'il n'apparaît qu'à la suite de lésions siégeant dans l'hémisphère droit, alors que des lésions dans des zones homologues de l'hémisphère gauche ne le produisent pas. Ce fait s'intègre donc, comme les troubles du langage dont on sait qu'ils surviennent presque uniquement à la suite de lésions situées dans l'hémisphère gauche, dans la conception générale d'une asymétrie fonctionnelle du cortex cérébral chez l'homme.

Cette spécialisation de l'hémisphère droit pour la représentation et l'utilisation des données spatiales repose sur une différenciation anatomique. De la même façon qu'à gauche les zones dévolues aux fonctions du langage sont plus étendues que leurs homologues situées à

droite, la région pariétale postérieure de l'hémisphère droit est plus étendue que celle du côté gauche, et possède une circonvolution supplémentaire. La région pariétale postérieure est une zone où convergent et s'associent des informations provenant de plusieurs sphères sensorielles (informations visuelles, auditives, tactiles, musculaires, vestibulaires). On conçoit bien que le plus grand espace synaptique dévolu à cette convergence dans l'hémisphère droit lui confère un rôle privilégié dans le traitement des informations spatiales.

Le fait que certaines opérations soient représentées dans un hémisphère et pas dans l'autre est maintenant admis comme un principe de base du fonctionnement du cortex. Toutefois, seules des opérations relativement indépendantes du monde environnant, comme les opérations cognitives portant sur la manipulation des symboles ou la représentation de l'espace, peuvent relever d'ensembles nerveux distribués de façon asymétrique. Il en va tout autrement d'opérations telles que l'analyse des signaux sensoriels et le contrôle des mouvements correspondants, qui doivent être assurées de manière symétrique, et donc relever d'ensembles nerveux identiques siégeant de chaque côté. On peut donc admettre que chez l'homme, dont l'adaptation au milieu dépend pour une large part des capacités cognitives et non plus seulement des capacités motrices ou sensorielles, le principe de fonctionnement symétrique des hémisphères a pu être abandonné partiellement au profit d'un autre principe plus évolué, basé sur un fonctionnement différent pour chaque hémisphère. Cette asymétrie a bien une valeur adaptative, dans la mesure où le contenu informationnel de deux hémisphères différents est le double de celui de deux hémisphères identiques. ■

BIBLIOGRAPHIE

- Jeanerod (M.), éditeur, *Neurophysiological and neuropsychological aspects of spatial neglect*, North Holland, Amsterdam, 1987.
Jeanerod (M.), *The Neural and behavioural organization of goal-directed movements*, Oxford University Press, Oxford, 1988.

La représentation d'opérations cognitives sensori-motrices, comme l'organisation du comportement orienté dans l'espace, est plus importante dans l'hémisphère droit. Ce mode de répartition assure à chacune de ces opérations une surface synaptique plus étendue qu'une représentation égale dans les deux hémisphères.

Une nouvelle classe de neurones sensori-moteurs

John SEAL

On peut considérer que le comportement d'un animal est un ensemble d'actes moteurs effectués en réponse à des stimuli spécifiques provenant du milieu intérieur (soif, faim...) ou de l'environnement (par la vision, l'audition, le toucher...). Des récepteurs sensoriels détectent les caractéristiques du milieu intérieur et de l'environnement et l'activité musculaire rend l'animal capable de réagir, si nécessaire, à leurs variations. Entre perception et action se trouve le réseau de neurones qui constitue le système nerveux central. L'information qui parcourt ce système est codée sous la forme de décharges de potentiels d'action. Pour aborder l'étude du mécanisme par lequel l'action est liée à la perception on utilise des techniques permettant d'enregistrer les potentiels d'action produits par un seul neurone, chez un animal éveillé, au cours de l'exécution d'un mouvement préalablement appris. Dans de telles expériences, un signal est présenté à l'animal qui doit réagir par un mouvement bien défini afin d'obtenir la récompense.

Après la perception initiale du signal, on suppose que, dans leur transfert d'une structure à l'autre, les impulsions nerveuses, déclenchées à l'origine par le stimulus, sont progressivement transformées en un message moteur. Celui-ci est finalement exprimé au niveau des motoneurones qui innervent les muscles. Des études anatomiques ont mis en évidence les nombreuses connexions entre les entrées sensorielles et les motoneurones. Les nouvelles technologies d'enregistrement unitaire de l'activité neuronale ont permis d'attribuer une fonction sensorielle ou motrice aux structures cérébrales placées, respectivement, au début ou à la fin de ces voies.

Cependant, il n'est pas satisfaisant de séparer aussi nettement la fonction sensorielle et la fonction motrice pour des structures nerveuses éloignées de l'entrée sensorielle par de nombreuses synapses, mais éloignées également de la sortie motrice comme le cortex pariétal postérieur.

En effet, d'après des expériences récentes, cette région corticale contient non seulement des neurones sensoriels et des neurones moteurs, dont l'activité est modifiée respectivement en réponse au signal sensoriel et juste avant le mouvement, mais aussi des neurones d'un troisième type, dits sensori-moteurs. Ces neurones présentent deux changements d'activité : l'un lié au signal et

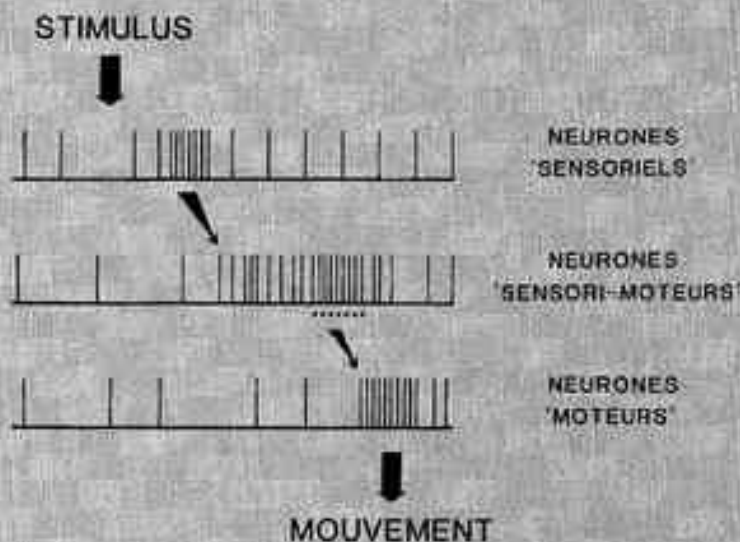
l'autre juste avant le mouvement. On peut considérer que ce type de neurone possède à la fois des fonctions sensorielles et motrices et se trouve impliqué dans la transformation des activités sensorielles en activités motrices. Cette intégration progressive de l'information est représentée dans la figure. Cette représentation se caractérise principalement par le fait que l'excitabilité des neurones sensori-moteurs peut être modulée par des influences facilitatrices ou inhibitrices provenant d'autres structures cérébrales. Ainsi l'excitation initiale, déclenchée par les neurones sensoriels, atteindra, ou non, le seuil nécessaire pour activer les neurones moteurs.

De nombreux arguments suggèrent que ces trois ensembles de neurones, sensoriels, moteurs et sensori-moteurs,

coexistent dans plusieurs des structures interposées constitutives des voies qui relient les entrées sensorielles aux sorties motrices. Dès les premières structures, les modulations d'excitabilité des neurones sensori-moteurs vont transformer progressivement l'activité sensorielle en signal pour le mouvement.

Au fur et à mesure que le message s'approche de l'étape finale constituée par les motoneurones, le processus de modulation aboutit à une spécification de plus en plus détaillée de l'acte moteur.

■ John Seal, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire des neurosciences fonctionnelles (I.P. 28 du CNRS), unité de neurosciences cognitives, CNRS, 11, chemin Joseph Aiguier, 13402, Marseille Cedex 9.



Représentation schématisée du modèle hypothétique du mécanisme de la transformation de l'activité sensorielle en activité motrice. Les trois types de neurones que nous avons identifiés sont supposés ordonnés séquentiellement. L'activité neuronale initialement évoquée au niveau des récepteurs sensoriels est transmise aux neurones de type sensoriel et provoque un changement de leur activité. Ces neurones, à leur tour, influencent les neurones de type sensori-moteur entraînant le début d'un changement d'activité. Les neurones de type sensori-moteur influencent les neurones de type moteur qui sont en connexion avec les structures motrices directement impliquées dans la contraction musculaire. Cependant, avant que les neurones de type moteur soient activés, le niveau d'activité des neurones de type sensori-moteur doit atteindre un seuil critique (indiqué par la ligne pointillée). Ce seuil peut être modulé par des influences facilitatrices ou inhibitrices, de sorte que l'activité des neurones de type sensori-moteur peut entraîner ou non un changement de l'activité des neurones de type moteur.

La perception visuelle du mouvement

C'est à partir du mouvement visuel des images rétiniennes des objets sur la rétine que l'organisme repère ses proies ou ses prédateurs, s'oriente dans son environnement, structure son espace, construit des représentations des objets et se perçoit comme étant stationnaire dans un monde visuel en mouvement ou bien en déplacement dans un monde stationnaire. Ces mouvements rétiniens fournissent ainsi à l'organisme des informations extrêmement riches et indispensables au guidage visuel de ses actions.

Claude BONNET

Comprendre les mécanismes de la perception visuelle du mouvement suppose que l'on ait déterminé les dimensions de la stimulation responsables des expériences des sujets examinés. Le déplacement de l'image rétinienne d'un objet semble être la condition de la perception visuelle de son mouvement. Cependant, si nous suivons du regard cet objet, son image rétinienne reste approximativement stationnaire sur la rétine, et cependant nous percevons son mouvement. Ceci se produit même si l'objet est réduit à un point lumineux présenté dans le noir, de sorte qu'il n'existe aucun mouvement relatif des objets dans le champ. Néanmoins, pour une même vitesse physique, la vitesse apparente d'un mobile suivi du regard sera moindre que si le regard reste fixé sur un point stationnaire de l'environnement.

La perception visuelle de mouvements résulte de la mise en œuvre de mécanismes de traitement d'informations relatives aux déplacements des images rétiniennes, aux mouvements oculaires et à d'autres modalités sensorielles, comme le système vestibulaire. Nous nous centrerons ici sur la première source d'information. Comme nous allons le voir dans la seconde et la troisième partie, la perception visuelle de mouvements complexes suppose d'abord le codage de mouvements élémentaires.

Deux systèmes dans l'analyse du mouvement visuel

Il faut distinguer l'apparence de ce que nous percevons, de la manière dont notre organisme traite l'information pour élaborer ses perceptions. Ainsi, une succession d'images stationnaires, appelée translation discontinue, peut nous donner l'impression d'un mouvement continu de l'objet. Ce phénomène de mouvement apparent est à la base du cinéma par exemple. Mais en dépit de leur ressemblance, un mouvement physique continu d'un objet, et une translation discontinue ne sont pas traités par les mêmes mécanismes neuro-sensoriels. Des différences plus ou moins subtiles dans leur perception nous ont permis de distinguer, et de mieux connaître, deux systèmes neuro-

sensoriels d'analyse des mouvements visuels dont les fonctions ne sont pas analogues.

Les vitesses physiques de translation d'un objet constituent un continuum des plus lentes aux plus rapides. Cependant, pour l'organisme humain, ce continuum conduit à deux types de codage distincts de l'information. D'une part, lorsque les vitesses sont lentes, ou bien que le mouvement consiste en une translation discontinue, l'organisme réalise un codage de déplacement, c'est-à-dire un changement de position au cours du temps. La vitesse perçue est alors le résultat d'une sorte de calcul. D'autre part, pour des translations réalisées à des vitesses plus rapides et sans la présence d'arrêts momentanés, l'organisme réalise un codage du mouvement proprement dit, ou de la mobilité, dans lequel la vitesse serait une caractéristique élémentaire. Le Système Analyseur de Déplacement (SAD) traite essentiellement la succession temporelle de positions stationnaires ou quasi stationnaires dans le cas de vitesses lentes. Le Système Analyseur de Mobilité (SAM) intègre directement les caractéristiques dynamiques des translations continues sous forme de vitesse.

Cette distinction des deux systèmes concerne aussi des stimuli périodiques en translation continue. Ces stimuli constitués de barres alternativement sombres et claires sont appelés des réseaux de fréquence spatiale. Une barre claire plus une barre sombre forme un cycle ou une période de réseau. Une variable visuellement importante est la taille angulaire de cette période que l'on a l'habitude de mesurer en terme de fréquence spatiale. La fréquence spatiale, qui s'exprime en nombre de cycles par degré d'angle visuel (cpd), correspond à l'inverse de la grandeur angulaire d'un cycle de réseau (une barre sombre + une barre claire). Le SAD, qui traite les composantes spatiales de la stimulation, est activé par des fréquences spatiales moyennes ou élevées (barres fines) en mouvement à des vitesses lentes, tandis que le SAM, qui traite plus spécifiquement la mobilité, est activé par des fréquences spatiales basses (barres larges) en mouvement à des vitesses moyennes ou élevées. La variation du contraste des réseaux, c'est-à-dire de la différence relative de luminance entre les barres claires et les barres sombres, permet de mesurer des seuils perceptifs. Si, pour un réseau en mouvement à vitesse moyenne, on augmente progressivement le contraste depuis un contraste nul (surface perceptivement uniforme), on pourra illustrer la différence des fonctions des deux

■ Claude Bonnet, professeur à l'université René Descartes, responsable du Laboratoire de psychologie expérimentale (UA 316 CNRS), université de Paris V, 28, rue Serpente, 75006 Paris.

Le même mouvement visuel d'un point lumineux peut donner naissance à deux informations traitées séparément par le système visuel. Une information de position, et de changement de position, et une information de vitesse. Chacune de ces informations permet des actions spécifiques comme par exemple pointer un endroit particulier de la trajectoire, ou bien suivre le mouvement.

Lorsque nous déplaçons dans notre environnement, les images rétiniennes des objets de cet environnement sont en mouvement sur des trajectoires complexes et subissent des transformations dynamiques variées. L'ensemble de ces informations est intégré de manière à produire une perception cohérente.

systèmes. Lorsque les barres sont fines (fréquences spatiales élevées), le contraste le plus faible permettant de voir quelque chose correspondra à l'identification de l'orientation des réseaux, c'est-à-dire à une caractéristique spatiale. Mais on ne percevra pas alors le mouvement. Un contraste plus élevé sera nécessaire pour identifier le sens du mouvement. Au contraire, lorsque les barres sont larges (fréquences spatiales basses), le contraste le plus bas permet d'identifier le sens du mouvement de quelque chose dont la structure spatiale (barres verticales par exemple) nécessite un contraste plus élevé pour être perçue. Ce résultat est illustré sur la figure 1. Bien que systématique, la différence des deux fonctions est relativement faible chez les jeunes adultes normaux. Cette différence augmente avec l'excentricité rétinienne de la stimulation où la prédominance du SAM pour les fréquences spatiales basses devient plus marquée. Par ailleurs, certaines atteintes de la sensibilité visuelle, comme la presbytie (et/ou le vieillissement), concernent plus spécifiquement un système que l'autre.

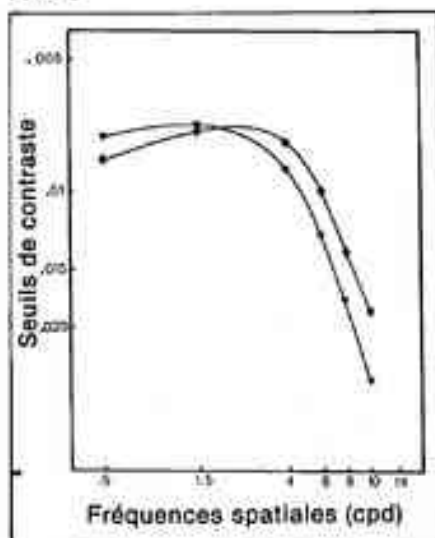


Fig. 1 : Seuils de contraste pour des réseaux striés défilant avec une fréquence temporelle de 12 hertz en fonction de la fréquence spatiale des réseaux (coordonnées sur des échelles logarithmiques). Les losanges correspondent à la discrimination des orientations des réseaux (SAD), les triangles (points en bas), à la discrimination du sens de mouvement (SAM). (Bonnart et al., 1987)

Ségrégation et synthèse de plusieurs mouvements visuels simultanés.

Dans un environnement réel, c'est à une multiplicité d'éléments en mouvement que se trouve confronté le système visuel. Ces mouvements forment des flux visuels représentables par une multiplicité de vecteurs vitesse dans différentes directions. La présentation simultanée, dans la même région de l'espace visuel, de plusieurs ensembles d'éléments en mouvement dans des directions différentes peut conduire à des expériences perceptives extrêmes. Dans certaines conditions, le système visuel combine les différents mouvements en un seul mouvement cohérent perçu, dit aussi configuration de mouvement. Dans d'autres cas, cette cohérence perceptive n'est pas atteinte et, au contraire, se manifestent des phénomènes de ségrégation tels que, perceptivement, la différence apparente des directions des mouvements est exagérée. Pour démontrer ce fait (voir figure 2a), on fait défiler sur un écran deux nuages de points répartis aléatoirement, présentés en superposition (ce que symbolise le signe plus), chacun se déplaçant dans une direction (symbolisée par l'orientation de la flèche). On observe alors un phénomène ségrégatif : les deux mouvements sont perçus simultanément en transparence et à des profondeurs différentes. C'est ce phénomène qui est symbolisé dans la partie droite de la figure 2a, où l'on a représenté les deux nuages de points décalés en profondeur et les deux directions de mouvements simultanément perçues. Si l'on diminue l'intensité lumineuse des points jusqu'à ce qu'ils deviennent à peine perceptibles, un phénomène de fusion va se manifester : les deux mouvements seront perçus comme un seul mouvement cohérent dont la direction sera approximativement la résultante des deux vecteurs vitesses. Sur la figure 2a, un tel phénomène se représenterait par une seule flèche horizontale. Les mêmes phénomènes de ségrégation (ou fusion) et de configuration (ou fusion) peuvent être étudiés avec des réseaux de fréquence spatiale. Dans la figure 2b, on a représenté à gauche les deux réseaux qui, superposés, donnent la partie droite de la figure qui, elle, correspond à ce que voit l'observateur. Il apparaît alors un phénomène de fusion, c'est-à-dire le mouvement unique d'une sorte de quadrillage. Cette fusion est perceptivement d'autant plus évidente que la différence de fré-

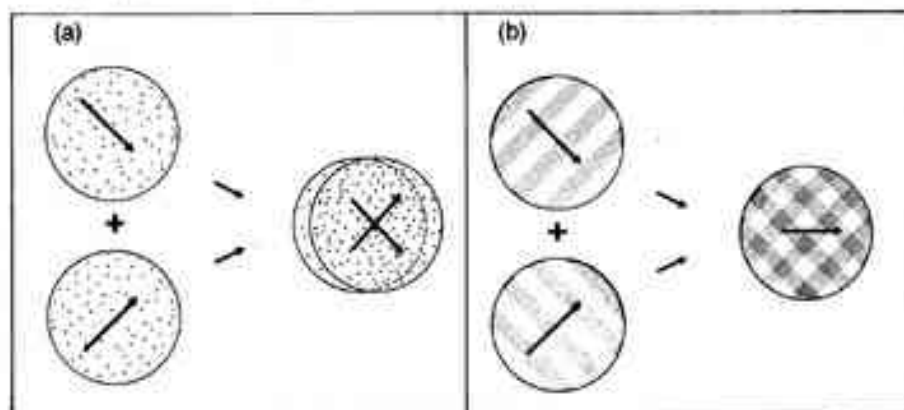


Fig. 2 : Ségrégation et configurations dans la perception de mouvements complexes.

(a) Deux ensembles de points aléatoires en translation dans deux directions différentes (à gauche) sont présentés en superposition (symbolisée par le signe plus) : deux mouvements sont simultanément perçus en transparence à des profondeurs différentes et la différence perçue de leurs directions est plus grande que celle des mouvements physiques (partie droite).

(b) Deux réseaux de fréquence spatiale en translation dans deux directions différentes sont présentés en superposition : un seul mouvement d'une configuration est perçu.

quence spatiale et/ou de vitesse des réseaux est plus faible. Pour expliquer ces phénomènes, on a été amené à postuler qu'à un premier niveau de traitement dans le système visuel, les directions des mouvements élémentaires (représentés à gauche dans la figure 2) sont codées séparément. A un second niveau (partie droite dans la figure 2), selon qu'il existe ou non des relations inhibitrices entre ces codages élémentaires, il y aura ou non intégration de ces mouvements en un mouvement cohérent unique. Ainsi, lorsque les deux mouvements des réseaux sont présentés séparément aux deux yeux (présentation dichoptique), des phénomènes ségrégatifs apparaissent pour des contrastes élevés des réseaux : le système visuel paraît incapable de fusionner les deux stimulations, et la perception oscille de l'une à l'autre.

Au contraire, pour des contrastes faibles, proches des seuils, la fusion binoculaire des deux mouvements est possible. Le sujet perçoit alors le mouvement cohérent d'un quadrillage (figure 2b à droite). Comment comprendre alors qu'une scène visuelle, même réduite à quelques points lumineux, conduise à la perception de mouvements cohérents d'objets rigides ? On remarque que lorsque les points lumineux correspondent à des objets rigides en mouvement (translation et/ou rotation), leurs alignements respectifs varient au cours du temps, au contraire de ce qui se passe lors des translations de nuages de points aléatoires.

Nous avons alors fait l'hypothèse que les phénomènes ségrégatifs résultaient principalement d'inhibitions entre des informations d'orientation données par les alignements des points, et non entre les directions de mouvements. De nombreux faits permettent en effet de penser que ces deux caractéristiques du stimulus sont codées séparément par le système visuel. En faisant déplacer les points selon des trajectoires sinusoïdales, tout en maintenant une même direction moyenne, les alignements des points fluctuent aléatoirement au cours du temps.

Dans ces conditions, si notre hypothèse est correcte, des mouvements cohérents devraient être perçus. C'est effectivement ce qui se passe, et cette hypothèse peut expliquer pourquoi les flux visuels réalisés à l'aide de points conduisent très généralement à des perceptions de mouvements visuels cohérents. On remarquera que les modifications d'orientation s'accompagnent le plus souvent de vitesses différentes dans le flux.

Les sensations de mouvement du corps propre : la vection

La présentation de flux visuels dans une plus ou moins grande portion du champ entraîne chez l'observateur la sensation d'être en déplacement, même si celui-ci est, et se sait, immobile. Ces phénomènes sont appelés vection (voir l'article de Berthoz). Un dispositif à la fois simple et très flexible (figure 3) peut être utilisé pour étudier ces phénomènes. Il consiste à présenter symétriquement à 60° d'excentricité rétinienne deux réseaux de fréquence spatiale en défilement. Selon l'orientation (verticale ou horizontale) des réseaux et le sens (identique ou opposé) de leur défilement, on peut engendrer quatre types de vections différentes (figure 4) : deux vections linéaires suivant l'axe sagittal ou l'axe vertical et deux vections circulaires (autour de l'axe sagittal ou autour de l'axe vertical). Ainsi, le défilement descendant de deux réseaux horizontaux engendrera une sensation de mouvement ascendant (vection linéaire verticale). Si, maintenant, le réseau de gauche est en mouvement ascendant, et le réseau de droite en mouvement descendant, le sujet aura la sensation de tourner autour de l'axe X (roulis dans la figure 4) dans le sens anti-horaire (vers la gauche). Ce dispositif est, en somme, un simulateur de mouvement.

Les seuils de contraste pour ces sensations de vection (aussi appelé mouvement exocentrique parce que la référence du mouvement est externe) sont systématiquement plus élevés que les seuils de contraste pour la détection du mouvement des réseaux (aussi appelé mouvement égocentrique parce que la référence du mouvement est maintenant le sujet lui-même). En conséquence, des vections ne sont obtenues que pour des fréquences spatiales les plus basses, visibles aux excentricités de présentation des stimuli. Pour qu'un mouvement présenté en vision périphérique puisse engendrer une vection, il apparaît nécessaire que le stimulus (son mouvement égocentrique) soit identifiable. Les caractéristiques des fonctions de sensibilité à la vection suggèrent que les informations qui en sont responsables ont été pré-traitées par le SAM plutôt que par le SAD. Ce décalage des sensibilités aux mouvements égo et exocentriques évite au moins qu'une vection puisse être provoquée par une stimulation infra-liminale. Et c'est heureux pour notre sécurité quotidienne !

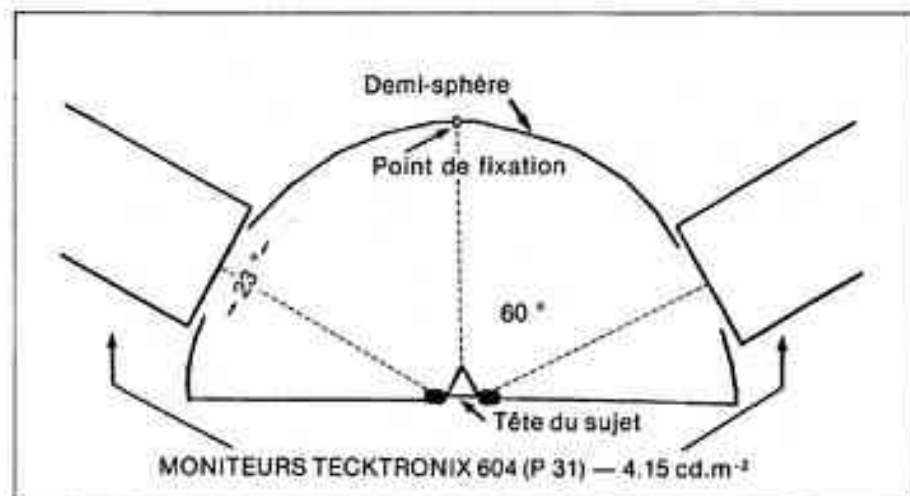


Fig. 3 : Schéma du dispositif expérimental pour l'étude des vections. Dans une demi-sphère noire sont percées deux ouvertures circulaires par où apparaissent des réseaux de fréquence spatiale qui défilent. Ces réseaux sont générés sur des moniteurs cathodiques. Le sujet regarde droit devant lui un point de fixation.

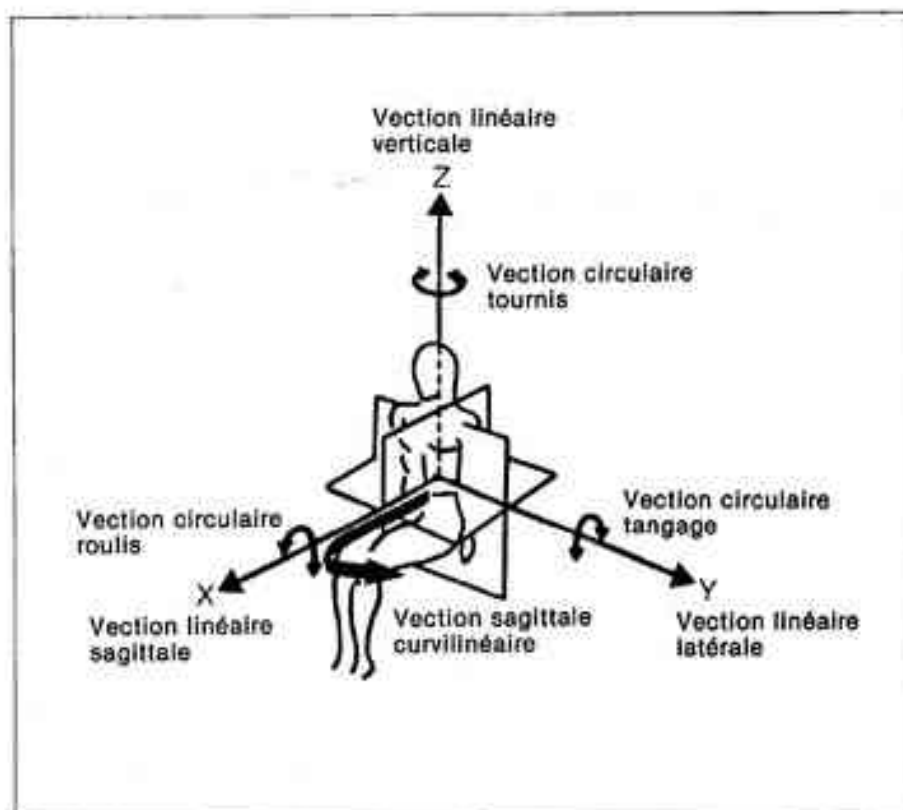


Fig. 4 : Schéma de différents types de vections par rapport aux axes du corps (X, Y, Z). On a représenté trois vections linéaires (translations) et trois vections circulaires (rotations). La vection curvilinéaire est une combinaison d'une vection linéaire (sagittale) et d'une vection circulaire.

La vision périphérique joue un rôle primordial dans la perception de nos déplacements dans un environnement stable. Le mouvement des images sur ces parties périphériques de la rétine est suffisant pour nous faire ressentir le mouvement de notre corps.

La posture des sujets peut favoriser ou restreindre l'apparition des phénomènes de vection. Dans notre dispositif, où les champs de mouvement ont une dimension réduite, nous n'obtenons pas de vection lorsque les sujets sont debout. Des vections sont obtenues pour les sujets assis ; elles deviennent très importantes s'ils sont allongés sur une surface de mousse. Soulignons que la connaissance de la situation expérimentale, et en particulier du fait qu'elle rend impossible un déplacement réel de l'observateur n'empêche pas l'apparition des phénomènes de vection qui sont ainsi des réponses normales de l'organisme à ce type de stimulation.

Si dans la plupart des situations naturelles, la vection a une finalité de suppléance des informations vestibulaires, il reste des cas où l'information qu'elle apporte à l'organisme est erronée et potentiellement dangereuse. Nos déplacements ne s'effectuent pas uniquement sur des trajectoires linéaires. Nous avons donc cherché à montrer que des stimulations de mouvement asymétriques entre les deux côtés du champ pouvaient entraîner des sensations de vection sur des trajectoires curvilinéaires (sensations de virage). Ces dissymétries entre les deux mouvements, l'un présenté à droite, l'autre à gauche, portaient soit sur les contrastes, soit sur les fréquences spatiales, soit sur les fréquences temporelles, soit encore sur les deux types de fréquences. Des vections curvilinéaires correspondent à des sensations de mouvement exocentrique le long d'une trajectoire courbe. La trajectoire perçue s'incurve du côté du contraste le plus faible, de la fréquence spatiale la plus élevée, de la fréquence temporelle la plus basse ou de la vitesse la plus lente. Les résultats suggèrent en fait que l'incurvation se fait du côté où la vitesse apparente du défilement est la plus faible. Il existe d'ailleurs une relation directe entre vitesse perçue de la vec-

tion et degré de courbure perçue de la vection curvilinéaire. Il est alors possible de penser que dans des situations réelles de conduite automobile par exemple, alors que l'on doit négocier un virage vers la gauche, la stimulation visuelle en vision périphérique puisse induire des sensations de virage vers la droite et constituer ainsi une source potentielle de danger. Ces questions sont actuellement à l'étude. On peut ainsi simuler à l'aide des seules stimulations visuelles de mouvement des déplacements du corps suivant des trajectoires assez complexes comportant des translations linéaires, des montées, des descentes, des virages, voire des inversions du sens de marche.

En conclusion, les quelques recherches psychophysiques présentées ici montrent dans quelle mesure nos expériences visuelles du mouvement sont dépendantes des caractéristiques physiques du stimulus et des systèmes neuro-sensoriels qui traitent certaines informations contenues dans ces stimuli. Le panorama dressé ici est fort incomplet. Nous avons tenté simplement d'illustrer trois classes de dichotomies dans les traitements perceptifs du mouvement visuel. La première (SAM/SAD) concerne les mécanismes de base du codage des dimensions élémentaires de la stimulation rétinienne. La seconde concerne les limites de l'intégration (fusion) de différentes dimensions des stimuli conduisant à la perception d'un seul mouvement cohérent d'un flux visuel. Enfin, la troisième concerne l'étude d'une des fonctions de cette intégration, à savoir d'informer l'organisme soit sur le déplacement des objets (mouvement égocentrique), soit sur son propre déplacement (mouvement exocentrique ou vection). Ces recherches permettent de mieux déterminer les informations qui vont servir à une élaboration cognitive de la situation, et ainsi au guidage de nos actions. ■

Mouvement et perception des déplacements chez le nourrisson

François JOUEN

Les recherches consacrées aux débuts de la motricité chez le nourrisson ont progressivement révélé l'existence, dès la naissance, d'organisations motrices complexes. Il est ainsi apparu que la variété de mouvements produits spontanément ou en réponse à des sollicitations extérieures est considérable et ne peut, en aucun cas, être confondue avec une simple agitation de masse ou réduite à une collection de réflexes primaires. Par ailleurs, il a été démontré, sur le plan comportemental, que la motricité précoce est en étroite relation avec les activités de traitement perceptif de l'information sensorielle. Enfin, les travaux relatifs à la flexibilité et à l'élaboration des coordinations sensori-motrices montrent que l'activité sensori-motrice met en jeu, dès les premiers mois de la vie, une utilisation coordonnée de composantes posturales et motrices.

Certaines des recherches menées au laboratoire de psycho-biologie de l'enfant visent à comprendre comment le nourrisson peut percevoir et contrôler les déplacements de son propre corps alors même que son expérience du mouvement est limitée. Dans un travail récent nous avons pu montrer que, dès l'âge de deux mois, le système vestibulaire du nourrisson lui permet de détec-

ter des accélérations linéaires aussi faibles que 0,022 g. Sur la base de cette stimulation vestibulaire, des bébés âgés de deux, trois et quatre mois peuvent distinguer le déplacement de leur corps vers l'avant d'un déplacement vers l'arrière. Il est également possible d'induire, dès l'âge de deux mois, une illusion de mouvement du corps par une stimulation visuelle en mouvement : lorsqu'un large champ visuel structuré s'approche ou s'éloigne du sujet, ce dernier se comporte (durant plusieurs secondes) comme si c'était lui qui était déplacé dans un environnement visuel immobile (1). Les expériences que nous réalisons actuellement chez le nouveau-né (âge de un à cinq jours)* montrent que dès la naissance il est possible de créer, par stimulation visuelle, une sensation de déplacement du corps et l'apparition d'une réponse posturale d'adaptation au mouvement normalement mise en jeu par le système vestibulaire.

L'existence de telles interactions entre la vision et la sensibilité vestibulaire dès la naissance indique clairement que la perception des mouvements du corps est une coordination sensori-motrice complexe qui s'exerce très précocement dans le développement et à un niveau de contrôle élevé dans le système nerveux central.



Nourveau-né de trois jours passant l'expérience. On aperçoit le stimulateur contenu dans la boîte à clapiers.

* Tous les bébés sont nés à terme, par voie naturelle, de mères non médicamenteuses durant la fin de grossesse. Ils présentent tous un score Apgar à cinq minutes de 9 ou 10 (maxi du score = 10) et ont tous un poids supérieur à 3 250 grammes.

BIBLIOGRAPHIE

(1) Jouen (F.). La contribution des récepteurs visuels et labyrinthiques à la détection des mouvements du corps propre chez le bébé. *Année psychologique*, 1986, 86, 171-183.

■ François Jouen, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de psycho-biologie de l'enfant (UA 315 CNRS), Ecole pratique des hautes études (EPHE), III^e section, 41, rue Gay-Lussac, 75005 Paris.

Activité du regard et perception visuelle

Ariane LEVY-SCHOEN,
Kevin O'REGAN

Le système visuel ne permet pas seulement de voir, il permet de regarder. Il organise dans l'espace et dans le temps une sélection des informations qui vont être recueillies successivement pour être traitées comme un ensemble. La perception qui résulte de cette action est globale et synthétique. C'est ainsi que notre vision d'un monde stable et continu est en fait construite à partir d'une série de prises de vue fixes : deux ou trois fois par seconde, notre regard saute d'un point à un autre du champ. Alors que le lecteur croit balayer son texte d'un mouvement continu, ses yeux sont en fait stationnaires pendant les neuf dixièmes du temps (voir figure). Notons que cette immobilité se définit par rapport au champ regardé : les yeux peuvent maintenir leur fixation par un mouvement continu de poursuite si l'objet est en mouvement, ou de compensation si la tête ou le corps bougent.

On peut ainsi considérer que le système visuel est constitué de deux sous-systèmes : le sous-système récepteur (des deux rétines jusqu'au cerveau) et le sous-système moteur (des noyaux oculo-moteurs cérébraux jusqu'aux muscles des globes oculaires). Chacun possède ses contraintes propres. D'une part, le capteur sensoriel est « centré » : à chaque fixation sur une ligne de texte par exemple, le caractère qui se projette au centre de la rétine est vu avec une acuité beaucoup plus fine que les autres caractères qui sont de moins en moins reconnaissables à mesure qu'ils sont plus éloignés en périphérie. D'autre part, les mouvements qui déplacent le regard d'une fixation à une autre ont une dynamique très particulière : des saccades brusques et stéréotypées. Ces deux sous-systèmes sont en constante interaction et de plus sont soumis à des influences venant des fonctions supérieures du cerveau (attention, mémoire, compréhension, etc.). Un objectif de la recherche qui s'intéresse aux activités intelligentes est de comprendre comment se réalise cette organisation de la saisie et du traitement de l'information visuelle. Quelle décision conduit le système moteur à déclencher une saccade après une fixation dont la durée peut varier entre une centaine de millisecondes et environ une seconde ? Par quelle opération la cible visée est-elle choisie parmi tous les éléments du champ visuel périphérique ?

■ Ariane Lévy-Schoen, directeur de recherche au CNRS et Kevin O'Regan, directeur de recherche au CNRS, co-responsables de l'équipe « Regard », Laboratoire de psychologie expérimentale (UA 316 CNRS), 28, rue Serpente, 75006 Paris.

L'innervation motrice des fuseaux neuromusculaires

Léna JAMI

Les muscles squelettiques* des vertèbres supérieures contiennent des mécanorécepteurs sensibles aux changements de longueur musculaire, appelés fuseaux neuromusculaires, qui sont situés parmi les fibres musculaires ordinaires et orientés parallèlement à celles-ci. La communication entre les fuseaux et le système nerveux central est assurée par des fibres nerveuses, sensibles et motrices, contenues dans les nerfs musculaires.

Un fuseau est constitué par un petit faisceau de fibres musculaires spéciales, dites intrafusales, longues de quelques millimètres, et dont la partie moyenne sert de support aux terminaisons nerveuses sensibles, appelées terminaisons fusoriles. Cette région est entourée par une capsule remplie de liquide qui l'isole mécaniquement du tissu musculaire environnant. On distingue dans chaque fuseau plusieurs types de fibres musculaires intrafusales, qui diffèrent par leur morphologie, leurs constituants biochi-

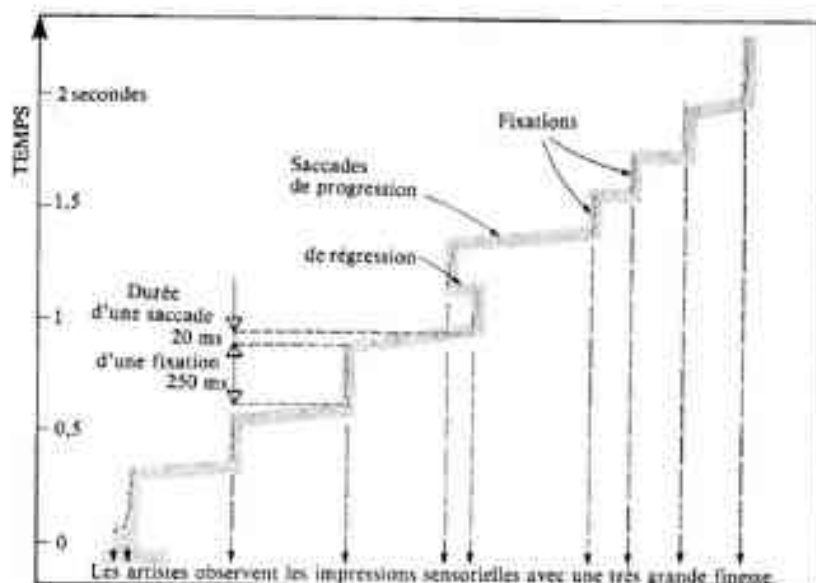
miques, leurs propriétés mécaniques et les caractères de leur contraction. La terminaison fusorile émet des influx nerveux dont la fréquence (nombre d'influx émis par seconde ou fréquence de décharge) change en même temps que la longueur du muscle. Ces influx sont transmis par la fibre sensitive qui relie chaque terminaison au système nerveux central. Le fuseau comprend deux sortes de terminaisons : primaire et secondaire. La terminaison primaire est particulièrement efficace pour signaler les allongements musculaires rapides, si petits soient-ils. Sa fibre sensitive conduit les influx nerveux à une vitesse élevée (60 à 120 mètres par seconde), ce qui lui permet de signaler rapidement au système nerveux central les changements de longueur musculaire. La terminaison secondaire mesure simplement la longueur musculaire. La vitesse de conduction de sa fibre sensitive ne dépasse pas 60 mètres par seconde.

Le système nerveux central peut moduler les réponses des terminaisons fusoriles aux allongements du muscle en modifiant les propriétés mécaniques des fibres musculaires intrafusales qui leur servent de support. Il le fait en

commandant la contraction de ces fibres, grâce à leur innervation motrice. Il existe dans la moelle épinière des neurones moteurs (ou motoneurones) prolongés par des fibres nerveuses (ou axones) très longues dont les influx transmettent aux muscles l'ordre de se contracter. On distingue trois sortes de motoneurones, désignés par des lettres grecques : les motoneurones α innervant les fibres musculaires ordinaires (dites extrafusales), les motoneurones γ innervant exclusivement les fibres musculaires intrafusales, et les motoneurones β , innervant à la fois des fibres intrafusales et extrafusales. Les influx nerveux sont conduits plus lentement dans les axones γ (20 à 50 mètres par seconde) que dans les axones α et β (50 à 120 mètres par seconde). Chaque axone γ innervant plusieurs fuseaux et chaque fuseau reçoit plusieurs axones γ ; certains fuseaux reçoivent en outre une innervation β .

L'innervation motrice des fuseaux comprend deux systèmes fonctionnels, l'un dynamique et l'autre statique, qui exercent des effets différents sur les réponses des terminaisons fusoriles en déclenchant la contraction de fibres

* dont les contractions permettent les déplacements du corps.



Un tracé typique de lecture. - Ceci est un enregistrement des mouvements des yeux d'un lecteur tandis qu'il lit la ligne de texte inscrite en bas du tracé. Le temps défile verticalement de bas en haut. Chaque point est un échantillon de la position du regard, enregistré toutes les dix millisecondes. La position horizontale des points correspond aux positions du regard dans la ligne de texte. Un empilement de points indique un arrêt prolongé (fixation) à l'endroit de la ligne indiqué par la flèche. Les segments horizontaux sont les brusques déplacements du regard (saccades), en progression de gauche à droite, en régression de droite à gauche. La ligne en couleur représente le tracé « lissé », extrait des données par l'analyse qui fait abstraction des petites instabilités de la mesure brute.

Considérons par exemple la lecture. Les décisions qui conduisent le regard d'un point du texte à l'autre ne sont pas dans le champ de la conscience. Pourtant ces déplacements sont réglés de façon parfaitement efficace. Des expériences de laboratoire visent à définir les règles suivies par le système visuel. Pour cela, on mesure et on analyse de façon précise les positions et les durées des fixations du regard de lecteurs lisant des mots ou des phrases qui ont des propriétés particulières (par exemple suivant la longueur ou la fréquence d'usage des mots ou la forme de leur construction). On peut aussi, grâce à des techniques informatisées d'analyse des mouvements des yeux en temps réel, transformer le matériel présenté, en modifiant une zone qui se déplace en même temps que le regard (par exemple on peut à chaque instant brouiller des lettres juste à droite du point fixé, ou bien déplacer à l'écran pendant une saccade le mot visé de telle sorte que le regard tombe sur un caractère défini par l'expérimentateur). De telles expériences ont montré qu'il existe une position optimale où le regard doit atterrir dans un mot pour parvenir à le lire le plus rapidement possible. On étudie ainsi comment le regard s'ajuste à la fois aux propriétés physiques du texte écrit et aussi aux propriétés du langage et au savoir du lecteur. ■

intrafusales de types différents. Chaque fuseau est sous le contrôle des deux systèmes. Les motoneurones γ ou β du système dynamique n'agissent que sur les terminaisons primaires dont ils augmentent la réponse aux étirements musculaires rapides (sensibilité dynamique). Les motoneurones γ ou β du système statique influencent les deux sortes de terminaisons fusorales. Ils augmentent le nombre d'influx émis par les terminaisons primaires même si la longueur musculaire ne varie pas, mais ils diminuent leur sensibilité dynamique (effet inverse de celui du système dynamique). Ils agissent aussi sur les terminaisons secondaires, dont ils augmentent la sensibilité aux changements de longueur musculaire.

Les modalités de commande des motoneurones γ par le système nerveux central sont encore très mal connues. Des études menées chez l'homme et chez l'animal suggèrent que la contraction musculaire volontaire, qui met en jeu les motoneurones α , s'accompagne souvent d'activation γ , c'est ce que l'on appelle la co-activation α - γ . Mais les motoneurones α et γ peuvent aussi fonctionner de façon indépendante. Les mécanismes de mise en jeu du système statique et du système dynamique restent à élucider.

■ Léna Jami, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de neurophysiologie du Collège de France, 11, place Marcelin Berthelot, 75211 Paris Cedex 05.



Objectif visé, objectif atteint... © V. Comte.

L'identification visuelle

Simon THORPE, Michel IMBERT

Malgré les progrès importants accomplis dans le domaine du traitement d'image par ordinateur, la capacité du système visuel humain à identifier et à classer les images dépasse aisément celle des systèmes artificiels actuels. Devant une image en dehors de tout contexte (une photo de Ronald Reagan, le Mont Saint-Michel, une Renault Cinq, la Joconde, etc.), nous sommes tous capables de retrouver facilement « l'étiquette » correspondante. Le nombre d'objets et de scènes qui peuvent être ainsi identifiés est très élevé : si on tente de compter le nombre de visages, d'animaux, de plantes, de voitures, d'outils, d'endroits géographiques et de symboles pour lesquels nous pouvons trouver une « étiquette », le total dépasse aisément les cent mille. De

plus, ce processus d'identification peut s'effectuer dans un délai très bref : plusieurs types d'expériences suggèrent que le temps pris pourrait être de l'ordre de 100 à 150 millisecondes. Ceci est d'autant plus remarquable lorsqu'on considère la relative lenteur des éléments neuronaux qui constituent notre cerveau — la fréquence des impulsions électriques d'un neurone cortical excède rarement 100 par seconde.

Une explication partielle de cette efficacité étonnante réside dans le fait que le système visuel traite l'image en parallèle. Plus d'un million de fibres transmettent l'information rétinienne vers le cerveau. Chaque fibre est spécialisée dans la détection et le codage de certaines caractéristiques fonctionnelles présentes dans une zone limitée de l'image. Celle-ci est en quelque sorte filtrée par différents filtres superposés avant d'être transmise « en parallèle » à un nombre important d'aires corticales. Aujourd'hui, on en connaît une bonne douzaine organisées dans un réseau d'interconnexions complexes. Chacune semble spécialisée dans l'analyse d'aspects particuliers de l'image :

l'orientation des bords, le mouvement, la profondeur, la couleur... Il existerait même des neurones dans le lobe temporal inférieur du singe spécialisés dans le traitement des visages !

Quel rapport existe-t-il entre l'activité de tels neurones sélectifs et l'acte d'identification ? Pour tenter de répondre à cette question, nous avons déterminé la capacité de sujets humains à identifier des stimuli visuels très simples pour lesquels les données neurophysiologiques sont connues (lignes ou réseaux d'orientation variable, plages de luminosité ou de couleur variable, etc.). D'après nos résultats, il semble qu'un sujet devant identifier une ligne verticale est capable de le faire non pas parce que les neurones préférant la verticale sont les plus actifs, mais plutôt par le fait que les neurones préférant +15 degrés et -15 degrés (par rapport à la verticale) ont le même niveau d'activité. Les renseignements obtenus par nos études sur l'identification des stimuli visuels simples permettront peut-être une meilleure appréciation du fonctionnement du système visuel.

■ Simon Thorpe, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire des neurosciences de la vision.

■ Michel Imbert, professeur à l'université Pierre et Marie Curie, responsable du Laboratoire des neurosciences de la vision (UA 1199 CNRS), université Pierre et Marie Curie, 4, place Jussieu, 75230 Paris Cedex 05.

Perception du mouvement et représentation de l'espace

La question de la reconstruction centrale de l'espace et du mouvement du corps par le cerveau est fondamentale. En effet, la perception, l'orientation, la coordination des mouvements, l'équilibre, l'exploration visuelle, la mémoire des lieux, ainsi que de nombreuses opérations motrices ou mentales ne sont possibles que si une représentation correcte de l'espace est effectuée par les réseaux neuronaux du cerveau.

Alain BERTHOZ

La représentation de l'espace : une fonction cérébrale importante ?

Le problème abordé ici dépasse le seul cadre de la neurobiologie ou de la psychophysiologie. En effet, la question de la perception de l'espace est aussi centrale en philosophie, elle conditionne peut-être les frontières de la physique telles qu'un cerveau humain peut la concevoir, et limite actuellement certains progrès de la robotique avancée, notamment dans le domaine de la télémanipulation assistée par ordinateur.

Enfin, on a pu prétendre que l'organisation du langage a eu, au cours de la phylogenèse, des racines profondes dans cette propriété spéciale développée par le cerveau. Par exemple, Conrad Lorenz a suggéré que l'organisation du langage émergea de la nécessité d'avoir une représentation interne de l'espace pour planifier un comportement d'orientation, ou utiliser le répertoire des « coordinations héréditaires » de chaque espèce.

La perception de l'espace dépend des capteurs sensoriels mais elle résulte aussi de mécanismes automatiques de stabilisation perceptive dans lesquels les réflexes sensorimoteurs précâblés ne sont qu'un élément. L'étude neurobiologique et psychophysique des processus qui permettent la représentation centrale de l'espace est un champ important des neurosciences modernes et de leurs applications.

Les capteurs sensoriels et la perception du mouvement

La physiologie sensorielle est caractérisée par une spécialisation des chercheurs et des thèmes de recherche suivant un découpage qui correspond aux différents capteurs : vision, audition, système vestibulaire, capteurs musculaires et tendineux, etc. Cette division doit disparaître si l'on s'intéresse non pas aux capteurs mais à la fonction. Si, par exemple, le cerveau doit reconstruire le mouvement de la tête dans l'espace, il faut qu'il utilise une com-

binaison d'informations données par différents capteurs. En effet, les capteurs musculaires ne mesurent que les déplacements relatifs des segments corporels entre eux, et ne donnent aucune indication sur le mouvement dans l'espace. Les récepteurs vestibulaires donnent, au contraire, une mesure précise de l'accélération angulaire de la tête par rapport à l'espace (c'est le rôle des canaux semi-circulaires) comme le ferait une centrale inertielle de navigation. Ils constituent un référentiel euclidien (les canaux sont situés dans trois plans perpendiculaires). Mais ils ne peuvent mesurer les mouvements lorsque ceux-ci sont à vitesse constante. De plus, les capteurs otolithiques (ce sont les récepteurs de l'oreille interne qui sont sensibles à la gravité et à l'accélération linéaire de la tête) ne distinguent pas entre une accélération linéaire et une inclinaison par rapport à la gravité. Il est donc nécessaire que d'autres informations soient prises en compte pour lever ces ambiguïtés perceptives.

Le système vestibulaire et la vision (ou tout au moins ceux des sous-systèmes visuels qui détectent le mouvement) coopèrent et sont complémentaires dans leurs propriétés dynamiques et géométriques. Le système visuel peut, lui, grâce à la mesure du flux optique, donner une mesure du mouvement de la tête par rapport à l'espace même lorsque celui-ci se fait à vitesse constante, et donc compléter la détection vestibulaire du mouvement de la tête. La « bande passante » (étendue de la zone de rapidité des mouvements qu'ils peuvent mesurer) n'est pas la même pour ces deux systèmes. Leur coopération permet donc de couvrir une gamme plus étendue de mouvements, depuis les plus rapides jusqu'aux plus lents.

La coopération entre capteurs n'est pas le seul aspect important. Le cerveau opère aussi des substitutions d'un capteur à un autre. A la suite de lésions des récepteurs (par exemple des lésions vestibulaires) ou lors de lésions centrales, ou encore lors de perturbations de l'environnement (c'est le cas lorsque l'homme effectue des vols spatiaux et que, comme la gravité est absente, une réinterprétation des messages sensoriels est indispensable). C'est ainsi que la vision joue un rôle fondamental dans la com-

Les capteurs sensoriels qui mesurent le mouvement coopèrent, ou plutôt le cerveau combine les informations capteurs, des différentes modalités (vision, système vestibulaire, proprioception...).

Il peut y avoir coopération mais aussi substitution entre les systèmes sensoriels. Il y a là un mécanisme important de la récupération après des lésions, ou de l'adaptation à des conditions extrêmes.

■ Alain Berthoz, directeur de recherche au CNRS, directeur du Laboratoire de physiologie neurosensorielle (LP 2 du CNRS) 15, rue de l'Ecole de Médecine, 75006 Paris.

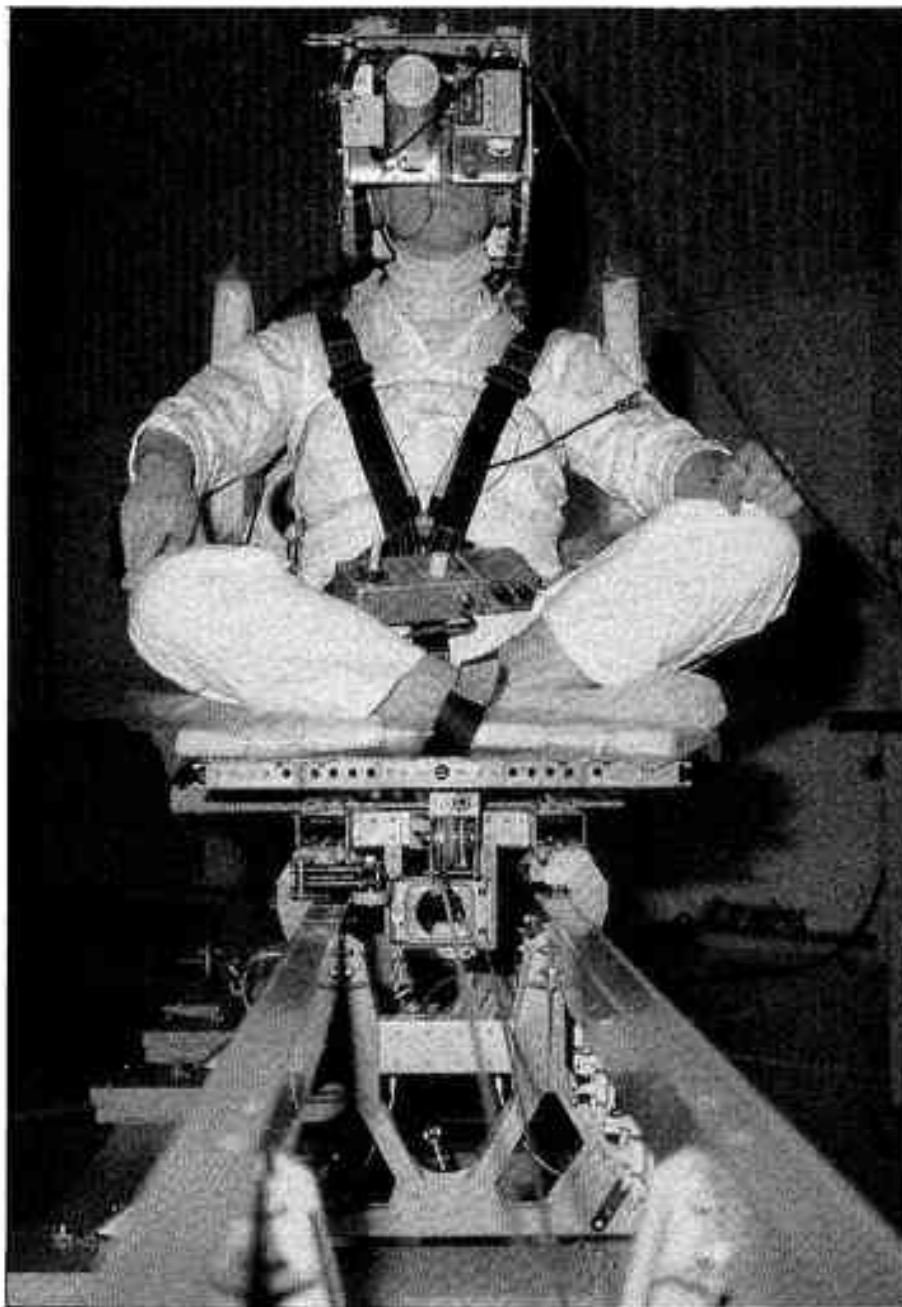


Fig. 1 - Dispositif expérimental destiné à l'étude des modifications adaptatives de la vision et du système vestibulaire dans l'espace. Le sujet est assis sur un siège qui peut être animé d'accélération linéaire, afin de stimuler les capteurs otolithiques du système vestibulaire dans l'oreille interne. Il porte un casque muni de divers appareils : un écran de télévision permettant la stimulation visuelle par le défilement de scènes en mouvement (stimulus optocinétique), une caméra digitale qui prend une image de l'œil et permet le calcul des différents paramètres des mouvements oculaires, et un ensemble de stimulations caloriques de l'oreille pour provoquer une stimulation des capteurs vestibulaires par cette technique utilisée couramment au sol en clinique ophtalmologique. Le sujet peut signaler la direction de son mouvement sur cette luge de l'espace grâce à un indicateur manuel. Au cours du vol de cet appareil, en novembre 1985, sur la navette spatiale américaine, on a pu mesurer les seuils de perception des accélérations linéaires, les mouvements oculaires induits par stimulation des otolithes et par des combinaisons de stimuli visuels et vestibulaires. La caméra a été construite par le LETI (division d'électronique, de technologie et d'instrumentation) du Commissariat à l'énergie atomique (CEA) en collaboration avec le Centre national d'étude spatiale (CNES) et le Laboratoire de physiologie neurosensorielle du CNRS. L'ensemble des expériences a été possible grâce à une coopération internationale menée avec le concours de l'Agence spatiale européenne (ESA) (cliché ESA).

compensation de déficits vestibulaires pour la récupération des fonctions de contrôle postural, d'équilibration et d'exploration visuelle.

Pour toutes ces raisons il s'est constitué depuis quelques années un champ nouveau d'étude basé sur l'analyse des interactions multimodales. Il est très intéressant de remarquer que dans les domaines des sciences de l'ingénieur, des problèmes semblables sont apparus, issus non pas de l'observation de la nature

mais des contraintes imposées par les technologies nouvelles. En robotique par exemple, ou dans les méthodes de télémanipulation, lorsqu'on a cherché à réaliser des robots mobiles (qui assurent la vision par ordinateur, ou diverses tâches de manipulation automatique à distance comme dans les centrales nucléaires ou la capture d'objets dangereux) on a dû aussi les équiper d'une grande variété de capteurs qui détectent leur position et leurs mouve-

Ces combinaisons ne s'effectuent pas seulement suivant des lois simples comme dans des systèmes asservis. Des facteurs intentionnels (le regard, l'attention sélective...) modifient ou contrôlent les mécanismes automatiques de coopération des systèmes sensoriels.

Les contraintes biomécaniques sont incluses dans les processus neuronaux de représentation de l'espace.

L'utilisation des sens est intermittente au cours d'un mouvement. Elle correspond à un choix préalable par le cerveau qui peut simuler un mouvement sur des cartes internes sans l'exécuter.

ments dans l'espace. La compréhension des mécanismes grâce auxquels ces informations sont intégrées (appelées « fusion de capteurs » par nos collègues spécialisés en intelligence artificielle) pour obtenir une représentation cohérente du mouvement du corps apparaît donc à la fois dans l'étude des machines naturelles et artificielles.

Le caractère original de l'étude moderne de ces interactions multimodales est qu'elle doit prendre en compte le fait que le cerveau ne se contente pas de réaliser des combinaisons d'informations sensorielles comme le propose la théorie cybernétique des « systèmes asservis ». Prenons comme exemple une fonction particulière de la vision que nous avons appelée la « vection » : c'est la détection du mouvement propre du corps induite par le déplacement d'une scène visuelle. Cette sensation, étudiée pour la première fois par le physicien Ernst Mach au début de ce siècle, peut être ressentie particulièrement sous forme d'illusions de mouvement dans un train immobile, lorsque le train voisin démarre, ou sur un pont, en regardant couler le fleuve, ou encore lorsque l'on regarde défiler un ciel nuageux. Elle est liée à la vitesse de défilement de la scène (fréquence temporelle), mais aussi au nombre d'éléments par unité de surface (fréquence spatiale), à sa surface, à son excentricité dans le champ visuel et à la place de cette scène dans l'environnement. C'est le « fond », ou dernier plan qui détermine le sens de la vection (voir l'article de Claude Bonnet).

Les voies neuronales responsables de cette fonction tachymétrique de la vision forment, pour l'essentiel, le système optique appelé « accessoire » (parce que l'on ne comprenait pas sa fonction lorsqu'il a été décrit par les anatomistes). Ce système transmet des messages concernant la vitesse du défilement rétinien, il est relativement indépendant de l'acuité avec laquelle sont perçues les scènes. Les messages ainsi constitués sont ensuite transmis et combinés avec ceux du système vestibulaire et ils déterminent une modulation de la décharge de certains neurones dans le tronc cérébral qui reproduisent fidèlement les mouvements de la tête. Cette coopération est possible grâce à la complémentarité dynamique de la vision et du système vestibulaire.

La théorie des systèmes asservis permet de prédire les règles de cette combinaison et les facteurs qui influencent la perception de mouvement propre (elle-même élaborée au niveau cortical par l'action ascendante des structures sous-corticales).

Mais une étude détaillée de l'activité neuronale dans les structures où sont combinées les informations vestibulaire, visuelle, proprioceptive, etc., et qui reconstruisent le mouvement de la tête dans l'espace a révélé que tous les neurones recevant une influence des capteurs sensoriels (neurones primaires) sont influencés par la direction du regard. Ceci veut dire qu'il y a un contrôle centrifuge qui s'exerce depuis les centres qui construisent l'« intention » de regarder ou de diriger son attention sur une portion de l'espace, vers les premiers relais sensoriels. L'attention sélective qui reflète l'activité cérébrale d'orientation influence donc profondément le traitement des informations sensorielles (il en est d'ailleurs de même de certaines fonctions motrices qualifiées d'automatiques : par exemple les réflexes de redressement de la tête qui sont aussi sous le contrôle étroit des mécanismes de l'orientation du regard).

L'étude de la contribution des capteurs sensoriels à la perception de l'espace doit donc tenir compte de ces mécanismes intentionnels.

Nous allons voir maintenant qu'elle doit aussi intégrer l'étude des mouvements eux-mêmes.

La représentation interne de l'espace tient compte des propriétés des systèmes moteurs

Une des raisons fondamentales, si ce n'est la raison, pour laquelle s'est développée une représentation de l'espace, est la nécessité de capturer des proies ou d'échapper à des prédateurs. Les théories les plus récentes sur la perception de l'espace semblent souvent oublier cette contrainte essentielle, et elles se contentent de chercher des transformations des signaux sensoriels qui permettent une extraction progressive des propriétés du monde extérieur. Comme l'ont proposé depuis longtemps les théoriciens soviétiques et en particulier Bernstein, il faut que le système nerveux ait internalisé les propriétés des organes moteurs. Le problème est donc de donner à cette formulation, pour le moins floue, une base neurobiologique.

Trois exemples illustreront les observations à partir desquelles une théorie plausible de la perception et de ses relations avec l'action peut être patiemment élaborée : le caractère discontinu et présélectif de la prise d'information sensorielle, le problème des systèmes de coordonnées et les opérations successives qui permettent une réaction d'orientation vers une cible et la question des algorithmes de contrôle d'un mouvement.

Caractère discontinu et présélectif de la prise d'information sensorielle. Il est maintenant bien établi que, pour coordonner les mouvements, le cerveau n'utilise pas les informations sensorielles de façon continue. Ici encore les modèles cybernétiques (représentation vectorielle, systèmes de contrôle asservis, non prédictifs, etc.) ne s'appliquent pas. Il semble que, dans bien des cas (comme par exemple chez le skieur de compétition qui est entraîné à suivre l'image mentale de sa course sur la piste de ski) le traitement en continu des informations sensorielles serait beaucoup trop lent. Il y a donc probablement des représentations mentales du mouvement du corps dans l'espace, des réseaux neuronaux grâce auxquels les mouvements du corps peuvent être simulés sans être exécutés.

Il semble que les informations des sens ne soient utilisées que pour valider ou corriger de façon intermittente ces représentations. La prise d'information par tel ou tel capteur serait prévue dans le programme central correspondant à un mouvement automatique ou à un mouvement appris. Ceci conduit à une théorie de la présélection ou de la présélection des informations sensorielles.

Si ces théories sont vraies, elles supposent que la représentation de l'espace et du corps dans les réseaux de neurones centraux se fait suivant des règles ou des mécanismes qui ne correspondent pas nécessairement à la géométrie euclidienne classique. Peut-être faut-il chercher des relations de type topologique, par exemple. Il y a là un champ d'étude encore très ouvert qui devrait passionner des chercheurs qui souhaitent travailler aux frontières des mathématiques, de la psychologie cognitive et de la neurobiologie.

Les systèmes de coordonnées cérébrales sont multiples. La représentation de l'espace et l'accomplissement des gestes supposent une coordination ou plutôt une mise en correspondance des systèmes de coordonnées dans lesquels travaillent les différents éléments des

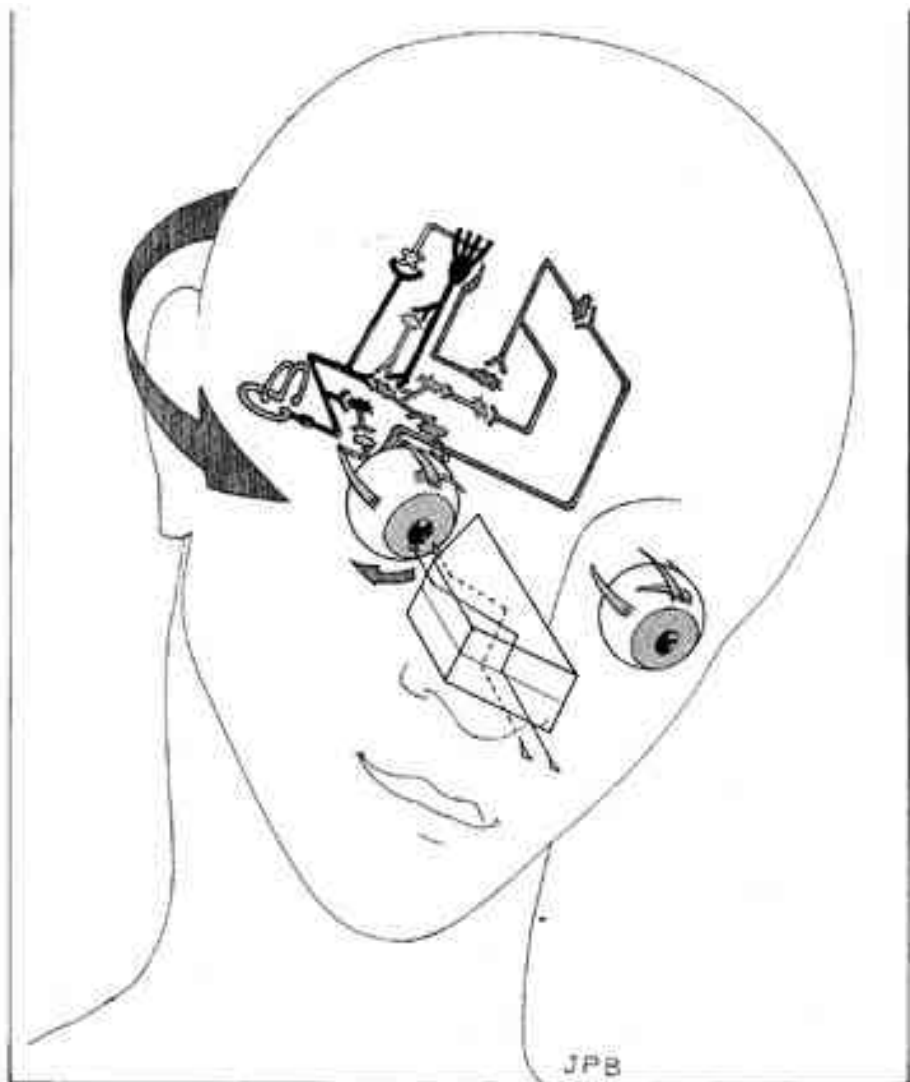


Fig. 2 - Un exemple de coopération entre deux systèmes sensoriels : pendant un mouvement de rotation de la tête (indiqué par la grande flèche), les canaux semi-circulaires de l'appareil vestibulaire sont stimulés et enregistrent l'accélération angulaire de la tête. Un réseau de neurones (dont seulement quelques éléments sont montrés sur cette figure) transmet cette activité aux muscles des yeux et induit un mouvement oculaire en sens contraire des mouvements de la tête. Ce réflexe vestibulo-oculaire permet de stabiliser l'image du monde visuel sur la rétine. Les images transmises par la rétine servent aussi à activer le même réseau de neurones. C'est la combinaison des messages vestibulaires et visuels qui permet au cerveau de reconstituer de façon fidèle les mouvements de la tête. La figure illustre le cas où l'on dispose un prisme devant l'œil du sujet. Ce prisme inverse le mouvement apparent des images. Dans ces conditions, il faut réorganiser le fonctionnement de la coopération visuo-vestibulaire car il y a conflit. Plusieurs hypothèses sont actuellement avancées pour expliquer par quels mécanismes adaptatifs le cerveau effectue cette réorganisation. On envisage, par exemple, qu'une modification des mécanismes synaptiques au niveau des cellules de Purkinje du cervelet est le facteur déterminant de l'adaptation. Toutefois, le cerveau choisit d'abord de remplacer les réflexes déficients ou perturbés par d'autres modules ou sous-systèmes qui contrôlent les mouvements des yeux (par exemple des saccades ou d'autres réflexes à départ proprioceptifs). Ces mécanismes sont donc très intéressants à étudier parce qu'ils représentent un modèle exemplaire des relations entre mécanismes élémentaires (au niveau cellulaire) et mécanismes intégrés (faisant intervenir des processus complexes aux frontières des processus cognitifs). D'après Berthoz (A.), Melvill Jones (G.), *Adaptive mechanisms in Gaze control*, Amsterdam, Elsevier, 1985, vol. 1.

Un problème fondamental et difficile : dans quels systèmes de coordonnées l'espace est-il représenté ?

systèmes sensorimoteurs. Ces systèmes de coordonnées naturels sont très divers suivant qu'il s'agit des capteurs, des réseaux centraux ou des effecteurs : les capteurs sensoriels, par exemple les capteurs vestibulaires, constituent un trièdre trirectangle cartésien, la rétine forme une carte bidimensionnelle et les récepteurs articulaires des détecteurs d'angles dans un seul plan, etc. Les coordonnées sont, dans tous ces cas, du type covariantes. Les centres cérébraux sont souvent constitués de couches superposées de neurones interconnectés constituant ce que l'on nomme des cartes cérébrales, surtout lorsqu'elles sont organisées en « topes », liées à l'espace extérieur (rétinotopie) ou à l'espace corporel (somatotopie). Cette organisation topographique (ou topique) des projections visuelles, tactiles, auditives, etc., est bien décrite. Mais on n'a pas encore réussi à comprendre vraiment la nature des

opérations qui se déroulent dans ces centres. Le travail sur préparations anesthésiées et le fait que l'on ne peut enregistrer que l'activité d'un seul neurone à la fois ont été des facteurs limitants. Mais en réalité ce problème n'a peut-être pas été étudié avec la bonne perspective. Le concept implicite de beaucoup de recherches était celui d'une addition algébrique des activations produites par chacune des modalités sensorielles, les effecteurs, c'est-à-dire les muscles et les segments qu'ils activent. Les coordonnées sont, dans ce cas, du type contravariantes, c'est-à-dire que les projections des forces exercées par les muscles obéissent à la règle du parallélogramme, alors que pour les récepteurs les projections sont orthogonales.

Le point de vue traditionnel ou implicite est que le système nerveux travaille en coordonnées cartésiennes, dans des axes de coordonnées de référence situés dans des plans horizon-

L'étude des mécanismes neuronaux des réactions d'orientation révèle qu'il se produit des transformations de coordonnées. Il est relativement aisé de décrire les cadres de référence pour les sens et les membres ou les yeux, mais il faut maintenant comprendre les systèmes de coordonnées qu'utilise le cerveau.

Une façon intéressante d'obtenir des données expérimentales sur ces questions est aussi l'étude des gestes. Elle démontre par exemple que les mouvements de l'écriture sont constitués de morceaux successifs. Pour chacun de ces segments curvilignes, la vitesse de la trajectoire est constante. Les mouvements tridimensionnels peuvent aussi être décomposés. On peut en inférer des algorithmes possibles par lesquels le cerveau représente un mouvement.

taux, frontaux ou sagittaux. Il n'y a aucune raison de suivre cette hypothèse dans tous les cas. Il semble au contraire probable que des transformations de coordonnées sont nécessaires et l'on a récemment proposé plusieurs approches théoriques de cette question fondamentale. La théorie des tenseurs est un des outils utiles pour décrire ces processus, mais ce n'est pas le seul et ici encore il est intéressant de noter que les roboticiens ont eu à résoudre ces problèmes. Il serait intéressant de confronter les points de vue des neurophysiologistes et des spécialistes de robotique sur ce point.

Un exemple remarquable est celui d'une structure cérébrale qui traite les informations visuelles (le colliculus supérieur) et qui est impliquée dans les réactions d'orientation. La modification de l'environnement acoustique se traduit par une véritable réorganisation des cartes visuelles. L'interaction multimodale est ici encore d'une nature beaucoup plus riche qu'une simple addition. D'autant plus que les neurones qui constituent ces cartes sont eux-mêmes susceptibles d'être activés de façon sélective par des facteurs liés à l'attention. Par exemple, sur le colliculus s'exerce en permanence une action inhibitrice d'un noyau : la substance noire. La levée de cette inhibition permet une activation sélective, à des moments précis, de groupes de neurones appartenant au système tecto-réticulo-spinal, dont les effets entraînent une déviation du regard (saccade) vers une direction précise de l'espace. Si, en même temps que se produit cette facilitation sur la carte colliculaire, une cible apparaît dans l'espace visuel, une saccade sera donc déclenchée.

L'étude de ces mécanismes doit pouvoir nous permettre d'élucider les fondements de l'attention sélective : un des grands problèmes des sciences de la perception et de l'action. On sait maintenant que la sélection des zones de l'espace qui seront ainsi choisies par ce balayage ou ce projecteur interne se fait par une coopération entre des zones très précises du cortex cérébral (cortex frontal, préfrontal, aire motrice supplémentaire, zone 7a du cortex pariétal postérieur, etc.) qui ont chacune un rôle particulier dans l'élaboration d'une représentation de la position, du mouvement et des relations des objets et du corps.

De façon plus générale, les propriétés de profondeur, texture, forme, mouvement, brillance sont sans doute extraites par étapes dans des réseaux corticaux interconnectés. L'invariance perceptive est obtenue par des changements de cadres de référence comme par exemple : rétino-topique (projection directe de la rétine), craniotopique (coordonnées relatives à la tête) ou spatio-topiques (relatives à l'espace), allocentriques, etc. Chaque passage d'un cadre de référence interne à un autre suppose la prise en compte d'informations particulières. Par exemple, pour passer d'un cadre rétino-topique à un cadre craniotopique, il faut tenir compte des mouvements des yeux. Pour passer à une représentation stable par rapport à l'espace environnant, il faut que des réseaux neuronaux calculent la position de la tête à partir des informations de vitesse et d'accélération données par les capteurs vestibulaires.

Cette nouvelle façon de poser le problème de la représentation de l'espace dans le cerveau conduit à formuler des hypothèses claires et testables sur le rôle fonctionnel joué par les différents signaux nerveux, qu'ils proviennent des sens ou qu'ils soient des copies des signaux de commande moteurs. Les troubles de ces processus peuvent conduire à de graves effets pathologiques dus à des désorientations, à des difficultés de distinguer ce qui est relatif au corps ou à l'environnement.

Les algorithmes de contrôle du mouvement. Une autre façon d'aborder le problème de l'espace est de chercher quelles sont les règles qui sous-tendent le contrôle des gestes. Ici aussi il est clair que l'accomplissement d'un geste ou le contrôle de la posture ne sont pas réalisés par un enchaînement de réflexes.

Un exemple de découverte récente à ce sujet montre que l'étude des mouvements est susceptible de fournir des hypothèses très intéressantes. On sait maintenant que des mouvements de la main comme ceux qui sont réalisés au cours de l'écriture ne sont continus qu'en apparence : la vitesse tangentielle le long de la trajectoire est composée de segments discrets pour lesquels la vitesse est constante.

Cette propriété est vraie, semble-t-il, pour tous les mouvements de ce type. Il y a une relation entre la trajectoire (les propriétés spatiales) et la cinématique (les propriétés dynamiques du mouvement). Donc, un mouvement peut être représenté dans le cerveau par une simple liste de valeurs qui détermineront les vitesses successives comme une mélodie peut être représentée par une succession de notes. Ceci permet de réaliser ce mouvement avec n'importe quel effecteur (la main, le pied, etc.), quelles que soient ses propriétés mécaniques.

Ces résultats ont été récemment généralisés au cas de mouvements tridimensionnels. Il semble qu'un mouvement complexe du doigt, comme par exemple de décrire un 8 dans l'espace, soit réalisé par une succession de mouvements plans. De plus, il semble que les paramètres contrôlés par les algorithmes cérébraux soient les angles de segments de membres repérés par rapport à l'espace et non pas de façon relative, les uns par rapport aux autres.

L'analyse des mouvements complexes que permettent maintenant les méthodes d'imagerie devrait donc aussi compléter les données empiriques qui permettront de formuler des théories sur le traitement cérébral de l'espace en relation avec le mouvement.

Ainsi on peut espérer comprendre, dans les années à venir, les mécanismes cérébraux de la perception de l'espace et de la façon dont ils contribuent au contrôle du mouvement, à l'équilibration et de façon plus générale à l'action. Toutefois, ceci demandera une coopération intense d'approches jusqu'ici distinctes. L'étude des réseaux neuronaux qui sous-tendent ces mécanismes exigera la description combinée de la physiologie et de la morphologie des neurones par des méthodes d'injection intracellulaire chez l'animal éveillé comme nous le pratiquons dans notre laboratoire. Elle demandera aussi des études d'activité neuronale chez des animaux capables d'effectuer des tâches complexes de mémorisation, de sélection et de décision.

Elle exigera des modèles de réseaux neuronaux qui intègrent l'extraordinaire flexibilité fonctionnelle des réseaux et les mécanismes nouvellement découverts de contrôle neurochimique des propriétés des neurones impliqués dans ces processus. Ces mécanismes de modulation des propriétés synaptiques jouent sans doute un rôle décisif dans les propriétés adaptatives qui permettent au cerveau de modifier son fonctionnement lorsque les signaux sensoriels sont incongruents, les centres lésés ou les effecteurs perturbés.

Enfin, il sera nécessaire de trouver de nouvelles idées d'utilisation des mathématiques en neurobiologie théorique et de rassembler dans des formalismes accessibles à la simulation informatique, la merveilleuse complexité de ces fonctions.

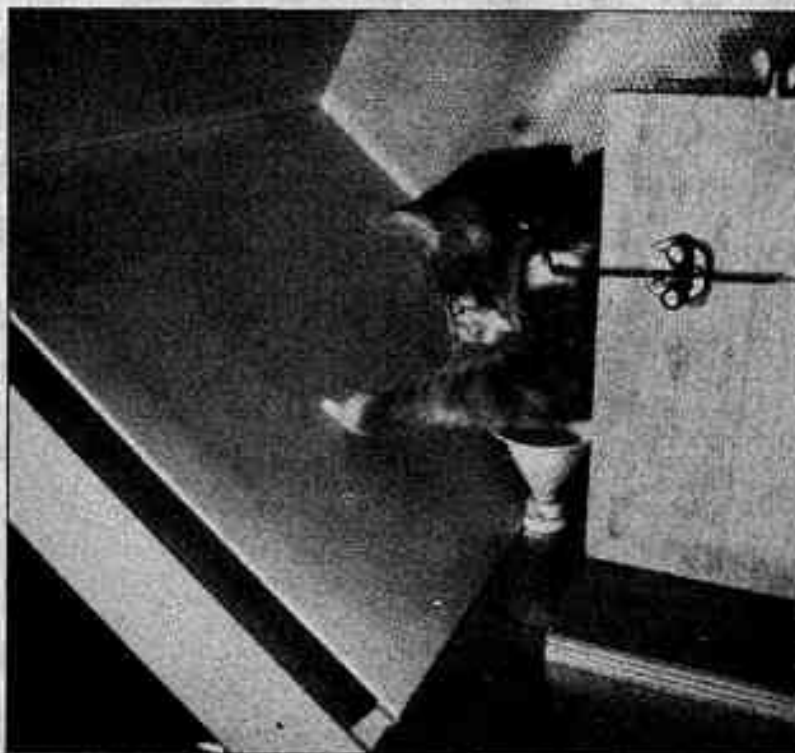
Le noyau ventro-latéral du thalamus et l'acquisition motrice

Michèle FABRE-THORPE

Au nombre des structures cérébrales qui participent à la préparation et à l'élaboration de l'acte moteur intentionnel, nul doute que le noyau ventro-latéral du thalamus (VL) occupe une position particulièrement stratégique. Site de convergence de messages en provenance de structures liées à la motricité (cervelet, ganglion de la base, noyau rouge) (1) et d'informations sensorielles variées, sa réactivité est liée à l'exécution de mouvements volontaires. De plus, il se projette massivement et de façon organisée sur le cortex moteur (2). On pouvait donc s'attendre à ce que des analyses comportementales mettent en évidence des déficits de la préparation ou de l'exécution du mouvement volontaire après destruction d'une telle structure.

A cet égard, les résultats sont curieusement peu convaincants. Tous les auteurs (3, 4) s'accordent sur le caractère limité et transitoire des déficits moteurs occasionnés par cette lésion. Chez le chat, une séquence sensori-motrice de type « signal sonore, retrait de la patte » est à peine perturbée par la destruction du VL, seul un léger retard du déclenchement du mouvement est observé (4).

Comment comprendre ce contraste : un noyau en position stratégique mais dont la destruction est apparemment sans effet sur le mouvement ? Il nous est apparu que le rôle du VL avait toujours été exploré dans l'exécution de gestes appris. Les animaux avaient donc largement dépassé la phase complexe qu'est l'acquisition de la performance motrice. Le rôle du VL ne serait-il pas primordial au cours de cette période-clé ? La réponse est positive, ainsi lorsqu'une lésion du VL est pratiquée sur un chat « naïf »*, l'apprentissage ultérieur d'une tâche motrice telle que l'appui sur une cible mobile est perturbé (5). Le chat lésé reste significativement moins précis et moins rapide qu'un témoin. Plus complexes sont les observations récentes obtenues à l'aide du dispositif illustré. Certaines lésions cérébrales comme celle du noyau latéral postérieur du thalamus -LP- induisent un déficit important mais temporaire du mouvement : l'animal est capable d'apprendre à compenser totalement ses déficits. Ne pourrait-on pas imaginer que ces processus de ré-acquisition soient étroitement gérés par le VL, lequel



Dispositif de pointage sur cible mobile : pour être récompensé, le chat doit apprendre à atteindre le « spoon-cible » qui apparaît et se déplace au hasard sur l'écran incliné devant lui.

deviendrait une fois encore le noyau de l'apprentissage ou du réapprentissage gestuel ?

C'est effectivement ce que nous avons pu constater (6), si la lésion du LP est associée à celle du VL, les perturbations du geste (précision détériorée, retard du déclenchement du geste) perdent leur caractère transitoire : l'animal est devenu incapable de compenser totalement ses déficits. De plus, sa mémoire motrice est perturbée : une interruption de son entraînement postopératoire provoque la réapparition du déficit de précision dans toute sa sévérité initiale.

En somme, le VL appartiendrait à un circuit cérébral indispensable à l'acquisition motrice et à l'établissement des programmes moteurs. Ce circuit cesserait d'être nécessaire dès que, l'apprentissage étant achevé, la performance gestuelle pourrait se dérouler comme un acte de routine.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) August (P.), The ascending projections of the nucleus interpositus posterior of the cat cerebellum : an experimental anatomical study using silver impregnation methods. *Brain Res.*, 1970, 24, 377-394.
- (2) Riquel-Padel (L.), Massieu (J.), Grungetto (A.), Relations between the ventro-lateral nucleus and the motor cortex and their possible role in the central organization of motor control. *Brain Res.*, 1973, 60, 1-20.
- (3) Moll (L.), Kuypers (H.G.J.M.), Role of premotor cortical areas and VL nucleus in visual guidance of relatively independent hand and finger movement in monkey. *Exp. Brain Res.*, 1975, suppl. 142.
- (4) Benita (M.), Condi (H.), Dormont (J.-F.), Schmitt (A.), Effects of ventro-lateral cooling on initiation of forelimb ballistic flexion movements by conditioned cats. *Exp. Brain Res.*, 1979, 34, 435-452.
- (5) Fabre (M.), Buser (P.), Structures involved in acquisition and performance of visually-guided movements in the cat. *Acta Neurobiol. Exp.*, 1980, 40, 95-115.
- (6) Levesque (F.), Fabre-Thorpe (M.), Carayon (R.), Buser (P.), Recovery of visuomotor performance after brain lesion in the cat : role of the ventrolateral thalamic nucleus. *Neurosci. Lett.*, 1986, suppl. 26, S85.

* Michèle Fabre-Thorpe, chargée de recherche au CNRS, Institut des neurosciences (UA 1199 CNRS), université de Paris VI, 9, quai Saint-Bernard, 75230 Paris Cedex 05.

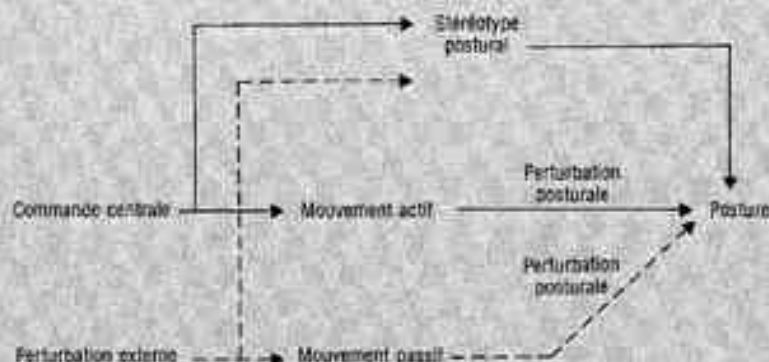
* Animal n'ayant jamais été soumis à une expérience.

Mouvement et posture : antagonisme et coopération

Jean MASSION



a



b

En a, un exemple de coordination entre posture et mouvement illustré par Babinski. Les mouvements du tronc sont accompagnés de déplacements associés de la hanche et des genoux qui ont pour finalité de réduire le déplacement du centre de gravité par rapport au sol. En b, le schéma général des commandes anticipatrices est représenté à droite. La commande du mouvement est accompagnée d'une commande d'un stéréotype postural qui corrige à l'avance la perturbation posturale causée par le mouvement lui-même. Le même stéréotype postural peut être mis en jeu à partir des différences liées à une perturbation externe.

L'organisation par le système nerveux central d'un mouvement ne se limite pas à la commande stricte des muscles qui vont définir ses paramètres, mais elle prévoit également le contrôle des conséquences de l'action, comme par exemple celui du flux sensoriel lié à l'exécution de l'acte moteur, ou encore l'effet mécanique de cet acte sur d'autres segments corporels ou sur l'équilibre du corps. Cette commande parallèle qui agit sur les conséquences de l'action est une commande anticipatrice puisqu'elle prévoit à l'avance le résultat de l'action pour en modifier les effets, et pour optimiser l'ensemble de la performance motrice. Un des exemples d'action anticipatrice que nous allons commenter ici est celle qui assure la coordination entre mouvement et posture.

Il faut d'abord rappeler que posture et mouvement ont des finalités opposées, même si tous deux peuvent résulter d'un acte volontaire et intentionnel. La posture définit la position d'un ou de plusieurs segments ou de l'ensemble du corps. Elle résulte de la fixation par le système nerveux d'une référence (squelette ou muscle pour la position d'un segment ou position du centre de gravité par rapport au sol, pour la posture de l'ensemble du corps) et de l'utilisation de circuits d'assistance à base de détec-

teurs d'erreurs dont la finalité est de stabiliser la position. À l'opposé, le mouvement définit, au travers d'une trajectoire, une cible ou un but qui correspond en réalité à une nouvelle position.

Si nous considérons la posture dans son ensemble, elle peut être perturbée par une cause externe : poussée sur une partie du corps, instabilité du sol... Elle peut être aussi déstabilisée par le mouvement lui-même. En effet, le corps est un objet déformable et le mouvement en modifie la géométrie, ce qui peut être cause de déséquilibre. Par ailleurs, sur le plan dynamique, les forces à l'origine du déplacement d'un segment corporel entraînent une réaction d'égale intensité et de direction opposée sur le reste du corps, et par là une perturbation posturale.

L'expérimentation réalisée chez l'animal et chez l'homme montre que la commande nerveuse du mouvement volontaire est accompagnée de celle d'un ajustement de la posture dans tous les cas où le mouvement volontaire est susceptible de perturber la posture ou l'équilibre. L'ajustement postural précède l'action perturbatrice du mouvement. Il s'agit d'une commande tout à fait classique en boucle ouverte, qui a pour finalité de réduire par anticipation l'effet perturbateur du mouvement sur la posture et par conséquent d'en minimiser les effets. Cette commande anticipatrice de l'ajustement postural résulte généralement d'un apprentissage ancien qui s'est manifesté lors de l'enfance, à la suite d'une confrontation journalière avec les conséquences des diverses activités motrices.

Pour exercer cette action anticipatrice, le système nerveux disposerait de trois éléments : 1. Un répertoire de stéréotypes posturaux précisés utilisé également pour les corrections posturales. Ce répertoire paraît localisé au niveau bulbo-spinal. 2. Une copie interne de la commande du mouvement destinée à la commande de l'ajustement postural. Cette copie interne s'effectue à un niveau sous-cortical, probablement bulbo-spinal. 3. Une commande de porte réglant l'accès au répertoire de stéréotypes posturaux. Cette commande dépendrait principalement des ganglions de la base et de l'aire motrice supplémentaire.

En conclusion, la coordination entre posture et mouvement illustre une des propriétés du système nerveux qui est de ne pas se contenter de commander l'action, mais d'organiser en parallèle une commande anticipatrice qui tient compte des conséquences prévisibles de cette action en vue d'en minimiser les effets.

BIBLIOGRAPHIE

- Beckwith (M.B.), Feldman (A.G.), Fukuoka (O.), Adaptability of innate motor patterns and motor control mechanisms, *Behav. Brain Sci.*, 1985, 8, 638.
- Massion J., Postural changes accompanying voluntary movements. Normal and pathological aspects. *Human Neurobiol.*, 1984, 3, 261-267.
- Roberts (T.D.), Neurophysiology of postural mechanisms, Butterworth, 1978, London, 2nd Ed.

■ Jean Massion, directeur de recherche au CNRS, directeur du Laboratoire des neurosciences fonctionnelles (LP 28 du CNRS), 11, chemin Joseph Aiguier, BP 71, 13402 Marseille Cedex 9.

Attention et mouvement

Les méthodologies et techniques nouvelles permettent la progression rapide des recherches sur l'attention.

Jean-Marie COQUERY



© Photo Steve Porell. All Sport Agency - Vandyval

Un thème de recherche centenaire renouvelé par les approches conjointes de la psychologie expérimentale, de la neurophysiologie et de la neuropsychologie.

L'attention, un système de contrôle unitaire influencé par la vigilance mais qui ne s'y réduit pas.

Des multiples stimulations qui frappent les organes des sens et qui appellent une réponse, seules quelques-unes sont retenues pour une analyse approfondie. Et dans le répertoire des activités possibles, seules quelques-unes sont organisées et exécutées à un moment donné. Ce caractère sélectif des conduites perceptives et motrices est communément désigné sous le nom d'attention. La définition de ce terme est loin de faire l'unanimité des chercheurs mais les travaux récents en ce domaine peuvent être classés selon quelques axes majeurs : attention intensive ou sélective, perceptive ou motrice, volontaire ou automatique.

Ces différents aspects de l'attention étaient déjà soulignés dès la fin du siècle dernier. Mais le puissant courant de recherches que l'attention suscite à nouveau depuis une vingtaine d'années est dû pour une large part à l'apparition de méthodologies ou de techniques nouvelles visant à décomposer les comportements attentifs en opérations mentales élémentaires, selon des modèles inspirés de l'informatique et

en relation avec l'activité du système nerveux. Ainsi, la très ancienne technique du « temps de réaction » qui consiste à mesurer la latence d'une réponse motrice à la présentation d'un stimulus impératif, continue de faire l'objet d'un usage intensif comme élément d'une « chronométrie mentale » (1) analysant les opérations élémentaires du traitement de l'information, leur organisation et leur durée. Parmi les techniques qui relèvent de la neurophysiologie il faut mentionner le recours généralisé à l'enregistrement de cellules nerveuses identifiées, chez l'animal soumis à des tâches voisines de celles qu'il est possible de faire exécuter à un sujet humain. Chez l'homme l'activité du système nerveux est principalement explorée par l'enregistrement des potentiels évoqués corticaux. Il s'agit d'ondes recueillies sur le cuir chevelu en réponse à la présentation d'un stimulus et dont les différentes composantes reflètent d'une part les caractéristiques physiques du stimulus, d'autre part les processus cognitifs mis en jeu. Enfin, l'étude de l'attention a bénéficié des recherches de neuropsychologie, réalisées chez des sujets atteints de lésions cérébrales ou ayant subi une section chirurgicale des connexions qui unissent les deux hémisphères cérébraux.

Attention et vigilance

Quel bilan tirer de l'ensemble de ces recherches? Un premier aspect concerne les relations de l'attention avec les mécanismes de la vigilance. Après la découverte en 1949 du rôle des formations rétículo-corticales du tronc cérébral dans la régulation des états vigiles, l'attention est regardée comme un niveau de vigilance élevé où les processus perceptifs, moteurs et les comportements complexes se trouvent améliorés : de fait, la stimulation électrique de ces ensembles neuroniques de la base du cerveau accroît les capacités de détecter des stimuli visuels ou accélère les réponses motrices. Les théories mettant l'accent sur les relations entre attention et vigilance privilégient les aspects de régulation intensive des comportements et l'on peut leur rattacher le courant expérimental qui explique la sélectivité de l'attention par la limitation des capacités de traitement de l'organisme. L'augmentation de vigilance accroît certes, modestement, les ressources disponibles mais celles-ci restent limitées et si on les répartit entre plusieurs tâches, l'efficacité dans chacune des tâches baisse en proportion de ce qui est alloué aux autres. L'attention peut être considérée comme le système répartiteur de ces ressources. L'étude de sujets ayant subi une section des commissures interhémisphériques (fibres qui relient les deux hémisphères de l'encéphale), montre qu'il s'agit d'un système unique et qui n'est pas localisé dans les hémisphères. Après section, les activités perceptives

■ Jean-Marie Coquery, professeur de psychophysiologie à l'université des sciences et techniques de Lille Flandres-Artois, Laboratoire de neurophysiologie et neurobiologie (UA 308 CNRS), bâtiment SN 4, BP 16, 59655 Villeneuve-d'Ascq Cedex.

de chaque hémisphère deviennent indépendantes mais l'attention reste indivise et ses capacités ne sont pas doublées pour autant.

La focalisation de l'attention

Même si les comportements d'attention sont en interaction avec les niveaux de vigilance, ils ne s'y réduisent pas. De plus, on reconnaît aujourd'hui dans l'attention des opérations indépendantes et des niveaux de traitements distincts dont rien n'assure qu'ils sont affectés de la même façon par les variations de l'état vigile. Plus caractéristique de l'attention est sa sélectivité, qui se manifeste à l'égard de ce qu'il est convenu d'appeler des canaux, c'est-à-dire soit des systèmes neuroniques de transmission d'un message, soit, plus abstraitement, toute dimension permettant de décrire un ensemble de stimuli : position, hauteur tonale, couleur, intensité, signification, etc... Les signaux du canal sélectionné se voient conférer un avantage représenté par l'accélération des processus de détection ou de réponse, par une analyse plus complète, par l'accès à la conscience.

Les potentiels évoqués corticaux reflètent nettement cette orientation de l'attention. Citons entre beaucoup d'autres un travail de Desmedt et Robertson (2). Ces auteurs stimulent le majeur et l'index de chaque main avec des chocs électriques de faible intensité. Le majeur droit est désigné comme cible et les sujets doivent compter les chocs qui lui sont appliqués. Les potentiels évoqués par la stimulation de l'index et du majeur droits, tous deux situés du côté vers lequel porte l'attention, présentent des ondes précoces beaucoup plus amples que les potentiels évoqués par la stimulation de l'index et du majeur gauches. Une sélectivité spatiale plus étroite se révèle dans les composantes tardives des mêmes potentiels évoqués. La stimulation du majeur droit, et de lui seul, fait apparaître une onde spécifique, 400 millisecondes environ après le stimulus.

Les niveaux de sélection.

À quel niveau des voies nerveuses, moelle épinière, centres sous-corticaux, cortex cérébral, se fait la sélection des caractéristiques pertinentes d'un stimulus, celles vers lesquelles porte l'attention ? Lorsqu'on présente des stimuli visuels, tactiles et auditifs, en demandant au sujet de focaliser son attention sur une seule modalité, les territoires du cortex cérébral qui reçoivent les messages sensoriels vers lesquels est tournée l'attention, présentent un accroissement spécifique et marqué de leur irrigation sanguine. Toutefois, les territoires impliqués dans le décodage des modalités non pertinentes présentent eux aussi un modeste accroissement de leur métabolisme. Ceci peut indiquer que les messages non pertinents font l'objet d'un traitement au moins partiel au niveau cortical.

D'autres méthodes conduisent à la même conclusion : si l'on présente à un sujet des messages différents à chaque oreille en lui demandant de concentrer son attention sur une oreille, les mots du message non pertinent, bien que n'étant pas reconnus de façon consciente, sont capables d'influencer le sens dans lequel sont compris des mots ambigus présentés à l'oreille pertinente. Ils ont donc fait l'objet d'un début de traitement. Ces exemples n'excluent cependant pas la possibilité d'un filtrage plus précoce des messages non pertinents : l'étude des réflexes déclenchés par des messages auditifs ou cutanés indique qu'avant même le cortex, les premiers relais sensoriels peuvent être modulés par la direction de l'attention.

Une vision correcte du problème de la sélection précoce ou tardive des caractéristiques d'un stimulus est sans doute à chercher dans le fait que l'analyse d'un stimulus est hiérarchisée. Certains attributs tels que la position dans l'espace ou la modalité sensorielle d'entrée font l'objet d'une sélection précoce, les caractéristiques physiques ou sémantiques étant analysées ultérieurement.

La sélectivité, caractéristique fondamentale de l'attention, donne un avantage aux messages retenus et un handicap aux messages rejetés.

Les attributs d'un stimulus font l'objet d'une analyse hiérarchisée selon un mode de traitement principalement sériel.

Aspects cardiaques de la préparation à l'action chez l'insecte

Bernard THON

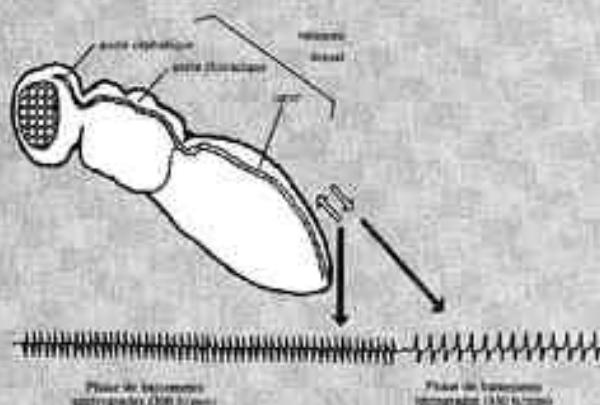


Schéma du cœur et exemple d'enregistrement des deux types de battements cardiaques chez la mouche *Calliphora*.

L'attention motrice

L'attention se déplace d'un point à un autre de la même façon que l'œil au cours d'une saccade.

La capacité de fixer l'attention va de pair avec celle de réduire les activités motrices.

Un dernier domaine particulièrement actif concerne les relations de l'attention et du mouvement. A vrai dire, ce n'est que depuis peu que convergent les cadres conceptuels, les modèles et les techniques d'étude de l'attention avec ceux de la préparation, de la programmation, de la commande ou de l'apprentissage des mouvements.

On peut reconnaître a posteriori un cadre théorique commun aux recherches reliant attention et vigilance et à celles qui montrent que la préparation d'un mouvement s'accompagne d'une facilitation diffuse de la réactivité motrice ou que certaines ondes lentes corticales apparaissent lors de l'attente d'un événement sont en partie identiques aux « potentiels de préparation » qui précèdent l'exécution d'un mouvement.

La recherche des opérations mentales élémentaires intervenant dans les changements de focalisation de l'attention a par ailleurs amené certains auteurs à attribuer à l'attention elle-même plusieurs caractéristiques du mouvement. Ainsi, dans le passage de l'attention d'une cible à une autre, Posner propose-t-il de reconnaître les étapes de détachement, de mouvement et de fixation. Plusieurs expériences réalisées au cours des dix dernières années laissent supposer que l'étape de mouvement se faisait à vitesse constante, à la manière du faisceau d'un phare éclairant successivement les positions intermédiaires entre départ et arrivée. En fait, l'attention se fixe sur une cible nouvelle en un temps qui correspond à la mise en place d'un nouveau programme moteur ; ses déplacements qui se font aussi bien en profondeur que selon les axes vertical et horizontal présentent toutes les caractéristiques de la programmation d'un mouvement oculaire. Encore s'agit-il d'un mouvement implicite car si les déplacements de l'attention visuelle s'accompagnent la plupart du temps de mouvements oculaires, on peut déplacer l'attention sans remuer les yeux. Certaines régions du cerveau, tel le cortex pariétal postérieur, pré-

sent d'ailleurs des activités liées aux déplacements de l'attention visuelle mais indépendantes des mouvements des yeux.

Le développement de l'attention

La capacité de supprimer les manifestations motrices explicites semble conditionner l'expression et sans doute aussi le développement de l'attention. Chez le chat, la destruction de régions localisées de la base du cerveau contrôlant l'immobilité attentive, entraîne une hyperactivité locomotrice et simultanément une disparition des manifestations électroencéphalographiques et comportementales de l'attention focalisée. Chez l'enfant les déficits d'attention s'accompagnent de façon constante d'hyperkinésie, tandis que le développement des capacités d'attention va de pair avec celui de l'inhibition motrice. On peut donc esquisser, en référence aux conceptions piagétienes du développement psychologique, que l'attention elle aussi se construit par intériorisation des actions. Les opérations intellectuelles élémentaires telles que la classification ou la comparaison de grandeurs se manifestent chez le tout jeune enfant par des comportements moteurs effectifs tels que regroupement ou superposition d'objets, comportements qui font progressivement place à des activités intériorisées portant sur les représentations. De même l'attention s'exprime initialement par des activités motrices extériorisées comme l'approche ou la saisie ; elle s'intérioriserait peu à peu, ne gardant des mouvements que l'organisation et les caractéristiques des programmes moteurs qui les gouvernent.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) Posner (M.I.), *Chronometric explorations of mind*, Erlbaum Assoc., 1978, 271 p.
- (2) Desmedt (J.E.) et Robertson (D.), « Differential enhancement of early and late components of the cerebral somatosensory evoked potentials during forced-paced cognitive tasks in man », *J. Physiol.*, London, 1977, 271, 761-782.

Tout animal ne peut se contenter, pour assurer sa survie, d'un simple suivi des variations de son environnement. Il lui faut, à chaque instant, déceler dans les stimulations sensorielles qu'il reçoit, des informations lui permettant de prédire le devenir probable de la situation, et ainsi, de se préparer, c'est-à-dire de réunir les conditions optimales pour exprimer les actions motrices qui se révéleront éventuellement nécessaires. Cette attitude anticipatrice se manifeste notamment sous la forme d'une réponse d'orientation qui, aussi bien chez les vertébrés que chez certains invertébrés (crustacés, insectes), présente des composantes comportementales directement observables et des composantes neurovégétatives, mettant en jeu, en particulier, le système cardiovasculaire.

Chez les insectes, le cœur est un tube ouvert aux deux extrémités, situé longitudinalement sous la paroi dorsale. Il est animé de contractions qui assurent une circulation de l'hémolymphe dans tout

le corps de l'animal. Chez les mouches (diptères) et certains papillons (lépidoptères), le cœur présente deux types de contractions : les unes se propagent de l'arrière vers l'avant du tube cardiaque (contractions antérogrades), tandis que les autres débutent à l'avant du cœur et se propagent vers l'arrière (contractions rétrogrades). Chez une mouche au repos, par exemple, on assiste à une alternance régulière de phases de battements antérogrades et de phases de battements rétrogrades. Une stimulation soudaine, même de faible intensité, s'accompagne d'un arrêt immédiat des battements antérogrades, qui précède généralement la réponse motrice éventuellement exprimée par l'animal. Cette inhibition des battements antérogrades peut être déclenchée par toute variation dans la situation environnante. On peut montrer que ces réponses cardiaques jouent un rôle fonctionnel dans la préparation à l'action : en effet, lorsqu'une stimulation visuelle est donnée pendant que le cœur est en phase de battements

antérogrades, le temps de latence de la réponse motrice est plus long ($TR = 0,90$ seconde) que lorsque l'animal est sollicité pendant une phase de battements rétrogrades ($TR = 0,73$ seconde). L'inhibition des battements antérogrades et la prédominance des battements rétrogrades lorsque l'animal est en état d'alerte permettra ainsi une mise en jeu plus rapide des réponses motrices, ce qui, dans de nombreuses situations, peut être un facteur essentiel de survie.

L'implication de mécanismes cardiovasculaires dans la préparation à l'action, démontrée pour la première fois chez un insecte, apparaît ainsi comme un phénomène très répandu — sinon universel — dans le règne animal, malgré les diversités de formes et de fonctions du système circulatoire et de l'organe cardiaque.

■ Bernard Thon, chargé de recherche au CNRS, Centre de recherche en biologie du comportement (UA 664 CNRS), université Paul Sabatier, 31062 Toulouse Cedex.

Art de la molécule et chimie bien tempérée...

Jean-Marie Lehn, Prix Nobel de Chimie 1987

Maryvonne TISSIER

Il y a du Jean-Sébastien Bach chez Jean-Marie Lehn. N'évoquons pas la passion que toute sa famille et lui-même manifestent pour la musique, les orgues et le Maître allemand : discrétion oblige ! Saluons la créativité de ce scientifique qui, à l'instar de celle du musicien, a contribué au renouvellement de son art.

LA CHIMIE, DISCIPLINE ARTISTIQUE

La chimie, discipline artistique ? Bien sûr. D'une manière trop restrictive, la science chimique est souvent perçue et évaluée par le biais de ses apports aux autres disciplines et de ses nombreuses applications économiques et industrielles. Les travaux de Jean-Marie Lehn illustrent parfaitement quels défis purement intellectuels le chimiste relève et par quels chemins buissonniers originaux il invente.

Au début des années 60, Jean-Marie Lehn participe, au cours d'un stage post-doctoral, à la synthèse de la vitamine B₁₂ réalisée par le Prix Nobel américain R.B. Woodward : jeu superbe qui montre la puissance de la chimie et sa capacité de reconstruire, par ses propres méthodes, les architectures moléculaires complexes des organismes vivants.

Quand il aborde la troublante Enigme de la reconnaissance des molécules entre elles — une des bases du fonctionnement du vivant —, il va, avec une logique de chimiste, reposer le problème et créer de nouveaux objets, entièrement artificiels, dont la sélectivité et la complexité finiront par rejoindre, et même dépasser, celles des composés biologiques. Ainsi naît la chimie supramoléculaire, art des molécules que leur architecture conçue *vor mesure* rend capable de piéger, d'une manière univoque, une ou plusieurs espèces chimiques-cibles (ions, atomes, molécules) pour les séparer d'un mélange, les faire réagir, les transporter d'un milieu à l'autre.

On pressent la multitude d'applications potentielles : catalyse, biologie, médecine, chimie des matériaux, environnement... Mais rappelons que le Prix Nobel récompense ici un travail de chimie purement fondamental. Et, comme le Prix Nobel de physique attribué déjà en 1913 pour la découverte du phénomène de supraconductivité et, cette année encore, pour la mise en évidence à plus haute température du même phénomène dans de nouvelles céramiques, parions que d'autres lauréats récompenseront un jour la chimie supramoléculaire pour une de ses retombées.

PETITE HISTOIRE DES CRYPTANTS

Point de vocabulaire : doit-on parler de cryptates, de cryptants ou de supermolécules ? « Cryptant » (du grec : ce qui est caché) nomme une molécule-récepteur, synthétisée par le chimiste, capable de former des composés (des complexes) d'inclusion. Le terme cryptate désigne le produit d'association entre le cryptant et la molécule-substrat qui s'y trouve piégée (incluse). La supermolécule, appellation plus générale que cryptate, est le résultat de la fixation d'un substrat par son récepteur.

■ Maryvonne Tissier, responsable de l'information scientifique et de la communication du département chimie du CNRS, 13, quai Anatole France, 75700 Paris.



Modèle moléculaire d'un complexe d'inclusion d'un ion squarate avec un récepteur octaammonium macrocyclique. © CNRS.



Jean-Marie Lehn (© CNRS-Cliché Nicole Tigot).

Commençons par remonter aux sources des cryptants. Les travaux de Jean-Marie Lehn ont trouvé leur toute première inspiration dans la découverte faite en 1964 par l'Américain Preman : la propriété de certains antibiotiques (par exemple la valinomycine) de rendre les membranes des mitochondries perméables aux ions potassium. Puis, en 1967, paraît une note dans le *Journal of the American Chemical Society* sur les éthers-couronnes, molécules électriquement neutres, en forme de couronnes, synthétisées par Charles Pedersen... par inadvertance ! Rien ne se perd pour un bon chimiste. Celui-ci va s'en servir comme de véritables clés anglaises pour former des complexes stables avec certains sels de métaux alcalins (sodium, potassium...) ou alcalino-terreux (magnésium, calcium...). Affinant encore ce nouvel outil, Donald Cram, universitaire californien, le rend capable d'opérer la difficile séparation de deux types d'acides aminés comportant strictement les mêmes atomes et distincts seulement par leur chiralité (différents comme le sont des mains droites et des mains gauches).

A Jean-Marie Lehn revient le mérite de la troisième dimension. Avec lui, les couronnes plates se déploient en forme de sphères ou de cylindres : les fameux cryptants, dont la structure comporte un vide central qui piège, en fonction de sa taille, telle espèce chimique plutôt qu'une autre. Cette cavité peut être tapissée d'atomes ou de fonctions de façon à créer une affinité sélective vis-à-vis d'un composé donné à la façon d'une substance biologique reconnaissant sa cible (voir encadré 2).

Biographie de Jean-Marie Lehn

Jean-Marie Lehn est actuellement professeur au Collège de France où il dirige l'équipe de recherche 285 du CNRS de chimie des interactions moléculaires et de stéréochimie. D'autre part, il continue de travailler à Strasbourg, dans l'unité 422 du CNRS co-dirigée par lui-même et par Jean-Pierre Sauvage.

Né le 30 septembre 1939 à Rosheim (Bas-Rhin), licencié en sciences physiques (1960) et docteur en sciences (1963) à l'université de Strasbourg (université Louis Pasteur ou ULP), il a été chercheur au CNRS de 1960 à 1966 dans le laboratoire du Professeur Guy Ourisson à l'ULP, puis maître de conférences à l'ULP (1966-1969), professeur sans chaire puis professeur titulaire à titre personnel à l'ULP (1970-1979).

Jean-Marie Lehn a enseigné dans de nombreuses universités étrangères : Harvard University (Cambridge-Massachusetts-Etats-Unis), Ecole polytechnique fédérale de Zurich (Suisse), universités de Cambridge (Grande-Bretagne), de Barcelone (Espagne) et de Francfort (RFA).

Il est, entre autres, membre de l'Académie des sciences (Institut de France) depuis 1985, de l'Académie nationale des sciences des Etats-Unis, de l'Académie américaine des sciences et des arts et de celle des Pays-Bas.

Il est membre du conseil d'administration du CNRS et conseiller scientifique chez Rhône-Poulenc.

Parmi ses prix scientifiques les plus récents, rappelons la Médaille d'or du CNRS (1981), la médaille Pierre Brouillat de Louvain (1981), le prix Paracelse de la Société chimique suisse (1982), le prix de la Fondation Alexander von Humboldt (1983), le prix du Commissariat à l'énergie atomique décerné par l'Académie des sciences (1984), le prix Rolf-Sammet de l'université de Francfort (1986), le prix de la Fondation Alsace (1986).

Jean-Marie Lehn est chevalier dans l'ordre national du Mérite (1976) et officier de la Légion d'honneur (1987).

... ET CELLE DES DEUX CO-LAURÉATS

Charles J. Pedersen, né en 1904 en Corée, américain d'origine norvégienne, titulaire d'un master of science en 1927 du Massachusetts Institute of Technology à Cambridge (Etats-Unis), a fait toute sa carrière de chimiste (1927-1969) chez Du Pont de Nemours.

Donald J. Cram, né en 1919 dans le Vermont (Etats-Unis) est titulaire d'un doctorat de l'université de Harvard (Cambridge, Etats-Unis). Il est professeur à l'université de Californie de Los Angeles et conseiller auprès de plusieurs grandes sociétés américaines.

Petit memento des cryptants strasbourgeois

Activation et stabilisation des anions et des cations

— Utilisation de propriétés complexantes spéciales :

- catalyse de l'hydrolyse d'esters encombrés,
- déclenchement de polymérisations anioniques.

— Stabilisation des degrés d'oxydation inhabituels (par exemple Eu^{+2} ou anions alcalins tels que Na^+ et K^+ qui deviennent stables à l'état cristallin).

— Elaboration d'électrochromes par l'Américain J. Dye (le rôle de l'anion est tenu par des électrons) qui permettent l'étude de la chimie de l'électron.

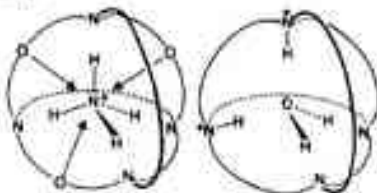
Sélectivité dans la reconnaissance des cations

Exemples :

- séparation de Sr^{2+} et de Ca^{2+} (détoxification d'organismes contaminés par le strontium radioactif),
- séparation des isotopes $^6\text{Li}/^7\text{Li}$ et $^{23}\text{Na}/^{24}\text{Na}$,
- traitement (suggéré mais pas encore essayé !) de la goutte par dissolution de l'urate de sodium dans les articulations.

Sélectivité dans la reconnaissance de structures tétraédriques

Exemples de reconnaissance : NH_4^+ et H_2O .



Reconnaissance tétraédrique d'un ion NH_4^+ et d'une molécule d'eau par un sphérand.

Chimie de coordination des anions

Parmi les anions complexés, citons les espèces d'intérêt biologique (AMP, ADP, ATP) et quelques gros anions complexés — $(\text{Co}(\text{CN})_6)^{3-}$, $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ — dont la stabilité est considérablement renforcée.

En généralisant les principes d'élaboration des récepteurs à site unique, Jean-Marie Lehn a développé le concept de co-récepteur, autrement dit un cryptant possédant deux (ou plus) sites de reconnaissance.

Les autres axes de recherche récents de Jean-Marie Lehn

En dehors de la chimie supramoléculaire, les préoccupations de recherche de Jean-Marie Lehn portent sur la photodécomposition de l'eau, la photoréduction du gaz carbonique, la synthèse du mélange $\text{CO} + \text{H}_2$ par réduction photochimique simultanée de l'eau et du gaz carbonique.

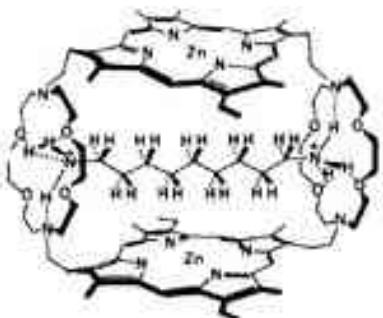
Il s'intéresse également à la réalisation de « fils moléculaires » (molécules possédant une longue chaîne carbonée) pour le transfert d'électrons ou bien encore à celles de mésopores tubulaires pour le transport d'ions.

■ (D'après un rapport de M. François Marthey, directeur de l'unité mixte 13 CNRS-Société nationale des poudres et explosifs - Ecole polytechnique à Palaiseau).

Coopérativité

Les co-récepteurs mentionnés ci-dessus permettent l'étude des phénomènes de coopérativité, de régulation et de communication (transfert de signaux). Si les espèces cryptées sont des cations métalliques, on peut ainsi étudier diverses propriétés liées aux interactions ou affectées par celles-ci : couplage magnétique, transfert d'électrons, propriétés redox, propriétés électrochimiques.

Une des expressions les plus achevées de ce concept de co-récepteur combine la présence de sites métalliques (Zn^{2+}) avec la sélectivité d'un co-récepteur de dications. On obtient alors une supermolécule à substrats mixtes, contenant à la fois une molécule organique et des ions métalliques.



Métalloco-récepteur de dications.

Complexité des récepteurs et phénomènes biologiques

Le gravisement dans l'échelle de la complexité a progressivement rapproché les cryptants des problèmes biologiques alors même que ces récepteurs sont entièrement artificiels et donc de structures très différentes de celles des récepteurs rencontrés dans les organismes vivants.

Exemples :

- mise au point de « pompes à sodium et potassium » originales qui constituent une modélisation de celles qui interviennent dans la régulation des concentrations d'ions dans les organismes vivants,
- par greffage de groupements fonctionnels sur les récepteurs, création de la « catalyse supramoléculaire » qui fonctionne sur le mode des enzymes : fixation d'une molécule cible sur le récepteur, puis réaction avec la fonction, ensuite relargage.

L'évolution des techniques salinières

La modernisation jadis et aujourd'hui

On a longtemps confondu, notamment en France, histoire du sel et histoire de la gabelle, à tel point que des historiens sérieux répètent que le sel ne mérite plus leur attention depuis l'abolition de l'impôt qui rendait son coût tellement prohibitif qu'il fallait obliger les consommateurs-contribuables, au besoin par la force armée, à acheter leur ration. A l'époque payer le prix du sel ou acquitter l'impôt direct était deux opérations confondues. Depuis les choses ont heureusement changé. Le sel est devenu une matière première essentielle de l'industrie chimique. Il est tellement abondant dans le sous-sol (sel gemme) ou en dissolution dans l'eau de mer, que personne n'envisage, pour un jour même lointain, son épuisement. Sous l'Ancien Régime, sa disette était au contraire une crainte bien présente dans la vie des populations, surtout des plus pauvres. La modernisation de cette activité sous différents facteurs, notamment la crise de l'énergie dès la fin du Moyen Âge, livre aujourd'hui à une consommation qui n'a cessé de se diversifier et de se transformer, des quantités considérables de ce produit toujours aussi indispensable à l'homme.

Jean-Claude HOCQUET

Toute production de sel, y compris le sel gemme extrait du sous-sol s'il faut le raffiner, passe par les phases de la concentration, de la saturation et de la cristallisation successivement atteintes par évaporation. Cependant on obtient cette évaporation par une multitude de procédés, dont les plus répandus sont le marais salant ou le salin maritime, technique agricole, et la saline ignigène, technique industrielle qui traite une saumure puisée dans le sous-sol ou du sel gemme extrait par les techniques minières.

La cristallisation fractionnée des chlorures

L'eau de mer, matière première utilisée à la fabrication du sel marin, a une composition ionique très diverse. On trouve (en kilogrammes par tonne) les principaux constituants suivants dans la Méditerranée :

Chlorure	Cl ⁻	20,4
Sodium	Na ⁺	11,4
Calcium	Ca ⁺⁺	0,43
Potassium	K ⁺	0,39
Magnésium	Mg ⁺⁺	1,4
Sulfate	SO ₄	2,8
Bromure	Br	0,07
Bicarbonate	HCO ₃	0,1

Ces ions se combinent entre eux :

NaCl	28,46
CaSO ₄	1,46
MgSO ₄	2,22
MgCl ₂	3,73
KCl	0,74
NaBr	0,09

Le saunier sait qu'un mètre cube d'eau de mer contient environ vingt-huit à vingt-neuf kilogrammes de chlorure de sodium et huit kilogrammes d'autres sels.

S'il laisse s'évaporer toute l'eau de mer, il sait aussi que le sel (NaCl) récolté sera un produit impur, âcre, fondant, de mauvaise qualité commerciale. Or dès le Moyen Âge il a utilisé empiriquement le principe de la cristallisation fractionnée des chlorures pour isoler le chlorure de sodium indispensable à la cuisine et aux salaisons.

Pour faire du sel, on évapore l'eau sous l'action d'agents atmosphériques, l'ensoleillement et le vent. L'évaporation qui élimine l'eau est un phénomène complexe au cours duquel augmente la concentration en sels dissous. Lorsque le stade de la saturation est atteint, ces sels précipitent en cristallisant les uns après les autres. On mesure la densité de la solution avec un appareil gradué, l'aéromètre de Baumé qui indique le degré (degré Baumé = "Bé). A mesure que l'eau s'évapore, le volume de la solution diminue et sa densité augmente :

"Bé	Densité	Volume de la solution	Précipitation de sel
3,5°	1,025	1 000	rien
7°-8°	1,059	476	CaCO ₃
13°-16°	1,125	200	CaSO ₄ 2H ₂ O
25°	1,209	112	NaCl
30°	1,264	30	MgCl ₂ et MgSO ₄

■ Jean-Claude Hocquet, directeur de recherche au CNRS, responsable de l'unité associée « La mesure, l'organisation et l'exploitation de l'espace en Europe occidentale au Moyen Âge » (UA 1252 CNRS) Université de Lille III, Pont de Bois, BP 149, 59653 Villeneuve-d'Ascq.

On récolte donc le sel entre 25° et 30 °Bé et on ne laisse pas précipiter le magnésium.

Deux techniques de fabrication du sel

Dans le marais salant, qui apparaît seulement durant le haut Moyen Âge si on entend sous ce terme une circulation continue d'eau de mer apportée par des canaux à travers une série de bassins construits par l'homme, les sauniers ont progressivement mis au point la technique capable de réaliser la cristallisation fractionnée des chlorures sous l'action du soleil et du vent. Entre l'An Mil et le début du XIV^e siècle, ils ont en effet divisé le grand bassin initial en une série de bassins plus petits. Ils ont éliminé d'abord les vases ou boues en suspension dans la vasière, puis le carbonate de cal-

de calcium hydraté et cristallisé) dans la poêle qu'il encrasse et dont il diminue le rendement thermique et la capacité de remplissage, enfin une énorme consommation de bois qui ravage les forêts alentour et crée des landes déboisées.

La crise de l'énergie : l'agriculture sert de modèle à l'industrie

Les saliniers vont surmonter ces trois difficultés en transposant dans l'industrie les techniques inventées par les paysans-sauniers du bord de mer. La technique agricole inspire la modernisation du procédé industriel. Première innovation, à Lunenburg (Basse-Saxe) la saumure puisée aux fontaines est distribuée par gravité aux sauneries par de petits chenaux ou

gradation, vastes édifices de centaines de mètres, hauts de six à dix mètres, construits en fortes poutres garnies de planches supportant des fagots. Une roue hisse la saumure au sommet de l'édifice d'où elle ruisselait sur les branchages et les épines et on recommençait l'opération. Soumise aux agents atmosphériques, l'eau s'évaporait et se concentrait en se débarrassant du gypse. Elle pouvait atteindre 22 ou 23 °Bé, c'est-à-dire réduire son volume de 85 %. Dans la poêle on ne chauffait plus que cent cinquante litres au lieu de mille comme par le passé. Et si on introduisait mille litres de saumure graduée on récoltait en fait sept à huit fois plus de sel avec une consommation moindre de bois. Ces inventions empruntées à la technique agricole ont assuré la permanence de l'industrie du sel pendant trois siècles (XVI^e-XVIII^e siècles).



La camelle de Salin-de-Giraud en Camargue occupe la vaste aire de stockage du salin. Elle atteint fréquemment le million de tonnes, d'un sel très pur prioritairement destiné à l'industrie chimique. L'énormité même des quantités produites et stockées empêche d'envisager toute mise sous abri. Lors des premières pluies, la partie superficielle est dissoute, mais dès que l'eau s'évapore, le sel recristallise et forme un véritable bouclier protecteur (cliché de la Compagnie des Salins du Midi et des Salines de l'Est).



Cristaux de sel, jeux de lumière sur des cristaux de sel gemme (cliché Solvay).

cium (CaCO_3) et le sulfate de calcium (CaSO_4) dans le cobler. Ils introduisaient alors la saumure bien chauffée sur les petits casiers de la saline proprement dite et récoltaient le sel dans l'eau. Il ne fallait pas laisser toute l'eau s'évaporer sinon le magnésium aurait aussi précipité et endommagé la récolte de sel. Au début du XIV^e siècle, ils découvrent le moyen d'apporter régulièrement une eau bien chauffée, saturée, à la saline, à la fois pour éviter la sursaturation et pour obtenir une récolte journalière. Ils créent à côté des bassins de cristallisation des réserves ou nourrices.

La technique industrielle consiste à équiper un puits avec une machine élévatrice et à transporter la saumure jusqu'aux sauneries ; là on la met à bouillir dans des poêles métalliques reposant sur des foyers où brûle un feu continu alimenté au bois. À mesure qu'il cristallise, le sel est retiré de la poêle et mis à sécher. Cette technique affronte de nombreuses difficultés, notamment le transport de la saumure dans des yeux ou cuveaux portés à l'épaule, le dépôt du gypse (saumure

rigoles creusées dans le sol. La seconde innovation veille à obtenir un meilleur rendement de la chaleur du foyer (économie d'énergie) et à préserver les poêles des dommages entraînés par la remandure. Il fallait en effet interrompre le feu, déposer la poêle, la chauffer à sec et taper dessus à coups redoublés de masses pour écailler l'épaisse croûte de gypse cuit et de carbonate de calcium, enfin la confier à la forge pour les réparations. On a, pour pallier ces inconvénients, divisé l'opération unique d'évaporation en trois phases successives en créant le poëlon en avant de la poêle et l'exhalatoire au-dessus. On a donc introduit la technique des bassins successifs tous alimentés par le même foyer. Dans le poëlon la saumure préchauffée précipite le gypse, sur le plancher incliné de l'exhalatoire le salinier dépose la pellette de sel qui s'égoutte en évacuant le magnésium et sèche. La troisième innovation est la plus importante. On s'est avisé de faire intervenir le soleil et le vent pour donner du degré aux saumures, les grauer ; aussi l'Europe continentale s'est-elle couverte de bâtiments de

Le charbon, la révolution industrielle et la révolution des transports

Cependant, en Angleterre, on s'orientait vers de nouvelles solutions et la découverte des bassins charbonniers à partir de la fin du XVII^e siècle introduisait une triple révolution. Le rendement thermique du charbon très supérieur à celui du bois encouragea les Anglais à entreprendre de faire bouillir directement l'eau de mer dans des usines, surtout dans le Northumberland. Mais en prospectant le sous-sol à la recherche du charbon dans les zones où ils extrayaient des saumures par puits, ils découvrirent les couches de sel gemme du Cheshire qu'ils exploitèrent soit par les techniques de la mine sèche, soit par injection d'eau douce qui dissout le sel et se transforme en saumure saturée qu'il suffit de pomper. Cette technique était très ancienne, largement utilisée dans les montagnes de sel du Tyrol et d'Autriche déjà au XIII^e siècle. Enfin,

pour assurer le transport dans des conditions économiques du charbon et du sel, les Anglais se donnaient aussi un réseau de canaux et de voies navigables orientés vers Liverpool et Newcastle. Au début du XIX^e siècle, ils devenaient les grands exportateurs européens de sel blanc raffiné et privent les producteurs de l'Atlantique français ou ibérique de leurs traditionnels marchés d'exportation sur les rivages de la Baltique.

En France même la construction de canaux, tels que le Marne-Rhin, et celle des chemins de fer, contemporaine de la mise en exploitation de nombreux gisements houillers, provoquent une mutation complète de la production du sel. Jusqu'alors le sel marin avait quitté les marais de l'Atlantique ou les salins de la Méditerranée et gagné l'intérieur par les fleuves, Seine, Loire, Dordogne, Rhône, etc. Au cours du XIX^e siècle, le trafic s'inverse et, grâce à la voie ferrée, le sel lorrain ou comtois produit au charbon, gagne Paris ou Orléans puis Dunkerque, Le Havre et Cherbourg. La politique tarifaire des chemins de fer et le maintien d'un lourd impôt spécifique sur le sel favorisent les salines industrielles de l'Est et les marais de l'Atlantique disparaissent rapidement. Cependant la production de sel ignigène reste dominée par le problème de l'énergie.



Au cœur du Sahara, non loin d'Agadès au Niger, cernées de terroirs de résidus de l'exploitation, les salines de Tegida n'Essoum (= la source du sel) sont divisées en quartiers. Les bassins, de forme circulaire, différents par la taille, le niveau, la couleur de la saumure, ont des fonctions analogues à celles des divers compartiments des marais salants où l'évaporation provoque successivement la concentration, la saturation et la précipitation des chlorures (cliché extrait du livre de H. Ritter, *Caravanes du sel*, Atlantis Verlag, Zurich 1980 et Arthaud, Paris 1981).

Modernisation et mécanisation

Le sel industriel doit en effet abaisser ses coûts pour demeurer compétitif avec le sel méditerranéen. On mesurera la difficulté si l'on sait que Salin-de-Giraud (Camargue) pour produire un million de tonnes de sel utilise une énergie solaire gratuite égale à deux millions de tonnes d'équivalent-pétrole. Un salin fonctionne comme un évaporateur solaire horizontal et gigantesque. L'industrie brûle ces deux millions de tonnes de pétrole, sous forme d'électricité le plus souvent. Cet exploit, elle le réalise par un développement, autonome désormais, des techniques de production, car l'innovation technologique, au XX^e siècle, ne se fait plus dans le sens d'une transposition des techniques agricoles à l'industrie. On évapore « en vase clos » et non plus « en poêle ouverte » et on relie en série plusieurs évaporateurs qui recyclent la vapeur et fonctionnent sous vide d'air pour produire, à des pressions décroissantes, le sel dit vacuum. En effet la température d'ébullition décroît rapidement avec une pression en diminution. Dans un quintuple effet, on a les valeurs suivantes :

1 ^{er} effet	1,65 bar	et 124 °C
2 ^e effet	0,89 bar	105 °C
3 ^e effet	0,44 bar	86 °C
4 ^e effet	0,22 bar	69 °C
5 ^e effet	0,09 bar	49 °C

L'industrie utilise encore la thermo-compression et tous les procédés automatiques de la mécanisation. Mais celle-ci a été adoptée aussi sur les salins du Midi, pour réduire les coûts salariaux d'une très nombreuse main-d'œuvre saisonnière. Aujourd'hui, au moment de la récolte, un salin est un véritable chantier où travaillent des récolteurs colossaux capables de ramasser mille sept cents tonnes de sel à l'heure transportées par des convoyeurs à bandes vers des stations de lavage, puis les camelles qui stockent le produit avant son transport vers les marchés de consommation. Le salin demeure donc un espace agricole que la mécanisation rapproche de l'industrie du sel ignigène et qui consomme de plus en plus d'énergie, à la fois pour le pompage d'énormes masses d'eau prises à la mer, pour faire tourner les moteurs de puissants engins, pour laver, raffiner et conditionner un sel blanc fin de même type, couleur et grenage que le sel industriel. Pourtant la méthode industrielle consomme vingt à trente fois plus d'énergie-pétrole que le selin maritime, et c'est l'énormité même des productions, de l'ordre du million de tonnes par unité, qui protège la saline d'une concurrence ruineuse. En effet la valeur marchande du produit est faible et le coût des transports de ce pondéreux, qui maintient une pluralité des techniques de production, incite le plus gros utilisateur de sel et de saumure, l'industrie chimique, à localiser ses unités à proximité des producteurs.

Finalement, on observe dans l'activité salinière un paradoxe apparent : alors que généralement la grande industrie tend à imposer une unification technique, la production de sel a préservé la diversité des procédés. Autrefois l'impôt (gabelle) faisait tout le prix du sel — les coûts de production étaient négligeables dans le prix de vente aux consommateurs — et aujourd'hui, l'impôt très fortement réduit, ce rôle est dévolu aux transports dont les coûts délimitent des marchés captifs.

BIBLIOGRAPHIE

- Colas A., *Le sel*, Paris, Presses universitaires de France, 1985, 127 p.
 Emons H.H. et Walter H.H., *Mit dem Salz durch die Jahrtausende*, Leipzig, Veb Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1984, 227 p.
 Hocquet J.-C., *Le sel et la fortune de Venise*, Presses universitaires de Lille, 2 vol. 1979 et 1982 (2^e édition), 360 et 739 p.
 Hocquet J.-C., *Le sel et le pouvoir, de l'Antiquité à la Révolution française*, Paris, Albin Michel, 1985, 517 p.
 Hocquet J.-C., *Le roi, le marchand et le sel*, Presses universitaires de Lille, 1987, 376 p.
 Multhaus R.P., *Neptune's gift, a history of common salt*, Baltimore et Londres, The Johns Hopkins University Press, 1955, 325 p.
 Schreiner E., *Technischer Fortschritt an der Schwelle zur Industrialisierung*, Munich, Beck, 1980, 101 p.
 Winthoff H., *Umriss einer historischen Metrologie zum Nutzen der wirtschafts- und sozialgeschichtlichen Forschung*, Göttingen, Vandenhoeck et Ruprecht, 2 vol., 1979, 858 p. et ill.

Nouveaux noyaux exotiques

La machine « Tandem MP », accélérateur de faisceaux d'ions lourds, permet de produire et d'étudier des noyaux anormalement riches en neutrons ou en protons, participant à la nucléosynthèse primordiale.

Un dispositif expérimental original a permis de mettre en évidence les propriétés inattendues de l'isotope ^{68}Ni : spin zéro du premier état excité, forme du noyau...

Des données fondamentales, telles l'excès de masse, l'énergie et éventuellement le spin des premiers états excités ont été mesurées pour ^{80}Ge , ^{74}Zn , ^{67}Ni , ^{68}Ni , ^{62}Fe et les noyaux ^{69}Ni et ^{75}Zn observés pour la première fois.

Monique BERNAS, Françoise POUGHEON, Pierre ROUSSEL

Les noyaux sont composés de neutrons et de protons fortement liés. La plupart d'entre eux sont stables sur notre planète aujourd'hui.

Le monde des atomes et des noyaux, monde duquel nous participons, résulte d'une évolution très longue, amorcée à l'instant du big-bang.

Les noyaux qui survivent aujourd'hui sur notre planète sont stables ou dotés de périodes longues. Le corps humain, poussière d'étoiles, est constitué de soixante-cinq pour cent d'oxygène et de dix-huit pour cent de carbone (en masse). Il est essentiellement stable au niveau nucléaire, à l'exception de quelques atomes de carbone 14 et de potassium 40 dont les périodes sont très longues comparées à la durée de notre vie.

Les noyaux sont composés de neutrons et de protons fortement liés. Cette énergie de liai-

son, qui résulte principalement de l'interaction forte entre les constituants, varie d'un isotope à l'autre. Plus elle est grande, plus longtemps dure le noyau. Les isotopes stables se situent au fond de la vallée de stabilité (voir fig. 1) comme par exemple les isotopes carbone 12, oxygène 16, fer 56 et étain 116. De part et d'autre et au-delà du bismuth 209 se trouvent des noyaux dont les durées de vie sont d'autant plus courtes qu'ils sont moins liés. Par interaction faible, au sein d'un noyau, un neutron se transforme en proton, ou inversement. Cette transformation n'a lieu que si elle s'accompagne d'un accroissement de l'énergie de liaison. Les noyaux lourds peuvent se désintégrer aussi par l'émission α ou par la fission, donnant naissance dans chacun des cas à deux fragments plus liés. Ainsi, spontanément, mais avec des périodes très différentes, tous les noyaux descendent rejoindre le creux de la vallée (voir fig. 1).

Les propriétés des noyaux marginaux, dotés de protons ou de neutrons en excès, sont inté-

- Monique Bernas, directeur de recherche au CNRS,
- Françoise Pougheon, maître de conférence à l'université de Paris XI,
- Pierre Roussel, directeur de recherche au CNRS, Institut de physique nucléaire (IN2P3 240024), université de Paris XI, Boîte postale 1, 91406 Orsay.

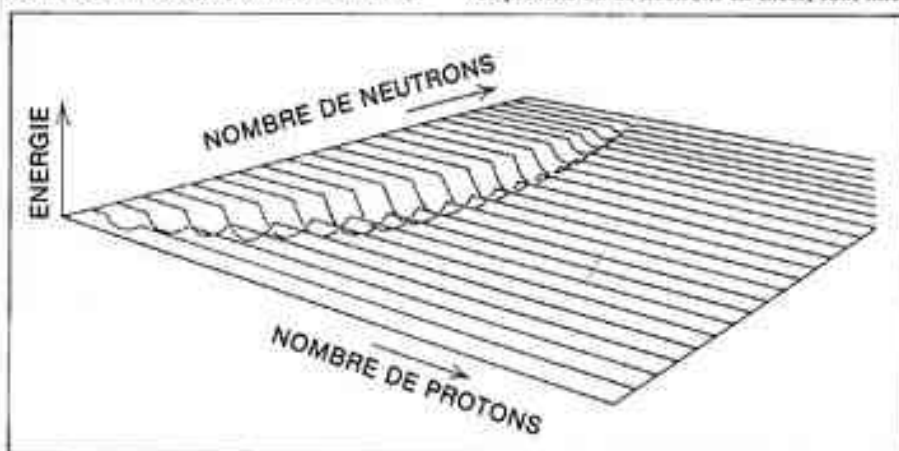


Fig. 1 - Représentation schématisée de la vallée de stabilité.

Les échantillons nucléaires que nous connaissons peuvent être reportés sur une carte en fonction de leur nombre de protons et neutrons. Si l'on choisit pour coordonnées verticale (et vers le bas) l'énergie de liaison, les noyaux se répartissent selon la vallée de stabilité. Dans le creux on trouve les noyaux stables, de part et d'autre les noyaux liés, signes de l'émission β , de la radioactivité α , ou de la fission. Au-delà les noyaux ne sont plus liés. Leur période devient très brève ($\sim 10^{-22}$ sec.) et comparable au temps que met un nucléon pour traverser un noyau.

Etudier des noyaux anormalement riches en neutrons et protons pour mieux comprendre la nucléosynthèse.

ressantes en physique nucléaire et en astrophysique. L'extension du champ d'étude vers des noyaux anormalement riches en neutrons ou en protons enrichit notre compréhension de la matière nucléaire. L'histoire de la synthèse des éléments, dans la nature, implique que ces espèces extraordinaires aient été formées peu ou prou et pendant des temps plus ou moins longs. L'abondance des éléments, observée aujourd'hui sur notre planète (fig. 2), constitue une sorte d'empreinte digitale de cette nucléosynthèse. Son interprétation repose sur les propriétés des noyaux impliqués, notamment les périodes et les énergies de liaison.

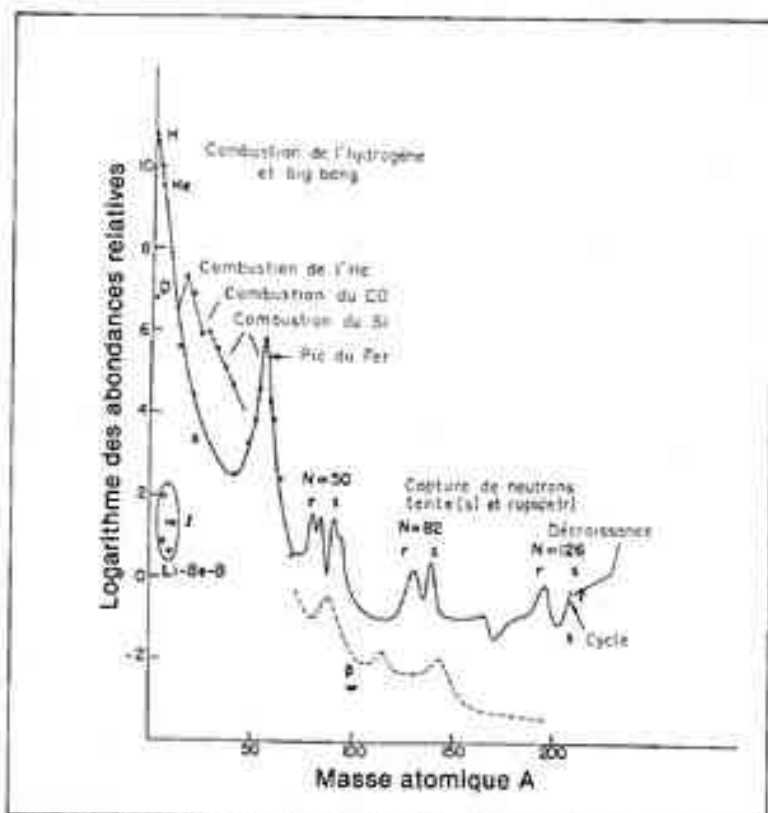


Fig. 2 - Abondance relative des noyaux dans la nature, en fonction de leur nombre de masse A (qui est le nombre de leurs nucléons).

Méthode expérimentale

L'accélération de faisceaux d'ions lourds a ouvert des voies pour la synthèse de nouveaux noyaux. Les mécanismes de réaction qui peuvent être exploités sont, en fonction croissante de l'énergie :

- la fusion dans laquelle les noyaux projectile et cible forment un noyau composé, quelques nucléons pouvant se trouver évaporés ;
- les transferts dits « quasi élastiques » auxquels se rapportent ces travaux dans lesquels un ou plusieurs nucléons se trouvent inchangés entre le projectile et la cible qui ne sont pas excités. Ces réactions ne concernent que la surface des noyaux qui se frottent ;
- les transferts profondément inélastiques, dans lesquels le choc est plus frontal, les deux noyaux échantonnent des nucléons et une fraction de l'énergie du choc est convertie en excitation des deux partenaires qui sont encore identifiables à l'issue de la collision ;
- la fragmentation de la cible ou du projectile : parmi les fragments, on observe de façon prépondérante des noyaux stables, mais, avec un taux qui décroît en fonction de l'écart par rapport au creux de la vallée, on trouve aussi des noyaux rares et même très rares — et très éphémères.

Dans l'encart n° 1 sont présentées les régions de la carte concernées par ces processus (fig. 3).

Nous avons exploité les spécificités de l'accélérateur Tandem MP (voir encart n° 2) à l'Institut de physique nucléaire d'Orsay : il s'agit d'une machine électrostatique de haute résolution en énergie ($\Delta E/E < 5 \cdot 10^{-4}$) dont l'optique des faisceaux est précise (émittance $\approx 1 \text{ n.m.m.mr}$ en ion lourds). Les propriétés des sources d'ions et de l'injection permettent d'y accélérer les ions rares et même faiblement radioactifs comme le carbone 14. Ainsi, un faisceau de carbone 14 d'intensité moyenne $I \approx 100 \text{ nA}$ électrique, comparable à celle des autres faisceaux d'ions lourds, est fourni par l'accélérateur.

Ces noyaux de carbone 14 ont deux neutrons en excès par rapport au carbone 12. Ils réagissent avec des noyaux-cibles et ils peu-

Les spécificités de l'accélérateur Tandem d'Orsay, permettent d'étudier des isotopes rares.

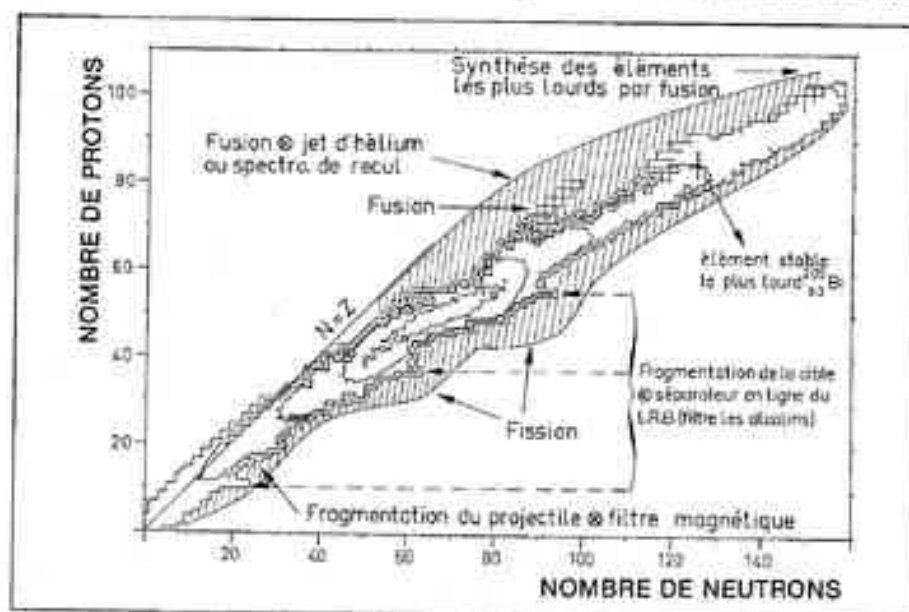


Fig. 3 - Carte des isotopes : en blanc à l'intérieur du contour figurent les noyaux dont l'énergie de liaison a été mesurée ; pour les noyaux de la zone hachurée, ils ont été simplement identifiés, ou bien leur période et leur schéma de désintégration ont été déterminés.

Cartographie des mécanismes de réaction

L'étude de noyaux exotiques implique l'exploitation d'une réaction de synthèse, dotée d'un taux de production suffisant, associée à une technique de séparation qui filtre les produits de la réaction.

Sur le schéma on illustre les régions de la carte des noyaux étudiées par les principaux couples réactions-filtres exploités à ce jour.

1) Par la fusion de deux noyaux, on réalise la synthèse d'isotopes excédentaires en protons conformément à la figure 3, puisque l'axe de la vallée s'incline vers les excédentaires en neutrons ; les produits de réaction sont filtrés par spectromètre de recul et on les transporte par jet d'hélium pour mesurer leur décroissance radioactive en un lieu exempt de bruit de fond ; on exploite le fait que les produits de fusion sont émis vers l'avant.

2) Par la fission spontanée ou induite par neutron, avec un spectromètre de masse qui filtre selon la masse $A = N + Z$, on étudie des isotopes riches en neutrons rassemblés en deux zones qui reflètent les taux de production de la fission.

3) Le transfert profondément inélastique de quelques nucléons d'un noyau projectile lourd vers un noyau cible, ou à plus haute énergie sa fragmentation, joint à un dispositif de tri magnétique, est en cours d'exploitation notamment auprès de l'accélérateur GANIL à Caen.

4) Pour obtenir des informations sur de nouveaux noyaux, il faut optimiser le couple réaction de production et filtre de haute performance.

Des réactions très productives ont été la spallation de la cible par les protons de 20 GeV au CERN. Avec les séparateurs de masse du CSNSM d'Orsay qui sélectionnent efficacement les alcalins, des avancées spectaculaires ont été réalisées, très visibles sur la carte des noyaux. ■

vent, entre autre, capturer deux protons pour donner la réaction (^{12}C , ^{16}O) qui libère de l'énergie potentielle sous forme d'énergie cinétique. Sur des noyaux cibles stables et riches en neutrons, cette réaction conduit à des noyaux résiduels encore plus excédentaires en neutrons.

En outre, un système d'analyse original a été développé auprès du Tandem. Il se compose d'un spectromètre magnétique à champ inhomogène « Bacchus ». Il a été équipé d'un ensemble de détection approprié à l'étude des réactions par ions lourds (fig. 5). Il sépare les ions émergeant de la cible en fonction de leur rigidité magnétique, à l'intérieur d'un angle solide donné. Derrière l'aimant, l'ensemble de détection comporte deux compteurs à localisa-

L'accélérateur Tandem MP

Cette machine communique une grande vitesse aux noyaux atomiques de la façon suivante. Dans la source, les atomes captivent un électron en excès — par échange électronique. Chargés une fois négativement, ils sont accélérés vers la région centrale de la machine où règne un potentiel de + 12 millions de volts (MV) grâce au système de transport de charges figuré sur le dessin. A ce niveau, les ions traversent une faible épaisseur de matière (chiffre en microgrammes par cm^2) et la plupart des électrons du cortège (disons n) sont arrachés. Chargés alors positivement n fois, les ions redescendent le potentiel et sont par conséquent accélérés à nouveau. Ils gagnent ainsi au total $(n + 1)$ 12 MeV ; pour des noyaux de ^{14}C avec $n = 5$, l'énergie acquise est de 72 MeV et la vitesse de 31 400 km/sec. De telles énergies sont nécessaires pour pénétrer à l'intérieur des noyaux. La tension du terminal de l'accélérateur vient d'être portée à 15 MV à la suite d'une transformation réalisée par l'équipe technique du Tandem. Des noyaux de charge plus élevées deviennent ainsi accessibles à ce mode d'investigation. ■

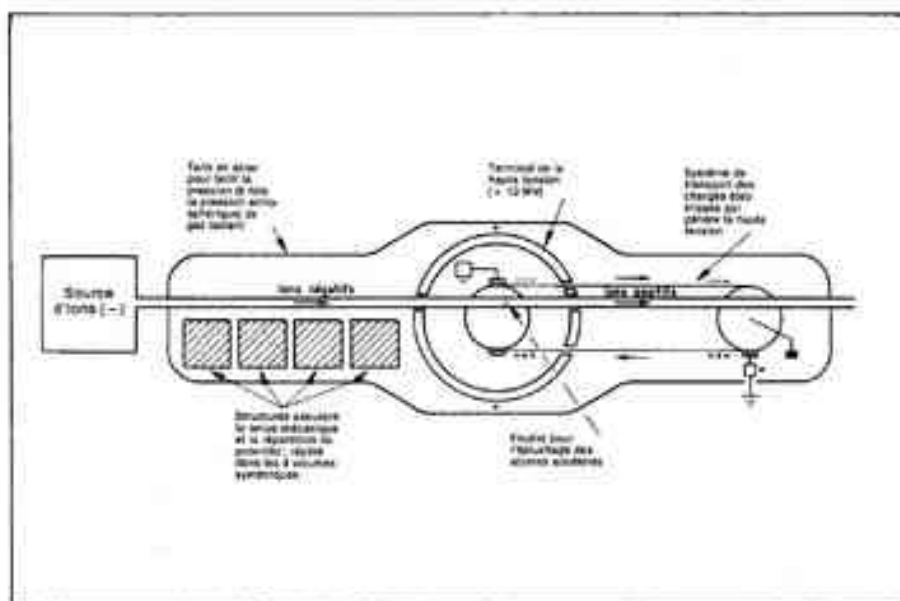


Fig. 4 - Schéma de fonctionnement de l'accélérateur Tandem.

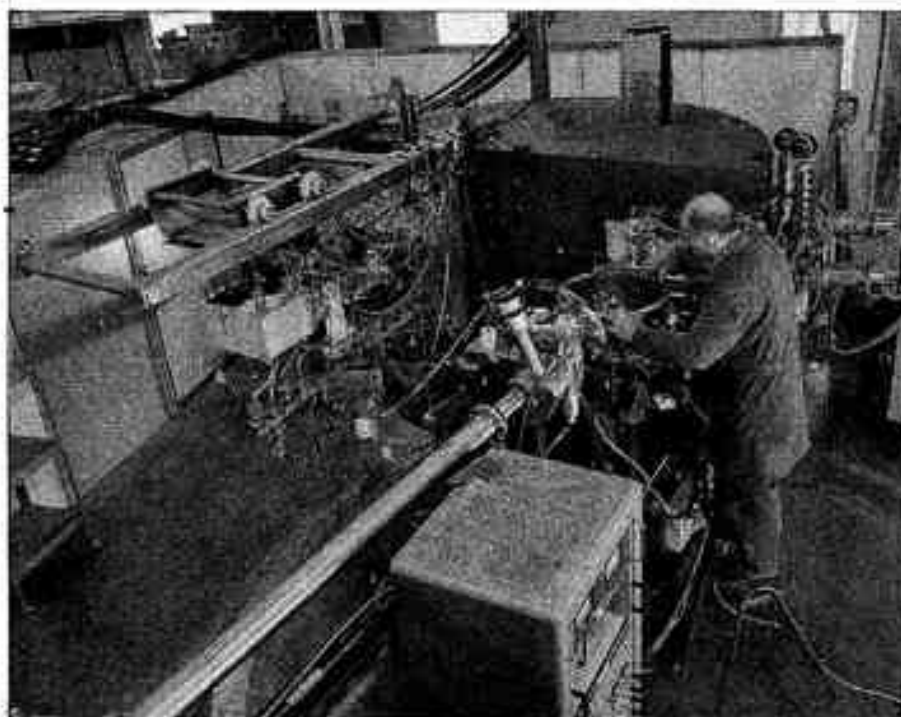
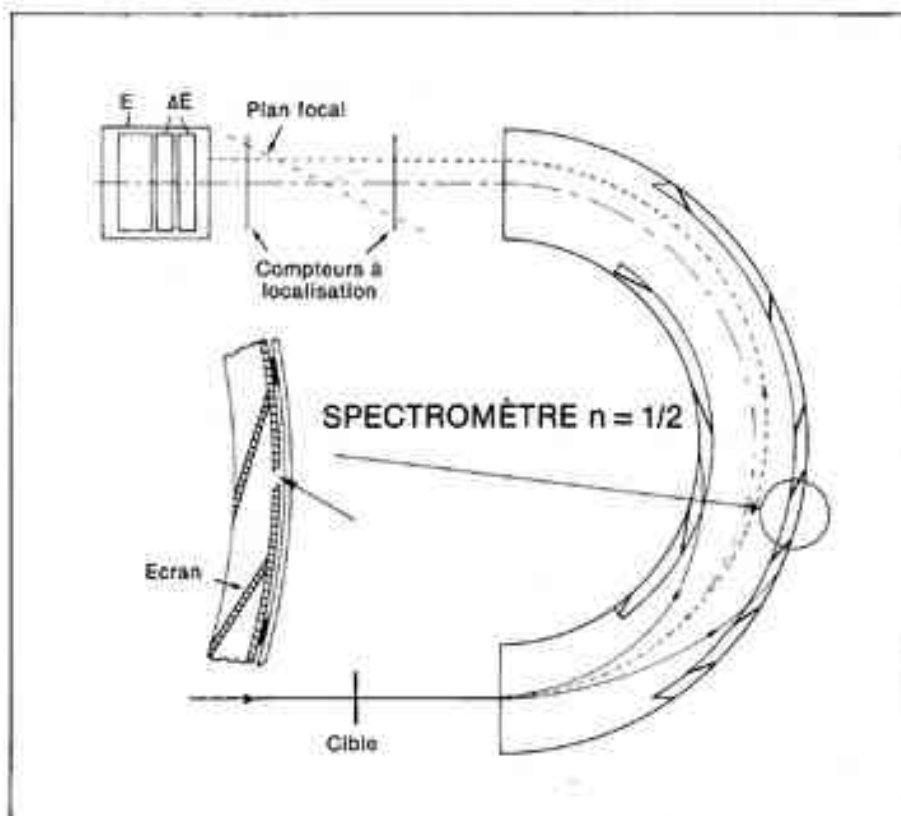


Fig. 5 - Dispositif expérimental, développé pour les expériences décrites.

tion et une chambre d'ionisation ; l'ensemble a été construit au laboratoire. Dans la chambre, l'anode collectrice est divisée en trois, de sorte que les ions traversent successivement trois cellules dans lesquelles sont mesurées les pertes ΔE_1 , ΔE_2 et l'énergie résiduelle E des particules, ce qui permet de les identifier sans ambiguïté.

Les deux compteurs à localisation, qui précèdent la chambre, mesurent avec une précision de 0,3 mm deux points de la trajectoire de chacun des ions. Par un calcul effectué en ligne, on en déduit la rigidité magnétique et

l'angle de la trajectoire avec une précision d'environ $0,3^\circ$. Le dernier aspect vraiment original de notre dispositif concerne la possibilité d'effectuer des mesures dans la direction du faisceau incident (0°). Dans ce but, l'intérieur de la chambre à vide de l'aimant est équipé d'un ensemble de pièges destinés à capter le faisceau incident, tandis que les ions qui résultent de la réaction sont conduits par l'aimant vers les détecteurs. Un système de volets limite le bruit de fond induit dans les détecteurs par l'impact du faisceau. Il s'agit de l'un des tous premiers dispositifs permettant des mesures à

0° avec une haute résolution. La qualité du filtre est exprimée par l'efficacité du tri d'un ion formé par une réaction parmi le grand nombre des ions incidents. Cette efficacité est ici de 10^{12} à 10^{13} selon l'écart en quantité de mouvement pour ces deux types d'ions (voir encart n° 3).

Encart n° 3

Système de filtrage des événements

Observer des produits de réaction à 0°, c'est tenter de regarder juste autour du soleil la lumière diffusée. Il faut filtrer les événements qui nous intéressent hors d'un flux associé au faisceau incident.

On comprendra avec les chiffres ci-dessous.

Le faisceau de ^{14}C a une intensité de 100 nA, soit environ 10^{11} ions/sec. Dans l'angle solide de 5 milliradians, à l'intérieur d'une plage d'impulsion $\Delta p/p \approx 15\%$ propre à l'aimant, on compte approximativement 3 000 événements/sec. (rejet 10^8), ce qui correspond principalement à des ions diffusés, le faisceau ayant été piégé dans l'un des capteurs (fig. 5).

Le système de double identification sélectionne quelques ions/minute (rejet 10^9).

Dans le pic des événements intéressants, on peut avoir des taux de comptage très faibles, de quelques événements/heure ou moins (rejet 10^4).

Le filtre a, au total, une efficacité de l'ordre de 10^{13} qui peut atteindre au mieux 10^{15} dans les cas les plus difficiles.

Cette valeur est à comparer avec les meilleures séparations chimiques, dont le pouvoir de rejet atteint 10^8 ou au mieux 10^9 . ■

Les ions sont triés grâce à un système de pièges qui permet de rejeter le faisceau incident.

Ces développements de la technique instrumentale ont permis d'étudier notamment l'isotope ^{48}Ni .

Nous allons voir ci-après les motivations de ce dernier développement.

Le terme « noyau exotique » dépend du temps, en ce sens que les frontières de noyaux connus reculent au fur et à mesure que progressent les moyens d'investigation. Dans le cas des réactions de transfert comme la suivante $^{70}\text{Zn} (^{14}\text{C}, ^{14}\text{O}) ^{48}\text{Ni}$, l'un des noyaux formés peut être inconnu, ici par exemple, celui de nickel 68. En appliquant les règles de la conservation de l'énergie, on peut, connaissant le spectre d'énergie des ions d'oxygène 16 à un angle donné, calculer la masse et les énergies d'excitation du noyau résiduel de nickel 68 ; mais la même réaction ($^{14}\text{C}, ^{14}\text{O}$) sur des noyaux contaminants des noyaux cibles, soit chimiques (l'oxygène et le carbone sont presque toujours présents), soit isotopiques (il est difficile de prétendre à une pureté à 100 %) donne lieu à des effets parasites beaucoup plus importants que ceux qui nous intéressent. La réalisation de cibles, chimiquement et isotopiquement pures est donc nécessaire. Des cibles de très haute « pureté » isotopique ont été préparées au Laboratoire René Bernas (LRB) du Centre de spectrométrie nucléaire et de spectrométrie de masse (CSNSM) d'Orsay et transportées sous vide dans la chambre à réaction du Tandem.

L'exemple du nickel 68

Nous allons illustrer, sur l'exemple du noyau de nickel 68 (^{68}Ni), les objectifs et les résultats apportés par ces développements instrumentaux.

Les isotopes du nickel ont une couche remplie en protons ($Z = 28$) et on suit de proche en proche, sur les isotopes de cet élément, le rôle joué par les neutrons. Pour un nombre magique de neutrons $N = 28$, le noyau est sphérique et rigide et au fur et à mesure du remplissage en neutrons, les isotopes se déforment. (Voir encart n° 4).

Nous avons étudié la réaction $^{70}\text{Zn} (^{14}\text{C}, ^{14}\text{O}) ^{48}\text{Ni}$ afin de mettre en évidence les propriétés inconnues de l'isotope de ^{48}Ni , car on y escomptait un renforcement de symétrie pour $N = 40$, valeur pour laquelle se posait la question d'une quasi-fermeture de couches en neutrons. Grâce à la préparation d'une cible de zinc 70 (^{70}Zn) au séparateur de masse, nous avons mis en évidence les deux premiers états excités du ^{48}Ni et mesuré son excès de masse, c'est-à-dire son énergie en liaison. Pour déterminer le spin du premier niveau excité, nous avons mis au point le dispositif permettant de mesurer précisément des répartitions angulaires des ions ^{14}O émergent de la réaction autour de 0°. Le résultat, présenté sur la figure 6, montre qu'on peut attribuer le spin 0 et par conséquent la parité + au premier état excité du ^{48}Ni . Il s'agit de la première attribution de spin à partir de réaction de transfert quasi élastique en ions lourds.

Cette valeur est très intéressante car le ^{48}Ni est ainsi l'un des quelques noyaux (8 au total) à avoir un premier état excité 0°. Cette caractéristique montre que la valeur $N = 40$ correspond à une quasi-fermeture de couche et que le noyau est presque sphérique dans son état fondamental ; en outre, une configuration où deux nucléons sont excités dans une couche supérieure se trouve très voisine en énergie et « mélangée » avec la configuration fondamentale. Une situation voisine était déjà observée dans le noyau de ^{112}Zr (zirconium), où le nombre des neutrons est magique $N = 50$.

Encart n° 4

Déformation des isotopes

La spectroscopie nucléaire apporte des informations sur certaines propriétés des noyaux comme leur forme, statique ou dynamique, leur moment magnétique, leur mode d'excitation collectif (rotation, vibration) ou individualisé (excitation d'une ou plusieurs particules) ; les nucléons obéissent à la statistique de Fermi et ils occupent des niveaux d'énergie qu'ils satureront progressivement. On parle de couches, par analogie avec l'atome. Sur la figure 7 on a représenté les niveaux des déformations quadrupolaires, forme dite soucoupe ou citrouille : les zones sont d'autant plus claires que les déformations sont importantes. On remarque au passage les régions très sombres qui correspondent à la fermeture des couches (nombres dits « magiques ») auxquels sont associées des formes semi-sphériques.

Les formes sont déduites des propriétés spectroscopiques des noyaux ; par exemple l'énergie d'excitation du premier niveau des noyaux magiques est nettement plus élevée que pour les noyaux voisins. D'autres déformations ont été établies correspondant à des formes dites cigare, poire, saucisse, etc. En outre, on évalue la rigidité d'un noyau qui exprime sa stabilité par rapport à une modification de la forme du potentiel, sa répartition de charge et de masse, sa compressibilité, etc. ■

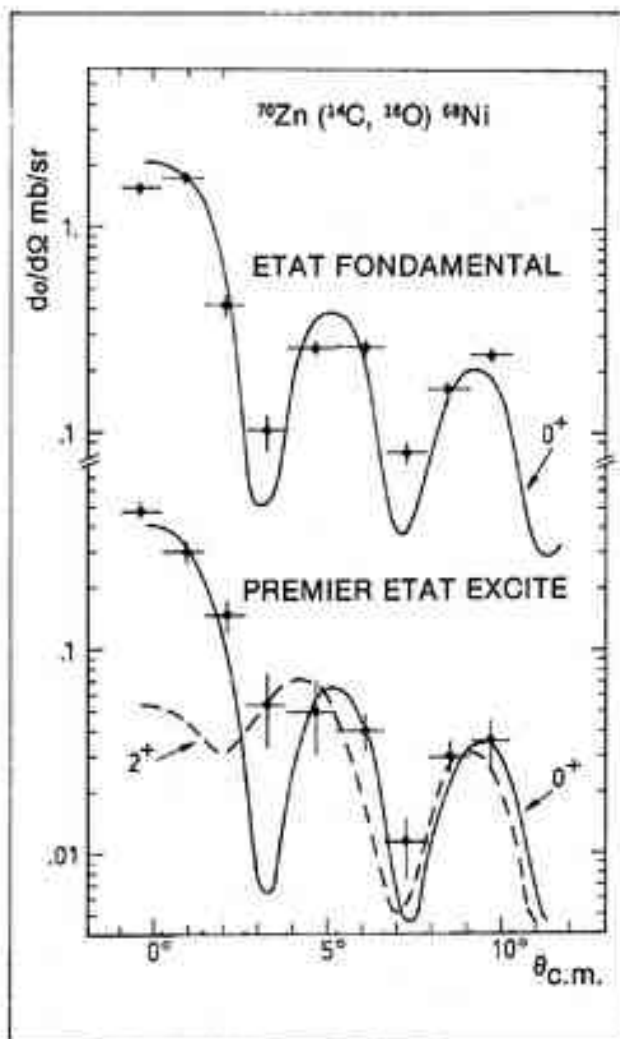


Fig. 6 - Distributions angulaires des ions ^{16}O associées aux premiers niveaux du ^{64}Ni . La courbe en trait plein correspond à un calcul théorique dans l'hypothèse où le spin de l'état formé est 0 et la parité positive. Par convention, 0° correspond à la direction suivie par les ions qui n'interagissent pas avec des noyaux cibles.

Des calculs théoriques ont été réalisés à propos de ce noyau par la méthode de Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) qui consiste en une suite d'itérations puits moyen $\rightarrow$ fonction d'onde $\rightarrow$ puits moyen $\rightarrow$, etc. Ils montrent que le noyau de ^{64}Ni est attendu sphérique et rigide dans son état fondamental et que le premier état excité 0^+ pourrait être un état isomère de forme.

Pour confirmer cette description, et préciser l'interprétation des deux états 0^+ , nous avons procédé à une étude de désexcitation $0_2^+ \rightarrow 0_1^+$. Bien que la probabilité de former le ^{64}Ni dans l'état excité 0_2^+ soit encore plus faible que pour l'état fondamental, nous avons mesuré sa désexcitation ; interdite par γ , elle procède par l'émission d'un ou deux électrons. Ce sont ces électrons dont nous avons déterminé la distribution dans le temps, grâce à une méthode de détection de grande efficacité. Les modèles théoriques relatifs à la structure nucléaire (voir encart n° 5), doivent rendre compte de la période de désexcitation $0_2^+ \rightarrow 0_1^+$ que nous avons déterminée $\tau \sim 211 \pm 40$ ns, ainsi que du rapport des sections efficaces des réactions qui conduisent à ces deux états 0^+ .

En effet, les calculs mentionnés reproduisent bien la période, mais en ce qui concerne le rapport des sections efficaces, la théorie des réactions nucléaires reste trop rudimentaire pour que le test constitue la preuve que la structure est bien décrite.

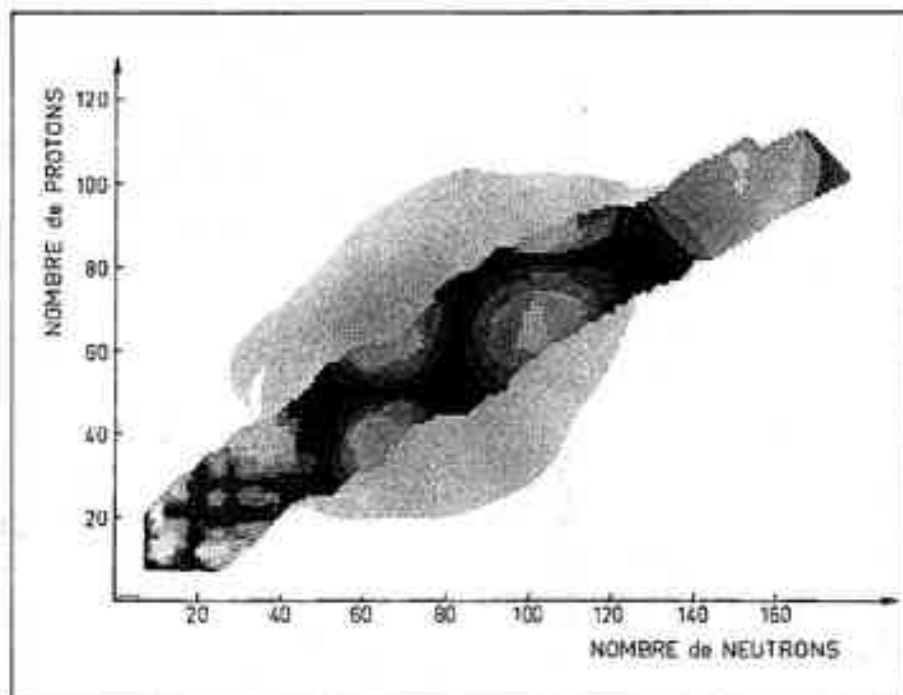


Fig. 7 - Déformations nucléaires dans l'état fondamental. En noir les noyaux sont presque sphériques et leur déformation augmente avec l'éclaircissement. Au maximum d'éclaircissement correspondent des ellipsoïdes aplatis selon le plan perpendiculaire à l'axe de rotation soit, si a et b sont les deux longueurs axiales de l'ellipsoïde, $a/b \approx 1.4$.

Modèles théoriques

Les calculs théoriques relatifs à la structure des nouveaux noyaux ^{66}Ni , ^{72}Zn et ^{42}Fe ont été menés au laboratoire du CEA de Bruyères-le-Châtel par Michel Girod à l'aide de la méthode Hartree-Fock-Bogolubov (HFB).

Il s'agit d'un calcul « self-consistant » qui permet de déterminer la fonction d'onde d'un noyau à partir d'une interaction effective (en l'occurrence celle de D. Gogny). Ce calcul HFB est effectué sous contrainte de déformation quadrupolaire.

Dans le cas présent, les théoriciens ont montré que le noyau de ^{66}Ni est attendu sphérique et rigide dans l'état fondamental et que le premier excité serait un isomère de forme. Les fonctions d'onde collectives sont détaillées et complexes et l'interprétation de l'élément de transition entre les deux niveaux 0⁺ a demandé un gros effort de calcul qui a servi par ailleurs pour rendre compte des résultats récents en diffusion inélastique d'électrons obtenus à l'ALS de Saclay. Dans notre cas, la valeur qui résulte de ce calcul, $\tau_{\text{ex}} = 330$ ns, est en bon accord avec la valeur mesurée $\tau_{\text{ex}} = 211 \pm 40$ ns. ■

Nous avons pu, par cette méthode, étudier d'autres noyaux riches en neutrons, éloignés de la vallée de stabilité par quatre ou cinq unités de masse et mesurer leur masse et leur spectre ; il s'agit des isotopes ^{66}Ge , ^{74}Zn , ^{72}Zn , ^{62}Ni et ^{42}Fe : les noyaux de ^{66}Ni et de ^{72}Zn ont été observés pour la première fois.

Contrairement aux récents résultats obtenus au GANIL par la fragmentation du projectile, ce genre d'étude ne permet pas des excursions très éloignées de la vallée de stabilité : elle permet par contre d'obtenir des données fondamentales sur les noyaux, comme la masse, l'énergie et éventuellement le spin des premiers états excités, offrant un test sensible aux différents modèles théoriques. Des expériences de mesure de masse avec grande précision sont menées auprès d'autres tandems pour des raisons déjà mentionnées, notamment à Heidelberg (RFA), Darresbury (Royaume-Uni) et Canberra (Australie) et auprès des cyclotrons (Texas-ANM et MSU aux États-Unis). Une tradition dans ce domaine existe aussi au I.B.I. (États-Unis) où de nouveaux modes de désexcitations exotiques ont été mis en évidence.

Enfin, il faut ajouter que c'est par la spallation de la cible à l'aide de protons de 20 GeV au CERN et plus récemment par fragmentation de projectiles lourds au GANIL qu'ont été mis en évidence les noyaux les plus extraordinaires tels les ^{11}Na ou ^{12}C , par exemple.

Ainsi, malgré l'impossibilité actuelle de résoudre exactement le problème à N corps, on conçoit que la compréhension de l'architecture nucléaire progresse par la confrontation des mesures et des développements théoriques appropriés au fur et à mesure que s'étend le paysage des noyaux connus. ■

En liaison avec l'Institut de physique nucléaire, un film a été réalisé sur « les noyaux exotiques » par le laboratoire du cinéma scientifique - CEPCO (Orsay) - en co-production avec le CNRS-Audiovisuel. Ce film a reçu, entre autres, le grand prix du Jubilé du 25^e Festival international « Technifilm 87 » qui a eu lieu en Tchécoslovaquie en octobre 1987. Il vient également d'être primé au 1^{er} festival scientifique de Pékin.

Glossaire

Emittance : il s'agit du produit de l'angle d'ouverture par la surface de la section d'un faisceau. Cette propriété est conservée dans le transport par des champs électriques et magnétiques (théorème de Liouville).

Excès de masse : écart entre la masse d'un noyau d'une part mesurée et, d'autre part, calculée en multipliant le nombre de nucléons par l'unité de masse atomique, c'est-à-dire le douzième de la masse du ^{12}C . Cette différence reflète l'énergie de liaison caractéristique de l'isotope puisque masse et énergie sont équivalentes.

Isomère : il s'agit d'un état excité d'un noyau dont la période propre est suffisamment longue pour être mesurée. La raison peut en être une différence entre les formes des deux états, état excité et fondamental — on parle d'isomères de forme.

Isotopes : ce sont des noyaux qui ont même Z et dont le nombre de neutrons est différent. On parle, par exemple, des isotopes du calcium.

Nombre magique : c'est un nombre de nucléons tel que la dernière « couche » du potentiel soit remplie.

Nucléon : désigne indifféremment proton ou neutron.

Période nucléaire : c'est la durée τ , nécessaire pour qu'un ensemble statistique évolue d'un nombre d'éléments N à un nombre N/2.

Rigidité magnétique : cette quantité $B\rho$ caractérise un aspect du mouvement d'une particule chargée, à savoir son impulsion $p = mv$, m étant la masse et v la vitesse : il s'agit du rayon ρ de la trajectoire qu'elle emprunte lorsqu'elle traverse un champ magnétique d'intensité B. En effet, le produit $B\rho$ est proportionnel à p/q , si q est le nombre de charge électrique de l'ion, d'après la loi de Lenz.

Spin : c'est le moment angulaire du noyau qui résulte des couplages des moments angulaires, intrinsèques et orbitaux des nucléons. Pour les noyaux pair-pair, le spin de l'état fondamental est toujours 0 car ainsi les symétries sont optimales et l'énergie potentielle se trouve minimisée, ce qui entraîne une parité positive.

Des données fondamentales des noyaux sont ainsi obtenues : excès de masse, énergie d'excitation, valeur du spin.

GEOSCOPE

Le réseau sismologique global GEOSCOPE, créé en 1982, sera terminé en 1989. Il permettra de mieux connaître la composition et la structure interne de la Terre ainsi que les processus à l'origine des tremblements de terre.

Barbara ROMANOWICZ, Michel CARA

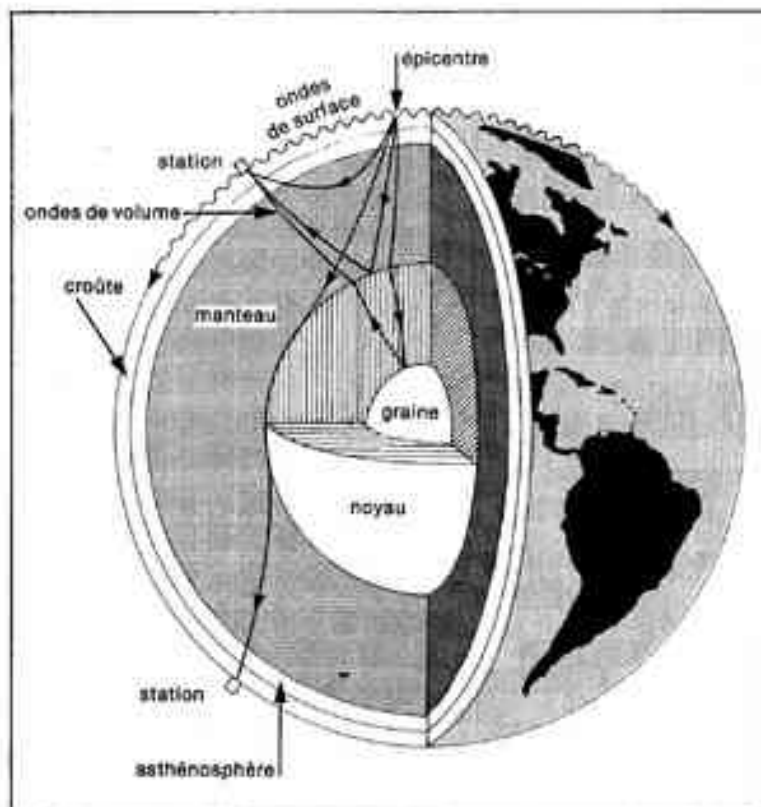


Fig. 1 - Coupe schématisée de l'intérieur de la Terre, indiquant les trajets suivis par les ondes sismiques : ondes « de surface » dont l'énergie est concentrée près de la surface de la Terre, ondes « de volume » qui traversent la Terre dans son volume.

Les réseaux sismologiques globaux constituent un outil fondamental pour l'investigation de la structure profonde de notre globe et des processus à la source des tremblements de terre.

C'est en 1983 que le sismologue britannique John Milne a, pour la première fois, fait remarquer qu'un fort séisme pourrait, moyennant une instrumentation appropriée, être observé en tout point du globe. Six ans plus tard, E. von Reubeur Paschwitz fit le rapprochement entre les vibrations enregistrées sur des sismographes situés en Allemagne et l'occurrence simultanée d'un fort séisme au Japon. Ainsi est née la sismologie dite « globale », outil puissant pour l'investigation de la structure profonde de notre planète et la compréhension des processus physiques à la source des tremblements de terre.

La sismologie globale

Trois effets se combinent pour produire un enregistrement sismique donné (fig. 1) : l'effet de la source sismique, qui engendre les ondes observées, l'effet de la structure traversée entre la source et le lieu d'observation, dont les propriétés élastiques et anélastiques affectent la vitesse de propagation des ondes et leur amplitude, enfin l'effet de l'instrument de mesure,

ou réponse instrumentale. L'étude des propriétés de la source sismique est donc tributaire de la connaissance de la structure profonde et vice versa. L'histoire de la sismologie procède sans cesse en va-et-vient entre ces deux pôles.

Dès le début du siècle, avec des instruments rudimentaires, mais à condition de disposer d'une base de temps absolue précise, il a été, par exemple, possible de mesurer le temps de parcours des ondes de « volume » à travers le globe. C'est par l'étude de ces temps de parcours qu'on a pu en particulier déterminer, entre 1900 et 1914, les grandes structures de l'intérieur de la Terre : croûte, manteau, noyau.

A partir des années cinquante, avec les améliorations instrumentales et l'avènement des calculateurs électroniques, une nouvelle forme de sismologie est apparue. L'analyse des périodes de vibrations propres de la Terre, obtenues à partir de plusieurs jours d'enregistrements « longue période » (périodes de quelques dizaines de secondes à plus d'une heure), a permis de raffiner les modèles élastiques « moyens » de l'intérieur de la Terre. Il est probable que les paramètres physiques de la Terre ne s'écartent jamais plus que de quelques pour cents de ceux des modèles standards à symétrie sphérique, dès que l'on quitte le domaine superficiel de la croûte.

Ce sont cependant ces quelques « pour cents » qui nous intéressent à l'heure actuelle. En effet, une imagerie tridimensionnelle des vitesses sismiques dans l'ensemble du manteau terrestre nous permettrait de remonter à la distribution des températures et des densités et de comprendre la nature et le fonctionnement des courants de convection que l'on pense être à l'origine de la tectonique des plaques et des phénomènes naturels associés, tels les séismes et les éruptions volcaniques.

Pour réaliser, par des méthodes sismologiques, une telle « tomographie », il faut disposer d'une collection d'enregistrements correspondant à une grande variété de trajets source-station, couvrant l'ensemble du globe et obtenus avec des instruments bien étalonnés et, de préférence, semblables. Or, il fallut attendre les années soixante pour que soit établi le premier véritable réseau sismologique global aux réponses instrumentales standardisées : le réseau américain WWSSN (World Wide Standard Seismographic Network), qui compte une centaine de stations réparties globalement et totalisant plus de vingt années de fonctionnement.

Ce réseau a permis des progrès considérables, notamment dans la détermination, à

■ Barbara Romanowicz, directeur de recherche au CNRS, Institut de physique du globe de Paris (INSU 2), université de Paris VI, tour 14, 4, place Jussieu, 75230 Paris Cedex 05.

■ Michel Cara, professeur à l'Université de Strasbourg I, Institut de physique du globe de Strasbourg (INSU 11), université de Strasbourg I, 5, rue René Descartes, 67084 Strasbourg.

l'aide des ondes de surface de longue période, des différences structurales systématiques à l'échelle de la lithosphère et de l'asthénosphère, entre provinces tectoniques distinctes. Il a aussi permis l'étude des grands séismes, montrant une cohérence remarquable des mouvements de failles dans certains contextes tectoniques. Deux obstacles majeurs restaient néanmoins à surmonter : la faible dynamique des systèmes analogiques, comme ceux équipant le réseau WWSSN, et les difficultés considérables liées à la numérisation manuelle des traces sismiques enregistrées sur papier photographique.

Il ne s'agit là que de résultats très préliminaires. Les données utilisées — mode fondamental, peu résolvant en profondeur, observé sur les seules composantes verticales du mouvement du sol — sont insuffisantes pour explorer de manière fine l'intérieur du manteau. Déjà, des équipes américaines, japonaises et françaises commencent à exploiter les modes de vibration observés sur les composantes horizontales du mouvement du sol. Elles ont en particulier montré que le manteau terrestre ne pouvait plus être considéré comme un corps isotrope. Il est pratiquement acquis que ce comportement anisotrope est dû à des orientations préféren-

Le réseau GEOSCOPE

Le réseau sismologique global GEOSCOPE a pour but l'étude des structures internes à grande échelle du Globe ainsi que celle des processus aux sources des grands tremblements de terre. Il a vu le jour en 1982 sous les auspices de l'Institut national des sciences de l'univers (INSU) et voit sa réalisation au sein de l'Institut de physique du Globe de Paris en coopération avec l'Institut de physique du Globe de Strasbourg. Il compte actuellement 16 stations et progresse au rythme de 3 à 4 stations par an. Son existence est rendue possible par la coopération internationale avec de nombreux organismes (pour les stations déjà installées : Observatoire Volcanique de la Réunion ; CRAAG en Algérie ; Massachusetts Institute of Technology, Etats-Unis ; ISERST, Djibouti ; Centre ORSTOM en Guyane, à Nouméa et au Sénégal ; TAAF à Kerguelen, Crozet et Dumont d'Urville ; Tsunami Warning Center à Hawaï ; Université de Nagoya au Japon ; I.D.G. à Tahiti ; Observatoire Volcanologique du Costa Rica).

Depuis le début de l'année 1984, il bénéficie de la participation de la Division technique de l'INSU, chargée plus particulièrement des problèmes d'enregistrement et de télétransmission des données, et voit actuellement son cadre élargi, avec la participation de l'ORSTOM, qui finance et réalise la construction de la cave sismique en Nouvelle-Calédonie ainsi que deux stations en Afrique, et du CNES, qui finance la télétransmission de la station de Guyane. Sur le plan international, l'Université de Californie à Santa Cruz a en partie financé et accueilli en juin 1986 une station GEOSCOPE ; et plusieurs organismes européens se proposent de contribuer, en ajoutant les données de leurs stations équipées des mêmes sismomètres, à la collection des données GEOSCOPE rassemblées au Centre de données de l'IPG de Paris (ETH de Zurich, Observatoire de Schillach en Allemagne fédérale). Par ailleurs, la participation financière et technique d'autres organismes étrangers est en cours de négociation.

Grâce aux progrès technologiques tels l'enregistrement digital et le traitement rapide des données sur ordinateur, on a pu obtenir tout récemment les premiers modèles tridimensionnels du manteau terrestre.

Ceux-ci sont encore très préliminaires et devront être affinés pour permettre de mettre en évidence les caractéristiques de la convection du manteau.

Un effort d'instrumentation s'impose : la France a pris, dès 1982, l'initiative de la réalisation d'un réseau global nouveau, GEOSCOPE, utilisant des technologies de pointe.

C'est seulement depuis une dizaine d'années que l'enregistrement digital, sur support magnétique directement utilisable par ordinateur, a été introduit en sismologie globale. Les stations longue période du laboratoire de sismologie de l'Institut de physique du Globe (IPG) de Paris, installées en France (1), au début des années 1970 font office de pionniers dans ce domaine. Elles ont en particulier fourni quelques-uns parmi les rares enregistrements non saturés suivant le séisme d'Indonésie de 1977. Ce sont cependant deux réseaux américains, le réseau très longue période IDA (International Deployment of Accelerographs) de la Scripps Institution of Oceanography, et le réseau hétérogène GDSN (Global Digital Seismic Network) de l'USGS qui ont fourni l'essentiel de la collection de données longue période qui a servi de base à la première cartographie globale tridimensionnelle du manteau supérieur. Deux études, menées l'une à l'université de Harvard, l'autre au California Institute of Technology, ont ainsi permis de confirmer des travaux antérieurs qui tendaient à montrer que les différences de structure entre océans et continents étaient confinées aux deux ou trois cents premiers kilomètres de profondeur. Au-delà de quatre cents kilomètres, ces études montrent que la corrélation disparaît, laissant place à une structure plus simple.

tielles de cristaux dans les déformations cisailantes engendrées par la convection mantellique. On disposerait là d'un « traceur » de la convection profonde.

Afin d'utiliser au mieux les informations contenues dans les vibrations engendrées sur le globe entier par les forts séismes, un effort instrumental s'imposait. La France a pris l'initiative, dès 1989, d'amorcer la réalisation d'un réseau global en utilisant des technologies de pointe (2). Les Etats-Unis commencent à leur tour à financer un réseau global de grande envergure dans le cadre du consortium IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology). Compte tenu des choix technologiques faits pour GEOSCOPE, il paraît clair que les deux réseaux seront compatibles et géographiquement complémentaires.

La sismologie « large bande » et les sismomètres STS

Les sismomètres mis au point il y a une dizaine d'années à l'E.T.H. (Eidgenössische Technische Hochschule) de Zurich, par E. Wielandt (3), ont été choisis pour les stations du réseau GEOSCOPE. Ils sont basés sur le principe de la balance de force : tout écart de la masse par rapport à sa position d'équilibre est contrebalancé par un système de forces

Les sismomètres qui équipent les stations GEOSCOPE, sont d'une conception nouvelle et possèdent des propriétés remarquables de linéarité et de stabilité ainsi qu'une grande dynamique dans une large bande de fréquences.

Les sismomètres permettent en particulier d'étudier les signaux sismiques dans la bande de période 1 à 10 secondes, jusqu'ici peu accessible.

Les enregistrements des sismomètres sont traités pour constituer des bandes-réseau disponibles aux utilisateurs.

électromagnétiques facilement converties en tensions électriques. Ils ont la particularité de transcrire les vibrations du sol dans une large bande de fréquences (de 5 Hz au continu). Caractérisés par un bruit instrumental faible, ils possèdent en outre une grande dynamique (140 Db) permettant d'une part d'enregistrer sans saturation les forts signaux provenant des plus gros séismes et, d'autre part, d'enregistrer les faibles signaux, à la limite du bruit de fond permanent que l'on s'efforce de minimiser par le choix du site de la station.

Ces appareils à « large bande » et grande dynamique permettent par ailleurs d'étudier les signaux sismiques dans la bande de périodes

contraintes financières deviennent alors draconiennes pour le sismologue et c'est seulement par le biais de coopérations internationales ou par l'utilisation de réseaux mobiles, complémentaires au réseau fixe GEOSCOPE, que l'on pourra progresser dans cette voie.

La configuration du réseau GEOSCOPE

Le réseau GEOSCOPE comptera d'ici à deux ans vingt-cinq stations équipées de trois sismomètres large bande STS (un vertical, deux horizontaux) et de systèmes d'enregistre-

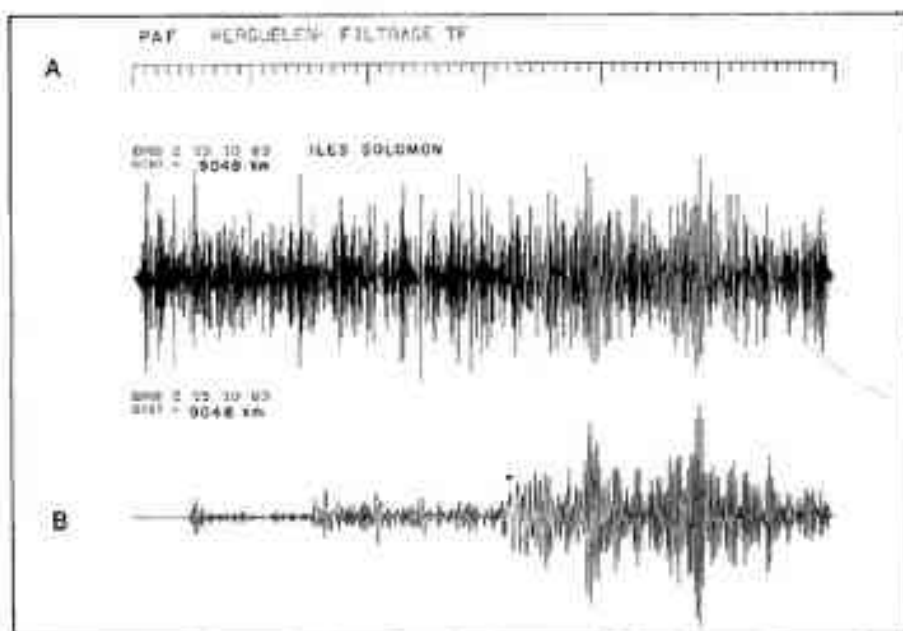


Fig. 2 - Exemple d'enregistrement « large bande » à la station GEOSCOPE de Kerguelen, placée sous la responsabilité de l'Institut de physique du globe de Strasbourg. A : avant filtrage ; les vibrations sismiques sont noyées dans le bruit microsismique. B : après filtrage, mise en évidence d'un séisme ayant eu lieu à 5 000 kilomètres de distance.

une à dix secondes. Cette bande de périodes était jusqu'à présent peu utilisée en sismologie globale compte tenu de la forte agitation microsismique d'origine océanique vers six secondes de période (fig. 2). Seuls les enregistrements digitaux à grande dynamique et large bande passant permettent, par des dispositifs de filtrage appropriés, de travailler dans cette bande de fréquences. Or celle-ci contient des informations précieuses aussi bien sur le détail du processus de rupture à la source sismique, que sur la structure profonde de notre globe, grâce en particulier aux ondes réfléchies et réfractées sur les discontinuités du manteau, ouvrant la perspective d'une cartographie détaillée de celles-ci et de régions encore mal connues telle la région « D » à la base du manteau. Les enregistrements digitaux « large bande » ouvrent ainsi aux sismologues tout un domaine d'investigation encore très peu exploité.

Il reste néanmoins une difficulté liée à l'enregistrement digital des signaux « large bande » : le pas d'échantillonnage doit être suffisamment serré pour reproduire fidèlement les hautes fréquences. Ceci implique une grande quantité d'informations numériques à stocker. C'est là qu'intervient l'évolution rapide actuelle des supports de stockage d'information digitale. Corrélativement, une bonne utilisation des sismomètres large bande nécessite d'augmenter la densité spatiale des observations, donc le nombre des stations. Les

ment digital sur support magnétique. Une partie des données est simultanément télétransmise au Centre de données GEOSCOPE à l'IPO de Paris, en liaison avec la direction technique de l'Institut national des sciences de l'univers (INSU) de Saint-Maur. Ce centre est chargé de l'archivage et de la distribution des données du réseau. Celui-ci compte actuellement seize stations et trois sont en cours d'installation (fig. 3).

L'enregistrement se fait en parallèle dans deux bandes de fréquence : très longues périodes (VLP - périodes supérieures à 60 sec.), en continu, actuellement réalisé dans toutes les stations et dès leur installation, et « large bande » (BRB - périodes de 1 à 100 sec.), sur détection d'événements, implémenté progressivement depuis le début de l'année 1985, actuellement réalisé dans huit stations.

Les sismomètres et leur électronique sont placés de préférence dans une cave sismique préexistante construite à quelques mètres de profondeur, dans un sol stable dans la mesure du possible, protégée de l'influence du vent et éloignée des sources de perturbations humaines.

Le système d'enregistrement est placé dans un local abrité, à proximité de la cave sismique ou, lorsque cela n'est pas possible, en vue de celle-ci, de manière à pouvoir transmettre jusqu'à lui les données sortant des sismomètres par liaison hertzienne numérique. Le local

d'enregistrement est le plus souvent un observatoire appartenant à un organisme qui met à la disposition de GEOSCOPE son personnel technique pour surveiller, à intervalles réguliers (1 ou 2 semaines) le bon fonctionnement de la station et expédier les enregistrements numériques (sur cartouche magnétique pour la plupart). Le seul point délicat de cette tâche est le contrôle de l'heure, qui doit être effectué minutieusement (le plus souvent, par comparaison avec le système international de navigation Oméga). Les enregistrements sont renvoyés par voie postale au Centre de données GEOSCOPE, où elles sont décodées, vérifiées et transcrites pour constituer des bandes-

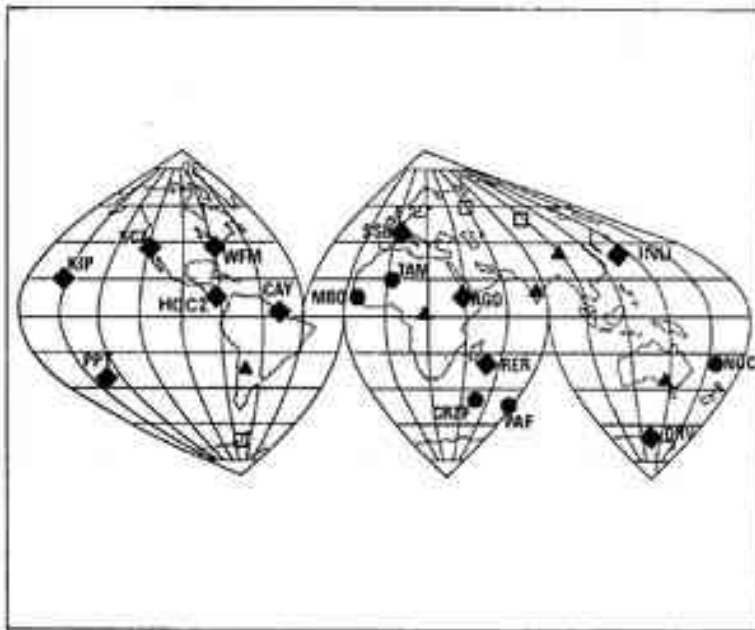


Fig. 3 - Distribution géographique des stations existantes et prévues du réseau GEOSCOPE (1^{er} octobre 1987).
 ● Stations enregistrant la sortie VLP (très longues périodes, supérieures à 60 secondes).
 ▲ Stations enregistrant à la fois les sorties VLP et BRB (large bande).
 □ Stations dont l'installation est prévue en 1987-1988.
 □ Sites prévus pour les installations futures.

Les données accumulées ont déjà permis de constituer une deuxième génération de modèles tridimensionnels globaux du manteau supérieur.

Le projet GEOSCOPE, ainsi que des projets similaires en cours dans d'autres pays, sont coordonnés par la Fédération des réseaux sismiques large bande.

réseau contenant les données de toutes les stations pour une période de temps déterminée, mises à la disposition des utilisateurs intéressés.

Certaines stations, enfin, sont équipées de systèmes d'enregistrement comprenant un mini-ordinateur permettant la télétransmission en temps quasi réel des données vers le Centre GEOSCOPE parisien, à travers les réseaux internationaux de transmission de données. Cet aspect original du projet a fait ses preuves en permettant l'accès immédiat aux données, en cinq stations des plus forts séismes de ces deux dernières années (Chili, mars 1985, Mexique, septembre 1985, Roumanie, août 1986, par exemple). Un des objectifs du projet désormais atteint, est de télétransmettre les données d'une dizaine au moins de stations du réseau, évitant les délais postaux et permettant d'intervenir immédiatement en cas de panne à la station. Une liaison avec le site central du ReNaSS (Réseau national français de surveillance sismique), installé à l'IPG de Strasbourg, devrait par ailleurs permettre de réaliser une surveillance vingt-quatre heures sur vingt-quatre des gros séismes survenant sur le globe.

Les stations existantes du réseau GEOSCOPE ont dès à présent permis d'accumuler une importante collection de données « très longue période » sur les trois composantes du mouvement du sol (4). Celles-ci permettront de contribuer à la deuxième génération de modèles

les tridimensionnels globaux à grande échelle du manteau supérieur, grâce en particulier à la possibilité d'exploiter de nombreux modes harmoniques d'ondes du manteau, très résolus en profondeur. La figure 4 (voir au dos de la couverture) montre par exemple les résultats d'une analyse des fréquences propres du mode fondamental sphéroïdal mesurées à partir des enregistrements de forts séismes sur les stations du réseau GEOSCOPE. Cette analyse donne accès à une estimation de la distribution géographique de « fréquences locales » tout du moins leur partie paire, symétrique par rapport au centre de la Terre, elles-mêmes représentant une intégrale suivant la profondeur des effets de la structure profonde sous le point considéré à la surface du globe. L'exemple fourni, à une période de 200 secondes montre l'effet dominant d'une hétérogénéité d'ordre 2 (en termes de développement en harmoniques sphériques) dont l'origine est attribuée à la zone de transition du manteau (400 - 700 km de profondeur) et qui serait liée au régime de convection à grande échelle dans le manteau.

C'est une collection de données large bande et longue période de première qualité que se propose de fournir à la communauté internationale, en pionnier, le projet GEOSCOPE. Des projets similaires sont en cours de lancement dans d'autres pays (projet IRIS aux États-Unis, ORFEUS en Europe). Au niveau international tous ces projets sont coordonnés dans une Fédération de réseaux sismiques large bande (FDSN) fondée en août 1986.

GEOSCOPE est ainsi un instrument-clé pour répondre à certaines questions fondamentales de la géophysique actuelle : d'où viennent les matériaux extrudés le long des rides médio-océaniques ? Qu'advient-il des plaques plongeant en profondeur dans les zones de subduction ? Y a-t-il une seule, deux ou trois couches superposées de convection mantellique ? Quelle est l'origine des « points chauds » hors des limites de plaques, telle la chaîne de volcans de Hawaii ?

En liaison avec le centre strasbourgeois chargé de la surveillance sismique en temps réel, le réseau GEOSCOPE permettra également de progresser dans la connaissance détaillée des processus à la source des tremblements de terre et de fournir rapidement des informations en cas de gros séismes.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) Blum (P.A.) and Gannon (R.) (1971) « Détection et traitement des ondes sismiques de très basse fréquence » *Ann. Géophys.*, 27, 11, 123-140.
- (2) Romanowicz (B.), Cara (M.), Fels (J.F.) and Rouland (D.) (1984) « GEOSCOPE : a french initiative in long period, three component global seismic network », *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, 65, 753-754.
- (3) Wielandt (E.) and Streckeis (G.) (1982) « The leaf spring seismometer : design and performance », *Bull. Seism. Soc. Am.*, 72, 2349-2368.
- (4) Roubé (G.) and Romanowicz (B.) (1984) « Very long period data from the GEOSCOPE network : preliminary results on great circle averages of fundamental and higher Rayleigh and Love modes », *Bull. Seism. Soc. Am.*, 74, 2221-2243.
- (5) Romanowicz (B.), Roubé (G.) et Kohl (T.), (1987) « The upper mantle degree two pattern : constraints from GEOSCOPE fundamental spheroidal mode eigenfrequency and attenuation measurements » *Geophys. Res. Lett.*, in press.

Une plaquette de présentation du programme GEOSCOPE (8 pages couleurs) sera disponible à partir de février 1988 auprès de Mme C. Grappin, département TOAE-INSU, 15, quai Anatole France, 75700 Paris.

La rage, un problème actuel

La rage, connue depuis la Haute Antiquité, est peut-être, de toutes les affections susceptibles d'atteindre l'homme, une de celles qui suscite le plus de terreur ; loin d'être éliminée, elle est actuellement présente sur tous les continents, excepté l'Australie.

Anne FLAMAND

De nos jours, on continue à mourir de la rage dans la plupart des pays en voie de développement.

La contamination se fait par la salive de l'animal enragé. Le virus atteint les terminaisons nerveuses, puis la moelle épinière et parvient au cerveau.

Les troubles, d'ordre psychique et physique, aboutissent généralement à la mort.

Une compréhension des interactions que la glycoprotéine G établit avec les constituants de la cellule nerveuse permet une approche moléculaire de la virulence.

Le virus muté ne reconnaît plus les récepteurs présents à la surface de certaines terminaisons nerveuses.

La grande notoriété des travaux de Pasteur a paradoxalement fait disparaître la rage de l'actualité et l'on considère généralement qu'il s'agit d'un problème résolu. Or, il n'en est rien et l'on continue de nos jours à mourir de rage dans la plupart des pays en voie de développement faute de vaccins appropriés et faute de comprendre le déroulement de la maladie. De plus, la faune sauvage de tous les continents, sauf l'Australie, véhicule la rage à l'état endémique et représente un danger permanent de contamination des animaux domestiques.

L'agent infectieux est un virus de la famille des rhabdovirus (voir encart n° 1). La contamination qui se fait par la salive de l'animal enragé exige que le virus soit introduit sous la peau à la suite d'une morsure, ou déposé sur une muqueuse ou une peau légèrement écorchée. Ceci lui permet d'atteindre des terminaisons nerveuses dans lesquelles il pénètre directement, ou après un certain nombre de cycles de multiplication au site d'inoculation. Après son entrée dans les nerfs périphériques, le virus transite par la moelle épinière et arrive au cerveau en un temps variant de quelques jours à quelques semaines. Il envahit alors rapidement toute la substance grise puis redescend par les nerfs périphériques. C'est alors que les symptômes apparaissent (fig. 1). Ils sont d'ordre psychique : changement de comportement, anxiété, agressivité, refus de s'alimenter, et physique : perte de poids, troubles neuromusculaires avec perturbation de la motricité générale allant progressivement jusqu'à la paralysie complète et la mort, selon un enchaînement quasi inéluctable.

Ces troubles sont certainement liés à des modifications du métabolisme des neurones infectés. Mais on pense aussi que cette maladie a une composante immunopathologique. Le système immunitaire protège certainement au début de l'infection puis son intervention devient délétère lorsque le système nerveux est envahi. Au laboratoire, les animaux immunodéficients ou immunodéprimés sont plus sensibles à la maladie mais ils meurent plus lentement et avec des symptômes différents.

Approche moléculaire de la virulence

Les caractéristiques structurales du virion (voir encart n° 1) sont telles que la seule protéine virale qui soit extérieure est la glycopro-

téine G. Elle a de ce fait une importance particulière dans le déroulement de l'infection rabique : elle est certainement responsable du tropisme du virus pour certains types de cellules ainsi que du déclenchement de la synthèse d'anticorps neutralisants. Son intégration dans les membranes des neurones infectés est susceptible d'entraîner leur dysfonctionnement ou leur mort, directement ou par l'intermédiaire du système immunitaire. Une approche moléculaire de la virulence passe donc par une compréhension des interactions que cette protéine établit avec les différents constituants de la cellule nerveuse.

On connaît la séquence de la glycoprotéine de trois souches fixes de rage (voir encart n° 2) et comme on pouvait s'y attendre, ces protéines présentent beaucoup d'analogie entre elles et ont toutes les caractéristiques des protéines membranaires. Elles sont toutes les trois composées de 505 acides aminés plus un peptide signal, découpé après l'insertion de la molécule naissante dans les membranes internes de la cellule. Entre les acides aminés 439 et 461 s'étend une région hydrophobe qui doit correspondre à l'ancrage de la protéine dans la membrane lipidique de la cellule ou du virion, la plus grande partie de la protéine étant à l'extérieur de cette membrane.

Plusieurs mutations dans la glycoprotéine peuvent modifier complètement les propriétés du virus. Par exemple, nous avons démontré qu'on pouvait sélectionner, avec certains anticorps monoclonaux neutralisants, des mutants qui étaient incapables de tuer les animaux adultes. Ces mutants sont tous affectés dans la glycoprotéine au niveau de l'arginine 333 qui peut être substituée en glutamine, glycine ou isoleucine. Cette mutation n'a apparemment aucune répercussion sur la multiplication du virus en culture de cellules *in vitro* mais modifie sa capacité de pénétrer dans certaines cellules hautement spécialisées telles que les neurones du parasympathique. L'hypothèse la plus simple est que le virus muté ne reconnaît plus les récepteurs présents à la surface des terminaisons nerveuses correspondantes. Il reste cependant capable de pénétrer dans d'autres catégories de neurones comme, par exemple, les neurones sensoriels du muscle.

Y a-t-il un récepteur du virus rabique ? Certains auteurs ont avancé que le virus rabique pourrait reconnaître le récepteur nicotinique de l'acétylcholine. Les résultats obtenus sur la pénétration du virus chez la souris suggèrent une situation plus complexe. Parmi les voies d'entrée du virus, deux sont en effet cholinergiques mais de type muscarinique ou nicotinique et la nature des autres est inconnue. Par

■ Anne Flamand, directeur de recherche au CNRS, directeur du Laboratoire de génétique des virus (LP 241) du CNRS, Centre national de la recherche scientifique, 91190 Gif-sur-Yvette.

L'agent infectieux

C'est un virus ARN de la famille des rhabdovirus. Il partage les caractéristiques morphologiques des autres membres de la famille, à savoir une forme en obus hérissée de spicules (fig. 2). La dimension totale des particules se situe entre 80 et 100 nanomètres (nm) de large et 160 à 200 nm de long. Les virions sont constitués de 1 à 2 % d'ARN, 3 à 4 % de sucres, 15 à 20 % de lipides et 75 à 80 % de protéines. Le génome est une molécule d'ARN simple chaîne, de $4,6 \times 10^4$ daltons, qui code pour les cinq protéines constituant le virion. Cet ARN sert de matrice pour la synthèse des messages viraux ; il est donc de polarité négative selon la définition habituellement admise. Il est enveloppé dans une structure protéique enroulée en hélice, la nucléocapside, constituée des protéines N, L et M1. La protéine L est probablement la transcriptase, c'est-à-dire l'enzyme capable de fabriquer de l'ARN à partir d'une matrice ARN (activité qui n'existe pas dans les cellules non infectées). Associée à la protéine M1, elle assure la synthèse des différentes catégories d'ARN viral. La nucléocapside est entourée d'une membrane constituée de lipides et de deux protéines codées par le virus, G et M2. La protéine G, une glycoprotéine, porte une ou deux chaînes latérales de sucre. Associée en trimère, elle forme les spicules qui émergent de l'enveloppe virale. La protéine M2 est probablement située sous la couche lipidique et servirait d'intermédiaire entre G et la nucléocapside. ■

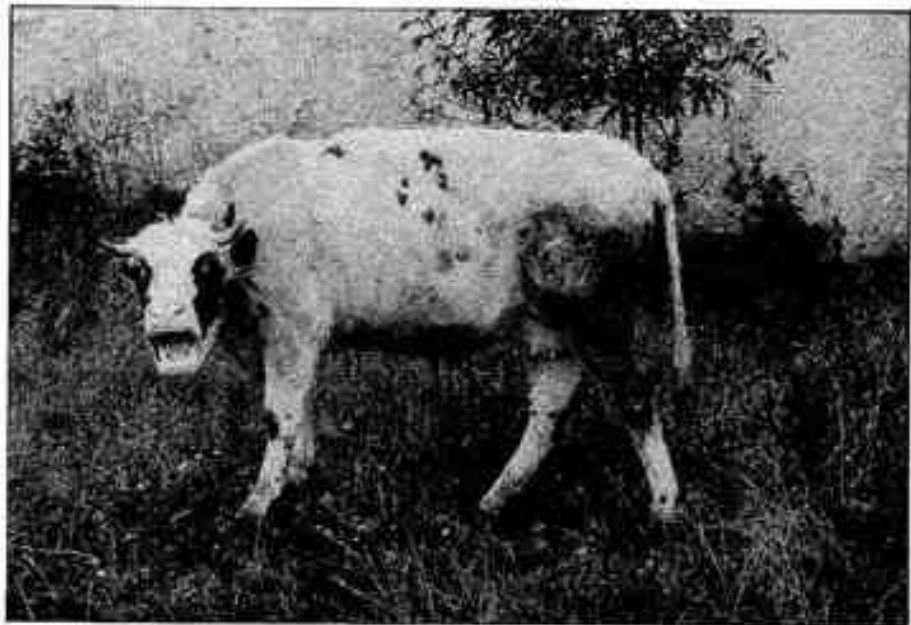


Fig. 1 - Vache enragée.
Photo de J. Blancou, directeur du Centre national d'études sur la rage.

Les différentes souches de rage

Il existe de très nombreux isolats du virus obtenus à partir d'animaux ou d'hommes morts de la rage. Ces souches dites « sauvages » ou « de rue » sont antigéniquement très proches. De nouvelles souches, apparentées à la rage, ont été récemment isolées en Afrique à partir de chauves-souris, de musaraignes, de divers animaux sauvages ou domestiques et de cas de rage humaine. Ce sont les virus Lagon Bar, Mokola et Duvénague. Dans les tests immunologiques, ils montrent une faible réaction croisée avec le virus rabique et forment avec lui le sous-groupe des lyssavirus.

Le virus véhiculé par une espèce n'a pas le même pouvoir infectieux pour les autres espèces, ce qui constitue une barrière à l'extension horizontale de l'épidémie. Par exemple, avec une souche isolée à partir de renards (souche vulpine), il faut respectivement cent, dix mille et un million de fois plus de virus pour tuer un lièvre, un bovin ou un chat qu'un renard.

Les souches utilisées en laboratoire, appelées souches « fixes », dérivent essentiellement de trois isolats de virus rabique : celui de Pasteur obtenu à partir d'un chien en 1882 (souches PM, PV et CVS), un autre réalisé aux États-Unis en 1953 également à partir d'un chien (souches SAD et ERA), et le dernier provenant d'une jeune fille décédée en 1939 aux États-Unis (Flury LEP et HEP). Dans chaque cas, le virus a été passé plusieurs milliers de fois sur des lapins, des souris ou des œufs embryonnés. Il est commun d'entendre que les souches fixes sont moins dangereuses que les souches sauvages. Il serait plus juste de dire qu'elles sont maintenant adaptées à leur nouvel hôte (souris ou lapin, par exemple) et donc *ipso facto* moins infectieuses pour les autres espèces. Dans cette optique, la distinction entre souche « fixe » et souche « de rue » est donc relativement artificielle. ■

La paralysie est-elle due à une perturbation du fonctionnement des neurones à un niveau central ou périphérique ?

Seule la vaccination des hommes et des animaux supprimera ce fléau.

Les organismes de santé préconisent l'utilisation de vaccin inactivé. Mais les pays en voie de développement n'ont pas les moyens financiers de s'en procurer suffisamment.

Dans ces pays, le nombre des victimes de cette terrible maladie, quoique difficile à évaluer, se situe probablement aux alentours de plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines de milliers par an.

De façon générale, tous les mammifères sont sensibles à la maladie.

ailleurs, les mutants avirulents ont gardé la capacité d'envahir certaines terminaisons nerveuses mais pas les autres, suggérant l'existence d'au moins deux récepteurs différents. Ce problème pourra sans doute être abordé avec profit en culture de cellules lorsque les études *in vivo* auront permis de choisir des modèles qui soient satisfaisants.

Que se passe-t-il après la pénétration de la nucléocapside virale dans la terminaison nerveuse ? Dans une première étape, elle semble être transportée passivement vers le corps cellulaire par le flux axonal rétrograde à la vitesse de 0,5 millimètre/heure. Comme les neurones périphériques ont des axones qui peuvent mesurer de quelques millimètres à quelques dizaines de centimètres, ce trajet peut prendre des jours, voire des semaines. Si, comme on le pense, il n'y a pas de synthèses protéiques dans les axones, la réplication ne peut commencer que dans le corps cellulaire. Couplée à la transcription et à la traduction des messages viraux, elle conduit alors en quelques heures à l'accumulation dans le cytoplasme de nucléocapsides parfaitement décelables avec les anticorps spécifiques marqués, par exemple, à la fluorescéine (fig. 2).

La vaccination humaine est nécessaire uniquement après exposition sauf dans le cas de professionnels susceptibles d'entrer en contact avec le virus. Jusqu'à ces dernières années, le vaccin était produit en cerveaux de jeunes animaux pour diminuer les risques de complications neurologiques dues en particulier à la présence de myéline. Il est maintenant progressivement remplacé par du virus produit en culture de cellules, purifié, concentré et inactivé, qui ne donne pas de complications.

La vaccination des animaux domestiques se pratique avec du virus vivant ou inactivé. Le virus vivant assure une bonne protection, à des doses relativement faibles et à ce titre présente des avantages certains sur le vaccin inactivé. Cependant quelques cas de rage, apparemment dus à la vaccination, ont été signalés, conduisant les organismes de santé à recommander l'adoption générale de vaccin inactivé. Or, le vaccin inactivé est cher et les pays en voie de développement n'ont pas les moyens d'en acheter les quantités nécessaires pour faire une véritable campagne de vaccination des chiens. Ils ne maîtrisent pas non plus les techniques les plus modernes de culture de cellules et n'ont pas accès aux meilleures souches vaccinales

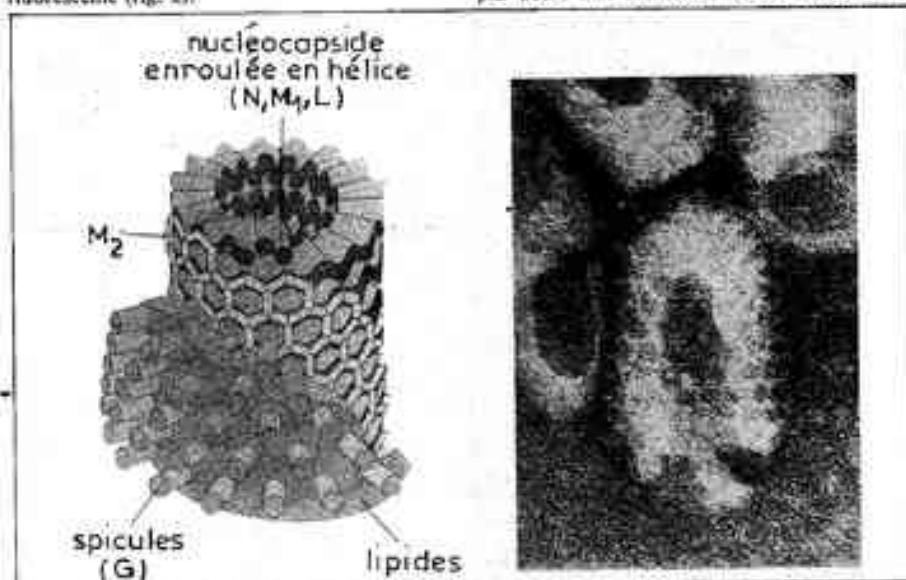


Fig. 2 - Structure du virion rabique.

Schéma et photo au microscope électronique d'un virion d'après Cartwright et al. (*Journal of Virology*, 10, p. 256 et *Journal of General Virology*, 16, p. 391).

La maturation libre enfin des virions infectieux au niveau des synapses, ce qui permet à un second cycle d'infection de démarrer. On pense que deux cycles successifs sont suffisants pour que le virus atteigne le cerveau. A partir de là, il se propage dans toutes les directions et gagne rapidement l'ensemble des neurones.

On peut se demander comment l'activité globale du système nerveux est modifiée par l'infection virale, et si la paralysie est due à une perturbation du fonctionnement des neurones à un niveau central ou périphérique. Ces problèmes sont en ce moment abordés dans plusieurs laboratoires par les techniques d'électrophysiologie et l'on pourra sans doute bientôt répondre à ces questions.

Les retombées pratiques de la recherche : l'amélioration des souches vaccinales

L'éradication de la rage à l'échelle de la planète suppose la vaccination des hommes, des animaux domestiques et de la faune sauvage.

vendues avec exclusivité aux industries pharmaceutiques. La situation générale a donc plutôt tendance à s'aggraver qu'à s'améliorer.

Reste enfin le problème de la rage de la faune sauvage. Quels sont les principaux vecteurs de cette rage sylvatique ? En Europe, il s'agit principalement du renard roux. Dans les autres régions du monde, les vecteurs sont le chien sauvage, le loup, le blaireau, la fouine, la mouffette, le raton laveur, la mangouste, le chacal, la hyène, certains félins, divers mustélidés, des cervidés, des ongulés (chamois, mouflon, bouquetin), le sanglier et même, dans les régions polaires, le renne et le phoque. Cette liste n'est pas exhaustive et l'on peut dire de façon générale que tous les mammifères semblent sensibles à la maladie. Les chauves-souris méritent une mention particulière parce qu'elles sont souvent infectées et font généralement une rage asymptomatique, avec sécrétion de virus sur de longues périodes. Les chauves-souris vampires peuvent transmettre la rage pendant leur repas de sang et sont responsables de véritables épidémies décimant le bétail en Amérique du Sud, ainsi que de cas de contamination humaine. Les oiseaux et les vertébrés à

Le cycle viral

Il est entièrement cytoplasmique et a pu être relativement bien étudié en culture de cellules. On distingue une phase d'adsorption pendant laquelle le virus entre en contact avec la membrane de la cellule-hôte. Ces contacts impliquent certainement la glycoprotéine et certains constituants de la membrane cellulaire, qui servent de récepteurs.

Après l'adsorption, a lieu l'internalisation par fusion avec la membrane ou par pinocytose. La nucléocapside se retrouve dans le cytoplasme, débarrassée de la membrane virale qui fusionne avec la membrane cellulaire. Elle commence alors la transcription, étape pendant laquelle les messagers sont synthétisés de façon séquentielle dans l'ordre suivant : 3', N, M1, M2, G, L, 5'. Il y a un message par protéine. La réplication démarre lorsque suffisamment de protéines de nucléocapside ont été fabriquées pour venir envelopper l'ARN naissant. La molécule en cours de synthèse étant immédiatement séparée de sa matrice par des protéines, il n'y a jamais d'intermédiaire double chaîne dans ce processus. Les protéines G et M2 s'insèrent dans les membranes de la cellule-hôte et la maturation a lieu lorsque les nucléocapsides arrivent au contact des membranes transformées. Cette maturation peut se produire au contact des membranes internes et externes. Environ 24 heures séparent la pénétration des premiers virions et la phase de production virale maximale. A ce moment, on peut clairement mettre en évidence la présence des nucléocapsides dans le cytoplasme des cellules infectées par immunofluorescence (fig. 3). Elles forment des amas correspondant aux corps de Negri.



Fig. 3 - Présence de nucléocapsides rabiques dans un neurone infecté par la rage (immunofluorescence indirecte).

Une coupe de moelle épinière de souris injectée dans le mollet par du virus CVS a été traitée par un anticorps monoclonal anti-nucléocapside puis un anticorps de souris conjugué à la fluorescéine. Observation au microscope à fluorescence : dans le champ, un seul neurone est fluorescent, les autres ne sont pas infectés.

La solution semble être une vaccination orale au moyen d'appâts contenant du virus vivant. Mais cette solution contient des risques de répandre dans la nature un virus virulent.

L'isolement des souches vaccinales à la fois apathogènes et protectrices est une voie ouverte. Autre voie prometteuse, l'obtention de vaccine recombinée portant le gène de la glycoprotéine rabique. Mais il faut à la fois que le vaccin confère une protection sans être dangereux pour l'espèce.

sang froid ne sont pas sensibles à la maladie. Enfin, on n'a encore jamais trouvé d'insecte susceptible de transmettre la rage.

Les campagnes d'élimination du vecteur principal (par exemple, le renard de France) se sont révélées relativement inefficaces dans la lutte contre la rage sylvatique. On en vient maintenant à l'idée de pratiquer une vaccination orale par distribution massive d'appâts contenant du virus vivant (en effet, on ne peut pas vacciner par voie orale avec du virus inactivé). Les problèmes soulevés sont considérables et loin d'être résolus. Il faut distribuer le virus sous une forme qui soit attirante pour l'espèce considérée, que celui-ci soit délivré au niveau des muqueuses buccales — or certains animaux avalent sans mâcher — ou au niveau de l'intestin car le virus est détruit par les sucs gastriques. Il faut aussi que le vaccin reste infectieux dans les conditions naturelles. Enfin et surtout, on ne peut sans danger disséminer dans la nature un virus qui garde un reste de virulence. L'isolement de nouvelles souches vaccinales qui soient à la fois apathogènes et protectrices est donc absolument nécessaire.

Dans ce domaine, deux grandes voies ont été ouvertes ces dernières années, toutes deux dues à des retombées de la recherche fondamentale. La première consiste en l'isolement de souches portant plusieurs mutations conduisant à la perte de virulence, donc génétiquement stables, c'est-à-dire ayant une probabilité très faible de retourner par mutation à l'état virulent, et possédant un bon pouvoir immunogène et protecteur. Une souche double mutante a ainsi été isolée dans notre laboratoire. Elle porte deux substitutions d'acide aminé dans la glycoprotéine : la première, située à l'acide aminé 132 confère le caractère thermosensible et avirulent par injection intramusculaire. La deuxième, située à l'acide aminé 333 rend le virus avirulent pour les animaux adultes quelle

que soit la voie d'injection, comme nous l'avons dit plus haut. La conjonction des deux mutations conserve le caractère totalement avirulent et ce caractère est stable après plusieurs passages en souriceaux nouveau-nés, ce qui n'est pas le cas pour les souches portant une seule mutation. La souche double mutante a un bon pouvoir immunogène et protecteur par injection intramusculaire sur souris et renard et doit continuer à être étudiée sur d'autres animaux.

Notons que les souches avirulentes représentent un progrès certain, même pour la fabrication de vaccin inactivé parce que la production massive, la concentration et la purification de virus vivant posent toujours un problème de sécurité. En outre, l'inactivation incomplète du virus, accident toujours à redouter, ne serait plus un désastre. Enfin, l'existence de ces souches devrait éventuellement inciter les organismes de santé à revoir leur politique sur les vaccins vivants.

Une autre voie très prometteuse, en particulier pour la vaccination de la faune sauvage, a été ouverte par l'obtention de vaccine recombinée portant le gène de la glycoprotéine rabique. Ce virus inoculé à des souris, lapins et renards a induit la formation d'anticorps neutralisants et les animaux ont été protégés contre la rage. Un certain nombre de points restent à étudier. En particulier, il faut s'assurer que la présence de glycoprotéine rabique à la surface des virions de vaccine ne permet pas à cette dernière de pénétrer dans le système nerveux. Il faut également vérifier si le virus se multiplie suffisamment dans chaque espèce à vacciner pour conférer la protection, sans toutefois être dangereux pour elle. Ces incertitudes doivent être levées, toutefois, il est clair que cette approche peut contribuer à la solution des problèmes posés par la vaccination antirabique. ■

Les Pygmées d'Afrique, maillon de l'histoire ?

Les Pygmées n'ont cessé de présenter aux Européens une image paradoxale, comme a toujours été ambiguë l'attirance de ces derniers à leur égard. « Hommes des bois » autrefois, « chasseurs collecteurs » aujourd'hui, on s'est souvent penché sur leur société et leur économie avec un certain « rousseauisme ». L'approche scientifique est très récente et notamment l'étude de leur langue.

Serge BAHUCHET



L'intérêt des hommes pour les Pygmées remonte loin dans le temps puisque le Père des sciences lui-même, Aristote, leur consacre des pages. A travers les siècles, les Pygmées suscitèrent des questions, d'abord sur leur existence (mythe ou réalité ?), ensuite sur leur localisation et leur identité (hommes ou singes ?), enfin, à partir de la fin du XIX^e siècle, sur eux-mêmes. C'est surtout leur aspect physique qui fascina et la plupart des publications portèrent sur leur taille. Cette particularité — une taille inférieure à la normale, sans difformité marquée bien qu'on les ait souvent appelés « nains » — intrigua ; conjuguée à une économie rudimentaire, elle fut à l'origine de nombre d'hypothèses hardies, où l'on voyait dans les Pygmées l'image de l'Africain préhistorique. On chercha ainsi à retrouver chez eux le monothéisme primitif.

Au XVIII^e siècle le problème de l'existence des Pygmées avait soulevé les passions académiques (voir la *Dissertation* de l'Abbé Banier du 1^{er} février 1724) ; au début du XX^e, les Pygmées étant définitivement attestés en Afrique équatoriale, c'est l'existence d'une éventuelle langue pygmée qui provoqua des débats. En effet, alors que leur aspect physique et leur mode de vie les distinguaient de leurs voisins et semblaient confirmer leur unité en dépit d'une très grande dispersion géo-

graphique, les voyageurs rapportaient que les Pygmées parlaient la langue des Grands Noirs agriculteurs auprès desquels ils vivaient.

En dépit de ce qu'une abondante bibliographie laisse croire, l'approche scientifique des différents groupes pygmées d'Afrique est cependant très récente. Deux écueils freinent le travail de l'observateur : leur nomadisme saisonnier dans la forêt équatoriale humide et les relations étroites qu'ils entretiennent avec leurs voisins agriculteurs, ceux-ci se posant souvent en intermédiaires incontournables. Passés les premiers temps de l'exploration héroïque et de la recherche du peuple pur, représentant l'humanité archaïque, les voyageurs désabusés, ayant constaté les liens multiples avec les populations d'agriculteurs, rejetèrent les Pygmées comme acculturés, puisqu'ils ne ressemblaient pas à l'image du « chasseur-collecteur ». Les meilleures publications d'alors s'efforcèrent de démontrer que les liens avec les agriculteurs étaient mineurs et que les Pygmées auraient pu s'en dispenser.

Ce sont justement leurs relations avec les autres populations forestières qui, actuellement, intriquent les chercheurs et font l'originalité profonde des Pygmées d'Afrique.

Les Aka, Pygmées de la République centrafricaine

Si les Mbuti de l'Est du Zaïre avaient donné lieu à une abondante et célèbre littérature ethnologique (Schreber, Turnbull), les groupes habituellement nommés

Babinga, de l'Ouest du bassin congolais, étaient très mal connus jusqu'à ces quinze dernières années.

Les Aka peuplent la forêt du sud de la République centrafricaine (RCA) et du nord du Congo, sur une immense surface de près de 100 000 km². Dans cette forêt, de petits groupes d'une cinquantaine de personnes en moyenne forment des campements de huttes hémisphériques, disposées en cercle, qui se déplacent plusieurs fois dans l'année à travers une aire qui est aussi un territoire partagé par plusieurs campements (ou groupes locaux) associés. Le campement est la structure socio-économique de base, dont le couple marié forme l'unité constitutive. Dans un camp vit généralement une majorité de frères et sœurs, autour du père ou de l'oncle paternel. On remarque toutefois les très fréquentes visites que des couples rendent dans les groupes voisins où ils ont famille ou belle-famille.

Dans cette société acéphale, c'est le respect envers les aînés qui régit le comportement général et le sentiment de responsabilité qui régle le déroulement de la vie quotidienne. L'approvisionnement alimentaire est assuré par la chasse aux mammifères et la collecte des végétaux (feuilles, noix, tubercules, champignons), du miel et des insectes (termites, chenilles). On constate que la structure sociale et le cycle de développement sont fondés sur la chasse : il y a intrication entre l'aptitude à capturer du gros gibier et les étapes successives de la vie sociale comme le mariage par exemple. De la même manière, de nombreuses séquences rituelles de la vie religieuse sont liées à la chasse et au gibier, d'autres sont reliées à la récolte du miel. Les activités de production sont le plus souvent collectives ; elles sont suivies d'une distribution des produits crus puis cuits à l'intérieur du campement, entre les personnes présentes.

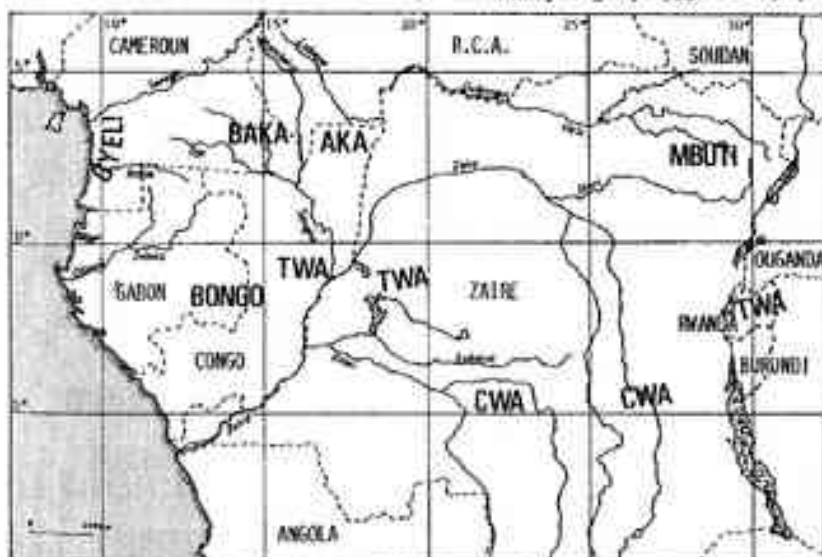
Population sans agriculture ni élevage, elle se signale aussi par l'absence d'artisanat. Tous les produits du fer et les récipients à feu proviennent des sociétés qui les entourent. Les Aka fournissent à celles-ci des produits forestiers (viande fumée, chenilles séchées, noix oléagineuses et écorces médicinales) mais également de la main d'œuvre pour le défrichage des nouveaux champs, en échange d'outils de fer, de sel, de tabac et de fécules culti-

■ Serge Bahuchet, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de langues et civilisations à tradition orale - LACITO (LP 3121 du CNRS), 44, rue de l'Amiral-Mouchet, 75014 Paris.



Femme et enfants aka de Centrafrique, Bagandou, Photo de Serge Bahuchet.

Principaux groupes pygmées d'Afrique



1A

Les grandes familles linguistiques en Afrique

(d'après J. Greenberg)

I - NIGER-CONGO

1. Ouest atlantique
2. Mande
3. Voltaïque
4. Kwa
5. Benue-congo (cf. détail)
6. Adamawa-oubanguien (cf. détail)

II - NILO-SAHARIEN

1. Songhaï
2. Saharien
3. Maban
4. Fur
5. Chari-nilotique
 - a) soudanais oriental
 - b) soudanais central (cf. détail)

1B

Les langues des Pygmées dans la classification des langues africaines

1.5 BENUE-CONGO

1.5.D Bantouide

- non bantou : 15 langues environ
- bantou : quelque 600 langues réparties en 17 zones désignées par une lettre de A à S ;
- parmi ces langues, 12 sont parlées par des groupes pygmées :

- A 80 Gyele (Cameroun)
- B 70 Bongo (Gabon)
- C 10 Aka, M'baka (RCA, Congo)
- D 60 Twa des Kanda (Zaire)
- E 80 Twa des Kuba (Zaire)
- F 20 Twa du Shaba (Zaire)
- G 10 Mbuti (lac Tanganyika)
- H 30 Mbuti (Zaire)
- I 10 Twa (Ouganda, Rwanda ?)
- J 60 Twa (Rwanda)
- K 30 Cwa des Kuba (Kasaï)

1.6 ADAMAWA-OUBANGUIEN

1.6.B Ouhanguien

1. occidental
 - a) ghaya
 - b) ngbandi
 - c) gbandi-sere :
 - gbandi
 - ngbaka
 - baka (Cameroun)
 - montobo (etc...)
 - sere
2. central : banda
 1. méridional : zande
- II.5.b Soudanais central
 1. ouro-bongo-baguirminien
 2. moru-mangbutu
 - a) moru
 - b) mangbutu :
 - mangbutu
 - ssa (Zaire)
 - c) mangbutu :
 - mangbutu
 - ndo
 - efe (Zaire)

vés (manioc, bananes-plantains). Voici poindre le premier paradoxe des Pygmées : économiquement chasseurs-collecteurs car leur emploi du temps est à soixante-dix pour cent occupé par l'exploitation des ressources sauvages, ils ont une alimentation de type agriculteur, avec cinquante pour cent de nourriture d'origine agricole !

La langue des Aka

Le second paradoxe des Pygmées concerne leur langue. Les recherches linguistiques et ethnologiques que mènent depuis de nombreuses années, en Lobaye, les chercheurs du LACITO* devaient inévitablement conduire à aborder les groupes pygmées de cette région.

La Lobaye est un affluent de l'Oubangui, qui longe grosso modo la lisière nord du bloc forestier congolais et qui marque la ligne de contact entre langues bantoues et langues oubanguiennes. Le long de cette rivière se trouvent trois ethnies de langue bantoue (groupe C 10, voir encadré 1), les Ngando, les Mbaté et plus à l'Ouest les Pandé, et deux ethnies oubanguiennes, les Ngbaka et les Monzombo (ces derniers sur l'Oubangui). Elles pratiquent toutes l'agriculture avec des orientations différentes : les Ngbaka cultivent plutôt la banane-plantain alors que les Monzombo et les Mbaté préfèrent le manioc ; toutes chassent et piègent, sauf les Monzombo qui sont presque exclusivement des pêcheurs. Elles entretiennent des relations économiques étroites avec les Pygmées Aka.

Des enquêtes minutieuses menées directement dans les camps nous ont permis de décrire la langue maternelle des Aka. La phonologie a été publiée, la grammaire est en voie d'achèvement et un important dictionnaire de type encyclopédique comportant plus de dix mille entrées est en cours de parution. De ces études, il découle que l'aka est sans conteste une langue bantoue du groupe C 10, différente de toute autre langue parlée par les Grands Noirs. Il s'agit bel et bien d'une langue à part entière, en ce sens que ce n'est pas une variété dialectale d'une autre langue du groupe C 10. Des recherches extensives sur plusieurs localités de la zone nord de l'aire aka (Lobaye et Haute Sangha) ont montré à la fois l'homogénéité de la langue et l'existence de dialectes qui divergent essentiellement sur le plan lexical.

Était ainsi contredite l'opinion usuelle selon laquelle les Pygmées n'avaient pas de langue propre. Cependant la situation ne laisse pas d'être complexe. En effet, le fait que l'aka soit une langue bantoue indique qu'à un moment de leur histoire, des Pygmées ont emprunté leur langue à un groupe bantou C 10. Et le fait que l'aka soit actuellement une langue signifie que ces anciens Pygmées se séparèrent alors des Bantous de telle sorte que les parlers ont évolué en divergeant jusqu'à devenir les actuels parlers C 10.

Par ailleurs, l'établissement de listes comparatives thématiques (noms d'animaux, d'arbres, d'objets par exemple)

La comparaison lexicale : un problème linguistique

France CLOAREC-HEISS

En matière de comparatisme extensif — celui qui consiste à esquisser des classifications d'un grand nombre de langues mal connues, voire inconnues — la technique traditionnelle est de recueillir, pour chaque langue considérée, une liste de vocabulaire dit fondamental, le postulat étant que ce type de mots s'emprunte moins que le reste du lexique. Les différentes listes utilisées dans le monde sont assez voisines et rassemblent des termes qui se rapportent à chacun des grands domaines de la réalité objective immédiatement perceptible (vie sociale, parenté, corps, monde naturel, perception, mouvement, numération). Le nombre de ces termes varie entre cent et deux cent-cinquante. Cette méthode, utilisée depuis quelques décennies, n'a jamais été remise en cause. Or, elle ne préserve pas la linguiste des difficultés qu'il y a à discerner ce qui est, dans une langue, le résultat d'un emprunt à une autre langue de ce qui est la conséquence d'un apparentement entre deux langues.

L'expérience conduite chez les groupes pygmées de République Centrafricaine par J. Thomas et S. Bahuchet apporte des éléments troublants.

Une liste de deux cent-vingt et un termes de vocabulaire fondamental (appelée QIL : questionnaire d'inventaire linguistique) a été recueillie chez les Aka, vivant dans le sud de la Centrafrique et parlant une langue bantoue. Cette liste a ensuite été comparée aux termes correspondants publiés dans le dictionnaire baka (langue oubanguienne parlée par un autre groupe pygmée établi dans l'Est du Cameroun) par Brisson et Boursier en 1979. La comparaison de ces deux listes confirme l'absence de parenté entre ces deux langues : le pourcentage de vocabulaire commun avoisine les dix pour cent. Si l'on restreint la comparaison au seul vocabulaire forestier (animaux, plantes, technique de chasse) le taux de vocabulaire commun « rousoué » alors à quarante pour cent.

Par ailleurs, le rapprochement entre deux langues de la même famille : le baka (Pygmées de l'Est camerounais) et le ngbaka (villagers du Sud centrafricain) fait apparaître les résultats suivants : vocabulaire fondamental : quatre-vingt-deux pour cent de termes communs ; vocabulaire forestier : quarante-quatre pour cent de termes communs.

On ne peut qu'être frappé par le fait que les taux de vocabulaire commun entre deux langues non apparentées (Pygmées aka et Pygmées baka) et deux

langues étroitement apparentées (Pygmées baka et villageois ngbaka) soient si proches dans le cas du vocabulaire forestier (quarante pour cent dans le premier cas, quarante-quatre pour cent dans le second), alors que les QIL font apparaître respectivement dix pour cent et quatre-vingt-deux pour cent d'apparentement.

QIL vocabulaire fondamental		
	ngbaka	aka
baka	82 %	10 %

vocabulaire forestier		
	ngbaka	aka
baka	44 %	40 %

Ces faits devraient amener les linguistes à une grande prudence méthodologique et à relativiser la validité du protocole d'enquête. En effet, ce qui est appelé vocabulaire fondamental correspond aux termes les plus courants de la vie quotidienne. Lorsque deux communautés linguistiques entrent en contact, c'est ce vocabulaire qui est utilisé et appris en premier par les membres des deux communautés. Si les contacts durent et s'intensifient, le vocabulaire de base tendra à devenir commun, le groupe dominé ou minoritaire adoptant celui du groupe dominant. À l'inverse, les termes spécifiques à chacune des communautés pourront ou bien se perpétuer parallèlement dans leur usage propre ou bien être empruntés à la langue du groupe dominé s'il est plus adapté à l'environnement du moment.

C'est de cette manière qu'on interprète aujourd'hui les surprenants résultats cités plus haut. Cette interprétation pose, implicitement au moins, l'hypothèse d'une langue pygmée dont les vestiges, qui transcendent les familles linguistiques, seraient à rechercher dans le domaine des réalités forestières des langues de la région. Cette hypothèse ne pourra devenir certitude que le jour où l'on disposera d'enquêtes approfondies sur les autres sociétés pygmées de l'Est et du Sud-Est du bassin congolais.

Cette expérience montre à l'évidence, que, même si l'évolution des langues est indépendante de celle des cultures, il est absolument nécessaire d'accorder au contexte sociologique et au milieu naturel une importance aussi grande qu'à la recherche des correspondances phonétiques. Faute de quoi, on risque de parvenir à des résultats aberrants qui bloqueraient de manière durable les recherches, tant en linguistique qu'en histoire. ■

■ France Cloarec-Heiss, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de langues et civilisations à tradition orale — LACITO (LP 3121 du CNRS), 44, rue de l'Amiral Mouchez, 75014 Paris. (Ce texte a été rédigé d'après les données de Jacqueline Thomas, directeur de recherche, directeur du LACITO).

* LACITO : Laboratoire des langues et civilisations à tradition orale, laboratoire propre du CNRS.

montre une large circulation de vocabulaire entre les diverses ethnies de la Lobaye (y compris les Aka), indépendamment de leur appartenance linguistique.

Les langues des Pygmées d'Afrique

C'est une situation du même type qui se révèle à propos des Baka, Pygmées de l'Est du Cameroun. Assez tôt des observateurs clairvoyants reconnurent que les Baka parlaient une langue différente de toutes les langues avoisinantes, proche de celle des Ngbaka de RCA établis à mille kilomètres de là, qui est une langue oubanguienne. De plus, sur la foi des listes qui avaient servi à la comparaison, on les supposait identiques (ou peu différentes). La récente publication d'un dictionnaire d'environ trois mille termes et de plusieurs volumes de textes a permis de mettre en évidence leurs dissemblances et d'établir le statut du baka comme langue oubanguienne à part entière.

De cette constatation découle un principe méthodologique : pour les langues pygmées, à tout le moins, une comparaison au moyen de listes standards, et limitées, ce qui est une démarche traditionnelle, n'est pas satisfaisante (voir encadré 2). La littérature sur les autres groupes pygmées (en particulier les Mbuti) ne permet pas de se faire une idée définitive de leur situation linguistique. On sait seulement, par exemple, que dans la région de l'Ituri, les Mbuti utilisent en fait plusieurs langues de familles diverses (deux langues moru-mangbetu et une langue bantoue).

Les Pygmées, la linguistique et l'histoire

Si l'on se limite à la région la mieux étudiée, on peut aboutir à certaines conclusions. Grâce à la distribution géographique des langues oubanguiennes les plus proches du point de vue génétique (celles du groupe Gbandili-Sere, dont font partie le ngbaka et le baka), on a pu postuler une migration (dont la direction est indiquée par la répartition des traits archaïques ou non de ces diverses langues), migration qui entraîna ces populations d'Est en Ouest, du Bahr-el-Chezzal, aux confins du Soudan, jusqu'à leurs localisations actuelles, Lobaye et Est du Cameroun. Les modalités et l'échelonnement dans le temps de ce déplacement nous sont inconnus. Il semble bien toutefois que ce soit au cours de ce lent mouvement à travers la forêt que les Baka acquirent



En revenant de la récolte du vin de palme, Monguamba. Photo de F. Cloarec-Hess.



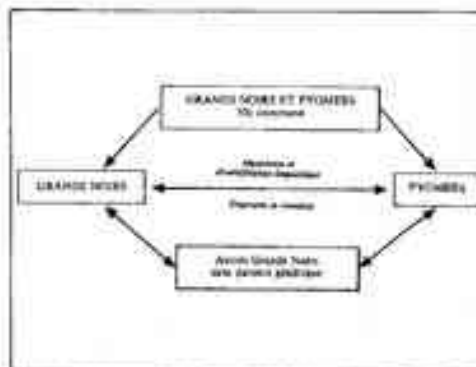
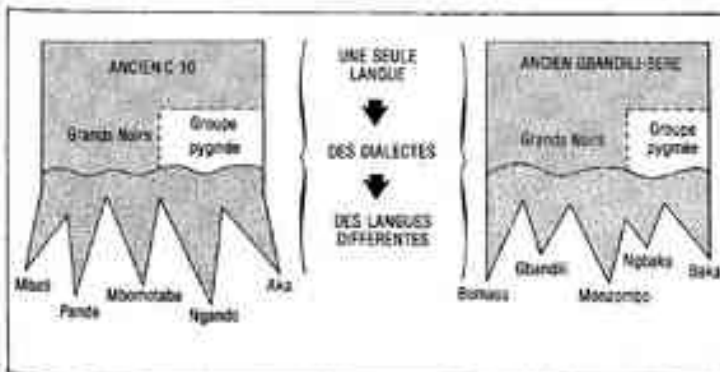
Céphalopode tué à la sagale pendant une chasse collective au filet, Bagandou. Photo de Serge Bahuchet.

leur langue, l'association des deux ethnies, aux économies et aux caractères si différents, étant due à l'intérêt pour les Grands Noirs de se faire guider par des forestiers spécialisés. Les traditions orales confirment d'ailleurs ce trait.

La dispersion des locuteurs C-10 est nettement moins grande que celle des Oubanguiens : aussi une trajectoire de migration n'a-t-elle pas été reconstituée, mais il est très vraisemblable que les modalités d'association avec les Pygmées aient été similaires. Une période de vie commune est certaine, durant laquelle les Pygmées acquièrent une nouvelle langue. Dans les deux cas, la première question est : pourquoi cette assimilation n'a-t-elle été que linguistique, mais ni raciale ni culturelle* ? (puisque les deux sociétés ont pu se séparer ensuite et rester différentes). La deuxième question est : pourquoi cette période de vie commune a-t-elle été suivie d'une séparation, à partir de laquelle les parlers se diversifièrent ? La troisième inconnue est celle du degré d'apparentement entre les Baka et les Aka. Actuellement locuteurs de langues très différentes, on observe toutefois un faible pourcentage (dix pour cent) de vocabulaire identique, spécialisé dans les réalités forestières. Ce vocabulaire est-il un substrat ou résulte-t-il d'emprunts ultérieurs d'un groupe à l'autre ? Nous l'ignorons. Sur un plan plus large, on ignore également totalement quelles sont les relations historiques entre ces Pygmées et les autres groupes africains.

Peu de certitudes émergent de nos investigations, mais elles éclairent d'un jour nouveau les Pygmées, et permettent, au moins, de mieux poser les problèmes. Les relations entre les Pygmées et les Grands Noirs sont très anciennes et la situation actuelle est la résultante d'une longue histoire. Il est vain de chercher à étudier les Pygmées en faisant abstraction de leurs relations avec les villageois, car ceux-ci ayant pénétré dans la forêt à des époques très reculées, ont une part nette dans le façonnement des ethnies pygmées contemporaines. Seules des études comparatives très précises et détaillées portant sur des lexiques spécialisés, les traditions orales mais aussi sur les techniques à l'échelle du bassin congolais, permettront de reconstituer partiellement quelques phases des contacts de ces peuples qui colonisèrent peu à peu la forêt équatoriale.

* La musique des Pygmées, très facilement identifiable, est l'une des preuves manifestes de l'unité culturelle de cette population (voir encadré 3).





BIBLIOGRAPHIE

- Arom S. et Thomas J.M.C., *Les Mimbo, génies du piègeage et le monde surnaturel des Ngbaka-ma'bo*, (République centrafricaine), Paris, 1974, SELAF (Bibl. 44-45), 153 p.
- Bahuchet S. éd., *Pygmées de Centrafrique, Ethnologie, histoire et linguistique*, Paris, 1979, SELAF (Bibl. 73-74), 179 p.
- Bahuchet S., *Une société de chasseurs-cueilleurs et son milieu de vie, les Pygmées, Aka de la forêt centrafricaine*, Paris, 1982, SELAF, 640 p.
- Bahuchet S. et Guillaume H., *Aka Farmer Relations in the North-West Congo Basin*, in Leacock and Lee éd., *Politics and History in Band Societies*, Paris, 1982, CUP/MSH, p. 189-211.
- Brissou R. et Boursier D., *Petit dictionnaire baka-français*, Douala, 1979, 305 p.
- Cloarec-Heiss F. et Thomas J.M.C., *L'aka, langue bantoue des pygmées de Mongoumba (Centrafrique) : Introduction à l'étude linguistique, phonologie*, Paris, 1978, SELAF (TO 28), 204 p.
- Demasse L., *Techniques et économie des Pygmées Babinga*, Paris, 1980, Inst. d'ethnologie, 302 p.
- Letourzey R., *Contribution de la botanique au problème d'une éventuelle langue pygmée*, Paris, 1976, SELAF (Bibl. 57-58), 148 p.
- Motte M.E., *Les plantes chez les Pygmées Aka et les Monzombo de la Lobaye (Centrafrique)*, Paris, 1980, SELAF (Bibl. 80-81-82), 539 p.
- Philippart de Fuy G., *Les Pygmées d'Afrique Centrale*, Paris 1984, Editions Parenthèses, Architectures traditionnelles, 127 p.
- Thomas J.M.C., *Les Ngbaka de la Lobaye, le dépeuplement rural chez une population forestière de la République centrafricaine*, Paris, La Haye, 1983, Mouton & C°, 496 p.
- Thomas J.M.C. et Bahuchet S. éd., *Encyclopédie des Pygmées Aka, Techniques, langage et société des chasseurs-cueilleurs de la forêt centrafricaine*, Paris, 1981, SELAF (TO 50, 2 fasc. parus, 13 à paraître).
- Thomas J.M.C., *Emprunt ou parenté ? A propos des parlers des populations forestières de Centrafrique*, dans *Pygmées de Centrafrique*, Bahuchet S. éd., Paris, 1979, SELAF (Bibl. 73-74), p. 141-169.

Un témoignage de l'affectueuse attention que les hommes aka portent à leurs enfants... Mongoumba. Photo de France Cloarec-Heiss.

La musique des Pygmées

Simha AROM

Malgré certains points communs avec les musiques traditionnelles des autres cultures avoisinantes, le chant des Pygmées s'en distingue pourtant radicalement par un certain nombre de traits caractéristiques de toutes les communautés pygmées :

- le recours à une polyphonie vocale par mouvements divergents, aussi dense que complexe,
- l'utilisation de la technique du *jodel* qui consiste en l'alternance rapide de notes émis en voix de poitrine avec d'autres émis en voix de tête produisant de grands intervalles disjoints.

Les instruments de musique, sans doute du fait du nomadisme de ces populations, sont aussi peu nombreux que légers et souvent éphémères. En effet,

façonnés à partir de matériaux provenant de l'environnement immédiat, ils sont abandonnés sur les lieux mêmes de leur utilisation. L'instrumentarium propre aux Pygmées comprend :

- deux lames de fer entrecroisées,
- des sifflets en rameau de papayer, utilisés seuls ou en paire,
- une poitrine frappée qui n'est rien d'autre qu'un tronc d'arbre, couché à même le sol et percuté par un groupe d'hommes tenant chacun deux baguettes de bois.

Aujourd'hui, on fait également appel, pour certaines circonstances, à des tambours (à une ou deux membranes) et à un hochet de vannier empruntés aux ethnies voisines.

Les instruments percussifs dont les parties s'entrecroisent, fournissent, à la polyphonie vocale, un support polyrythmique dont la trame, infiniment subtile, est très serrée.

Bien qu'anonyme et d'origine populaire, la musique polyphonique des Pygmées est un art savant hautement élaboré. Venue du fond des âges, c'est, sans conteste, l'une des musiques orales les plus complexes qui se puissent trouver.

■ Simha Arom, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de langues et civilisations à tradition orale - LACITO (L.P. 3121 du CNRS), 44, rue de l'Amiral-Mouchet, 75014 Paris.

DISCOGRAPHIE

- Arom, Simha - 1973, *Aka Pygmy Music*, Collection UNESCO « Musical Sources », Philips 6386-016, 1 disque 30 cm 33 t. Enregistrements, notice, photos.
- Arom, Simha et Renaud, Patrick - 1977, *Cameroon. Baka Pygmy Music*, Collection UNESCO « Musical Atlas », EMI 3 C 064 18265, 1 disque 30 cm 33 t. Enregistrements, notice, photos.
- Arom, Simha - 1978, *Anthologie de la Musique des Pygmées Aka*, OCORA 558 526/27/28, 1 coffret de 3 disques 30 cm 33 t. Enregistrements, notice, photos (Grand prix international du disque de l'Académie Charles Cros, avec la mention *In Honour*, « Prix du Président de la République »).
- Arom, Simha - 1984, *Central African Republic*, Collection UNESCO « Musical Atlas », EMI 64 1653901, 1 disque 30 cm 33 t. Enregistrements, notice, photos.
- Guillaume, Henri - 1982, *Chasseurs pygmées. Pygmées d'Afrique Centrale*, SELAF-ORSTOM, Collection « Tradition Orale », CETO 795, 1 disque 30 cm 33 t. Enregistrements (avec la collaboration de Renaud Surugue), notice, photos.

Physique nucléaire et corpusculaire

66-67-68 - Spécial Imagerie scientifique :

Peut-on voir les particules ?
François Jacquet.
Les images neutroniques.
André Michaudon.

69-70 - A la recherche :

Nouveaux noyaux exotiques.
Monique Bernas, Françoise Pougheon,
Pierre Roussel.

69-70 - Flash actualités :

Mimas, un nouvel injecteur pour Saturne.

Mathématiques et physique de base

64 - A la recherche :

Formes, vibrations et essais non destructifs.
Jean-Pierre Bourguignon.

66-67-68 - Spécial Imagerie scientifique :

Microscope électronique et microscope à effet tunnel.
Alain Bourrel, Franck Salvan, Alain Humbert.
Cartographie élémentaire à haute résolution spatiale.
Christian Jeanguillaume, Claude Lechêne,
Martine Tancé, Pierre Trebbia.

Sciences physiques pour l'ingénieur

65 - Enquête :

Les réseaux informatiques.
Max Fontel, Guy Pujolle.

66-67-68 - Spécial Imagerie scientifique :

L'image électronique dans le monde scientifique.
François Becker.
L'imagerie microonde.
Jean-Charles Bolomey, Christian Pichot.
Le microscope acoustique.
Jean-Marc Saurel, Jacques Attai.
Un jardin extraordinaire.
Jean François.
Synthèse d'images.
Claude Puech.
Quelles machines pour la synthèse d'images animées ?
Philippe Matherat.
Quelles architectures pour le traitement et la synthèse d'images ?
Pierre-Louis Wendel.
Relief, mouvement, couleurs dans les images holo-graphiques... ?
Gilbert Tribillon, Claudine Bainier.
Réflexion sur le transport des images.
Alain Giraud.
Images, outil de simulation et de prédiction de phénomènes.
Jean Mermet, Yvon Bressy.
L'holographie ou les images dans l'espace.
Patrick Meyruet.
Que voit le robot ?
Pierre André, Sylvie Jacquemart.
La vision rebelle à l'intelligence artificielle.
Robert Jeansoulin.

INDEX PAR MATIERES

Années 1986-1987

La caméra explore le temps.
Daniel Charraut, Jacques Duvernoy, Louis Hay.
Jouer, apprendre et décider avec des cartes.
Jean Varlet.
L'archivage des images : des fichiers aux bases de données.
Robert Jeansoulin.

69-70 - Débats et positions :

De la perception à l'action.
Commande vocale d'un bras articulé ou la construction d'une pyramide... de cubes grâce à la voix humaine.
Joseph-Jean Mariani.
Applications en robotique : la main artificielle.
Philippe Collet.

Chimie

64 - A la recherche :

Molécules : population électronique et ordre de spin.
Jean-Pierre Daudey, Jean-Paul Mairieu,
Daniel Maynaud.

65 - Flash actualités :

Le prix Roussel.

66-67-68 - Spécial Imagerie scientifique :

La RMN en chimie.
Eric Guithet, Jean-Yves Lallemand.
Les cristaux liquides.
Antoine Skoulios.
Les électrochromes.
Odile Bohé.
Les diphtalocyanines des lanthanides.
Maurice L'Her.
Représentations et simulations moléculaires.
Jacques-Emile Dubois, Jean-Pierre Doucet,
Jacques Weber.
Fausses « clés » pour des sites récepteurs de composés bioactifs.
Bernard-P. Roques.

69-70 - Distinction :

L'art de la molécule ou la chimie bien tempérée. Jean-Marie Lehn, Prix Nobel de chimie 1987.
Maryvonne Tissier.

Terre, océan, atmosphère, espace

66-67-68 - Spécial Imagerie scientifique :

Le radar et le géoïde marin.
Michel Lefebvre, Anny Cazenave.
La télédétection dans le visible et le proche infra-rouge en géographie.
Fernand Verger.
Le Lidar embarqué.
Gérard Mégie.

L'astronomie gamma.
Gibert Vedrenne.
Nature et image : de l'aquarelle aux électrons.
Yves Laissus, Marie-Thérèse Venec-Peyré.
Choix des palettes de couleur.
Marie Farge.
La télédétection : pour une imagerie de la surface de la Terre.
Michel Desbois.
Parmi les images, la carte :
Visualisation de la sismicité française par cartographie.
Michel Granet.
Reconnaissance de forme dans l'univers.
Albert Bijaoui.

69-70 - A la recherche :

Le projet Géoscope.
Barbara Romanowicz, Michel Cara.

69-70 - Flash actualités :

L'arc lumineux détecté dans un amas de galaxies : un mirage gravitationnel.

Sciences de la vie

64 - A la recherche :

Le chant des oiseaux.
Michel Kreutzer.
Qu'est-ce que la biométrie ?
Jean-Marie Legay.

65 - Itinéraires :

Nicolas Franceschini ou l'exploration des petits cerveaux.
Régine Ferré.

66-67-68 - Spécial Imagerie scientifique :

La caméra à positions.
Bernard Mazlière.
La microscopie à balayage.
Pierre Oudet.
Imagerie médicale ultra-sonore.
Mathias Fink.
L'imagerie médicale : un même organe, plusieurs techniques d'images.
Michel Bourguignon, Héric Valette,
Dominique Leguldec.
L'image des odeurs.
François Jourdan.

69-70 - Débats et positions :

De la perception à l'action.
Présentation.
Georges Chapouthier, Michel Imbert.
De la perception à l'action.
Jacques Paillard.
Le contrôle visuel des mouvements.
Daniel Beaubaton.
Le cortex cérébral et les fonctions sensori-motrices.
Marc Jeannerod.

Une nouvelle classe de neurones sensori-moteurs.
John Seal.

La perception visuelle du mouvement.
Claude Bonnet.

Activité du regard et perception visuelle.

Ariane Levy-Schoen et Kevin O'Regan.

Mouvement et perception des déplacements chez le nourrisson.

François Joven.

L'identification visuelle.

Simon Thorpe, Michel Imbert.

L'innervation motrice des fuseaux neuromusculaires.

Léna Jamet.

Le noyau ventro-latéral du thalamus et l'acquisition motrice.

Alain Berthoz.

Perception du mouvement et représentation de l'espace.

Michèle Fabre-Thorpe.

Mouvement et posture : antagonisme et coopération.

Jean Massion.

Attention et mouvements.

Jean-Marie Coquery.

Aspects cardiaques de la préparation à l'action chez l'insecte.

Bernard Thon.

69-70 - A la recherche :

La rage : un problème actuel.

Anne Flamaud.

Sciences de l'homme et de la société

64 - Débats et positions :

Une jeune discipline au CNRS : la recherche en gestion.

Présentation

Jean Bourdon.

De la gestion de la science à la science de la gestion.

Entretien avec Michèle Fardeau réalisé par Michel Friedman.

La recherche en gestion au CNRS.

Jean-Claude Moïsdon.

Les sciences de gestion en France :

tendances actuelles.

Henri Savall.

Le groupement scientifique « Informatique, mathématiques appliquées et gestion ».

Jean-Marie Doubilet.

Le Centre de recherche en gestion de l'Ecole polytechnique.

Hervé Dumez, Alain Jeunemaitre.

Mettre en évidence les coûts cachés.

Henri Savall.

L'évolution des firmes et ses déterminants.

Jean-Pierre Debourse, Isabelle Danjou.

Contraintes de gestion et tarification

publique : le cas d'EDF.

Martine Bungener.

La recherche en gestion et les collectivités locales. L'expérience du Centre de gestion

scientifique de l'Ecole des Mines de Paris.

Patrick Garnier, Jean-Claude Moïsdon.

Le Groupement de recherches coordonnées

sur l'administration locale.

Christian Le Lanier.

L'informatique de gestion au ministère de

l'Éducation nationale.

Claude Delobel.

La gestion financière et l'actuelle évolution des marchés financiers.

Michel Lavasseur.

64 - Témoignages :

Michel Seurat

Pierre Papon, André Miquel, Bruno Etienne,

Alain Touraine, André Bourgey.

Paul Bonnetant, Jérôme Lentin.

André Raymond.

64 - Enquête :

Les économies d'énergie dans les laboratoires.

Pierre Dejours, Jean Bouleau, Alain Tissier.

65 - Débats et positions :

L'ordinateur a-t-il changé les sciences de l'homme et de la société ?

Présentation.

Hervé Thiéry.

Des ordinateurs, pour quoi faire ?

Alain Degenne.

Une application de l'informatique en musicologie.

Hélène Charnassé.

Impact de l'informatique sur la recherche historique.

André Zysberg.

Un who's who en histoire.

Régine Ferré.

Le sociologue et ses données.

Philippe Cibols.

Ordinateur et terrain en Thaïlande.

Michel Bruneau.

Géographie : un renouveau assisté par ordinateur.

Denise Pumain.

La lexicométrie socio-politique.

Maurice Tournier.

La linguistique informatique.

Jean-Pierre Desclès.

Démographie : l'âge de raison.

Hervé Le Bras.

Sciences économiques : quand l'outil valide la parole.

Jean Bourdon.

Les nouveaux outils de l'archéologie.

Henri Ducasse.

Archéologie et calculateurs : vers une archéologie théorique.

Jean-Claude Gardin.

66-67-68 - Spécial Imagerie scientifique :

Un rapide retour vers le passé.

René Ginouvès.

L'image de la parole.

Mario Rossi.

Image de la musique.

Gilbert Rouget.

Photographier le théâtre pour la recherche.

Denis Bablet.

La photographie et l'œuvre d'art.

Magdeleine Hours.

Karnak et son jeu de puzzle.

Jean-Claude Golvin.

Parmi les images, la carte : variations

climatiques : modélisation et cartographie.

Grégoire Feyt, Marie-Françoise de

Saintignon.

Parmi les images, la carte : carte

géomorphologique de la France au

1/1 000 000.

Fernand Joly.

Parmi les images, la carte : climat et occupation du sol.

Jean Mounier.

Parmi les images, la carte : l'investissement attire l'investissement.

Roger Brunet.

Parmi les images, la carte : les voies de la francisation.

GRECO 9.

La caméra explore le temps.

Daniel Charraut, Jacques Duvernoy, Louis Hay.

Jouer, apprendre et décider avec des cartes.

Jean Varlet.

Un nouveau souffle pour les SHS : les banques d'images.

René Ginouvès.

Du langage à l'image.

Philippe Quéau.

La revanche.

François Dagognet.

Image mentale et pensée scientifique.

Michel Denis.

69-70 - A la recherche :

L'évolution des techniques salinières : la modernisation jadis et aujourd'hui.

Jean-Claude Hocquet.

Les Pygmées d'Afrique, maillon de

l'histoire.

Serge Bahuchet, France Clacore-Helss.

Simha Arom.

Divers

Politique de la recherche

64 - Editorial :

L'évolution du CNRS.

Pierre Papon.

64 - Les chemins de la science

La mobilité des chercheurs.

Jean-Jacques Duby.

65 - Editorial :

Serge Feneuille.

65 - Flash actualités

Des Instituts fédératifs voient le jour.

Relations internationales

64 - Coopération internationale :

Regards sur l'organisation de la recherche britannique.

Nina Pollé, Germaine Wild, Jacques Bordé.

65 - Coopération internationale :

Aspects de la recherche scientifique et technique au Japon.

Georges Rieu.

Information scientifique et technique

64 - Chercheurs-jeunes à la rencontre :

Le goût de la science.

Nina Berrebi.

65 - Chercheurs-jeunes à la rencontre :

Initiation à l'astronomie.

Monique Mounier-Kuhn, Jean-Pierre Sivan.

66-67-68 - Spécial Imagerie scientifique :

Editorial.

Goëry Delacôte.

69-70 - Editorial :

Vers un nouveau Courrier du CNRS.

Goëry Delacôte.

