

Le courrier du CNRS 66-67-68

Auteur(s) : CNRS

Les folios

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

114 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 66-67-68, 1987-06

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/158>

Copier

Présentation

Date(s)1987-06

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 pages114

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

LE COURRIER DU CNRS

66-67-68

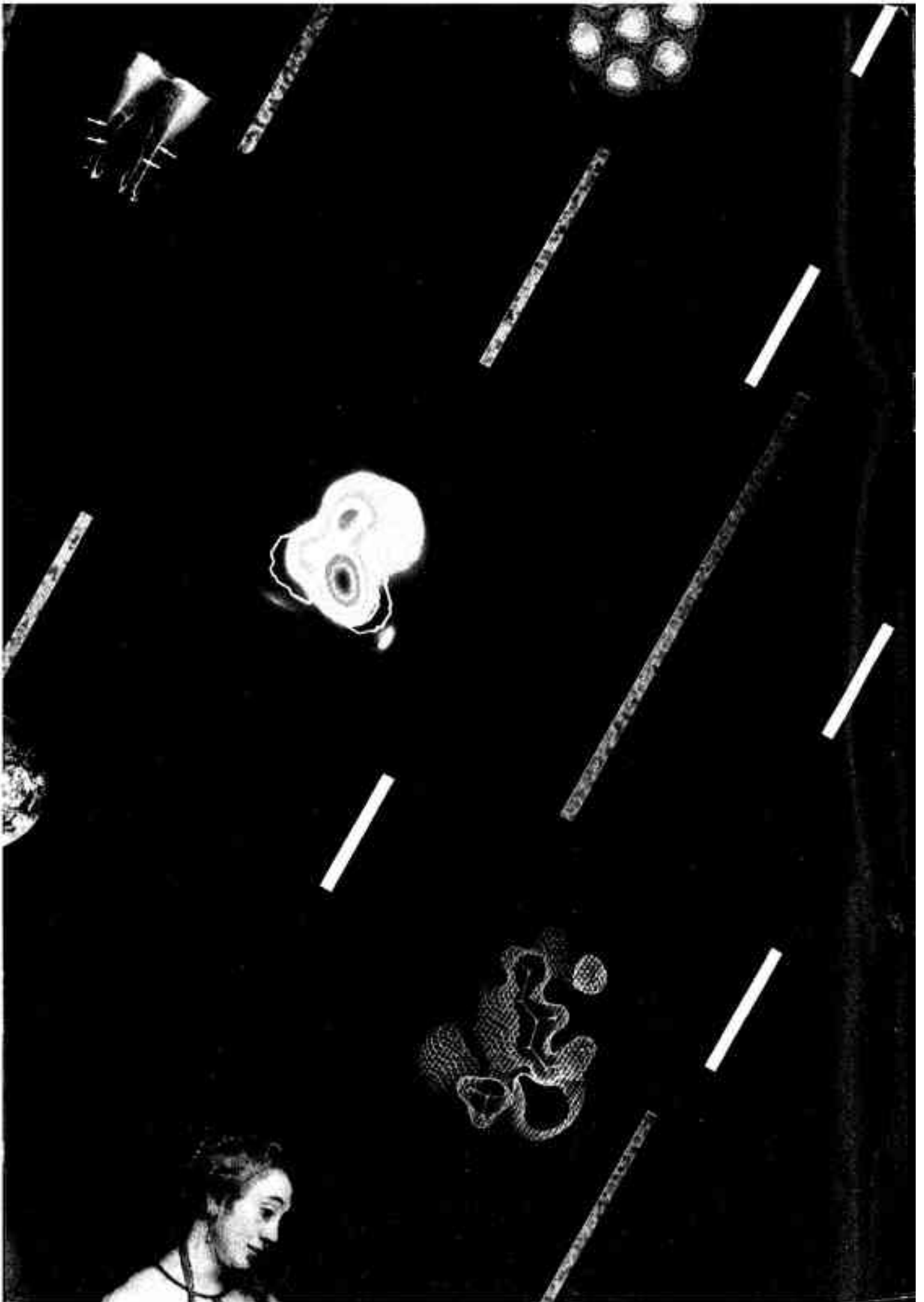
de la Presse
Bâtiment 19
1, avenue de la Terrasse

SPÉCIAL IMAGERIE SCIENTIFIQUE



CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Janvier - Juin 1987 - 40 F





EDITORIAL



Nous avons souhaité consacrer ce numéro thématique du *Courrier du CNRS* à l'imagerie scientifique.

Comme le dit fort justement François Becker dans son introduction, on ne peut comprendre cette nouvelle imagerie scientifique que dans le cadre élargi de la trilogie homme-monde-machine, et non plus dans le dialogue direct mais restreint homme-monde. Cette nouvelle manière de voir s'accompagne d'une part d'un élargissement des fonctions attribuées à l'image - l'image comme moyen synthétique de présentation, comme outil d'observation et de reconnaissance - et d'autre part de l'émergence de nouvelles fonctions - l'image comme outil d'analyse ou comme outil de simulation et de prédiction.

Il était donc utile de procéder à ce tour d'horizon, à cette présentation - elle-même imagée - du couple image-science. La tâche était complexe. Nous n'avons pas séparé l'image obtenue du procédé pour l'obtenir ou de l'usage que peut en faire le chercheur. Nous avons souhaité explorer tous les domaines de rayonnement, toutes les structures et tous les modes de fabrication des images. C'est en ce sens que nous parlons plutôt d'imagerie que simplement d'images. Et comme il s'agit avant tout des rapports entre l'imagerie et la recherche, c'est donc d'imagerie scientifique qu'il est question.

Le lecteur ne découvrira pas dans ce numéro une synthèse sur la question. Le terrain est trop mouvant. Il y trouvera plutôt une somme, quelques éléments de réflexion et d'histoire, en bref un instantané qui devrait - espérons-nous - l'informer, l'intriguer, lui donner le goût d'en savoir - ou plutôt d'en voir - davantage.

Goéry Delacôte

Directeur de l'Information scientifique et technique

S S O M M A I R E

EDITORIAL

Goéry Delacôte 1

INTRODUCTION

Un rapide retour vers le passé 4

A rapid return into the past

René Ginouvès

L'image électronique dans le monde scientifique 6

The electronic image in the scientific world

François Becker

L'IMAGE : L'ACQUÉRIR, LA PRODUIRE IMAGE: ACQUISITION AND PRODUCTION

REVELER L'INVISIBLE

REVEALING THE INVISIBLE

Peut-on voir les particules ? 10

Can elementary particles be seen?

François Jacquet

La caméra à poutons 12

The positron camera

Bernard Mazière

Les images neutroniques 13

Neutron images

André Michaudon

La RMN en chimie 18

NMR in Chemistry

Eric Guittet, Jean-Yves Lallemand

Microscopie électronique et microscope à effet tunnel 20

The electron microscope and tunnel effect microscope

Alain Bourret, Franck Salvan, Alain Humbert

La microscopie à balayage 23

The scanning microscope

Pierre Oudet

DECOUVRIR LE VIVANT

DISCOVERING THE LIVING WORLD

L'imagerie microonde 25

Microwave imaging

Jean-Charles Bolomey, Christian Fichot

Le microscope acoustique 28

The acoustic microscope

Jean-Marc Saurer, Jacques Attal

Imagerie médicale ultra-sonore 32

Ultrasound medical imaging

Mathias Flüh

DECOUVRIR LA PLANÈTE

DISCOVERING THE PLANET

Le radar et le géoïde marin 33

Radar and the marine geoid

Michel Lefebvre, Anny Cazenave

La télédétection dans le visible et le proche infra-rouge en géographie 35

Visible and near-infrared remote detection in geography

Fernand Verger

Le Lidar embarqué 36

Airborne Lidar

Gérard Mégie

DECOUVRIR L'ESPACE

DISCOVERING SPACE

L'astronomie gamma 37

Gamma astronomy

Gilbert Vedrenne

L'ÉVOLUTION DES TECHNIQUES

TECHNICAL PROGRESS

Nature et image : de l'aquarelle aux électrons 38

Nature and image : from watercolours to electrons

Yves Laisus, Marie-Thérèse Venec-Peyré

Un jardin extraordinaire 41

An extraordinary garden

Jean François

L'ORDINATEUR ET L'IMAGE

THE COMPUTER AND THE IMAGE

Synthèse d'images 44

Computer graphics

Claude Puech

Quelles machines pour la synthèse d'images animées ? 51

Which computer for electronic moving pictures?

Philippe Malherat

Quelles architectures pour le traitement et la synthèse d'images ? 52

Hardware structures for computer graphics and images processing

Pierre-Louis Wendel

REALISATION DE L'IMAGE

PRODUCTION OF IMAGES

Relief, mouvement, couleurs dans les images holographiques... ? 54

Relief, movement, and colors in holographic images...

Gilbert Tribillon, Claudine Boinier

Les cristaux liquides 58

Liquid crystals

Antoine Skoulios

Les électrochromes 59

Electrochromes

Océle Bohké

Les diphtalocyanines des lanthanides 60

Lanthanide diphtalocyanine

Maurice L'Hér

Choix des palettes de couleur 61

Choice of colour palettes

Marie Farge

LE TRANSPORT DES IMAGES

IMAGE TRANSPORT

Réflexion sur le transport des images 66

Thought about image transport

Alain Giraud

Siège

que

l'air

rra

ette

9 17

DES IMAGES : POUR QUI ? POUR QUOI ?

IMAGES: WHO FOR AND WHAT FOR?

LES IMAGES DU CHIMISTE

IMAGES FOR THE CHEMIST

Représentations et simulations moléculaires 68

Molecular representation and simulation

Jacques-Émile Dubois, Jean-Pierre Doucet, Jacques Weber

Fausibles « clés » pour des sites récepteurs de composés bioactifs 71

False "keys" for receptor sites of bioactive compounds

Bernard-P. Roques

LES IMAGES DE LA VIE

IMAGES OF LIFE

L'imagerie médicale : un même organe, plusieurs techniques d'images 72

Medical imaging: several methods for a same organ

Michel Bourguignon, Héric Valette, Dominique Leguadec

L'image des odeurs 76

The image of odours

François Jourdan

Cartographie élémentaire à haute résolution spatiale 77

Elementary high spatial resolution cartography

Christian Jeanguillaume, Claude Lechêre, Martine Tencé, Pierre Trebbia

LES IMAGES DE LA TERRE

IMAGES OF THE EARTH

La télédétection : pour une imagerie de la surface de la terre 79

Remote sensing on imagery of the Earth's surface

Michel Desbois

Parmi les images, la carte :

Among these images, the map:

Variations climatiques : modélisation et cartographie 81

Climatic changes: modelling and cartography

Grégoire Feys, Marie-Françoise de Saintignon

Carte géomorphologique de la France au 1 : 1 000 000 82

The 1 : 1 000 000 geomorphic map of France

Fernand Joly

Climat et occupation du sol 83

Climate and land use

Jean Mounier

Visualisation de la sismicité française par cartographie 83

Cartographic visualization of French seismicity

Michel Granet

L'investissement attire l'investissement 84

Investment attracts investment

Roger Bruet

Les voies de la francisation 84

Ways of Francisation

GRECO 9

LES IMAGES DE L'ACTIVITE HUMAINE

IMAGES OF HUMAN ACTIVITY

L'image de la parole 85

Images of speech

Mario Rossi

Image de la musique 88

Images of music

Gilbert Rouget

Photographier le théâtre pour la recherche 89

Photographing the theatre for research

Denis Bahlet

La photographie et l'œuvre d'art 90

Photography and the work of art

Magdeleine Hours

Karnak et son jeu de puzzle 91

Karnak and its set of puzzles

Jean-Claude Gelin

COMMENT S'AIDER DE L'ORDINATEUR

HOW TO MAKE USE OF THE COMPUTER

Image, outil de simulation et de prédiction de phénomènes 92

The image as a tool for simulating and predicting phenomena

Jean Mermet, Yvon Bressy

L'archivage des images : des fichiers aux bases de données 93

Archiving images: from files to data bases

Robert Jeansoulin

Un nouveau souffle pour les SHS : les banques d'images 96

A new role for the SHS: image banks

René Ginouvès

INTERPRETATION ET UTILISATION DES IMAGES

INTERPRETATION AND USE OF IMAGES

L'holographie ou les images dans l'espace 98

Holography or images in space

Patrick Meyruels

Que voit le robot ? 99

What can robot see?

Pierre André, Sylvie Jacquemart

La vision rebelle à l'intelligence artificielle 100

Vision resists artificial intelligence

Robert Jeansoulin

Reconnaissance de forme dans l'univers 102

Recognition of form in the universe

Albert Bijaoui

La caméra explore le temps 105

The camera explores time

Daniel Charraut, Jacques Duvernoy, Louis Hay

Jouer, apprendre et décider avec des cartes 106

Playing, learning and deciding with cards

Jean Varlet

LE SCIENTIFIQUE INTERPELLÉ PAR L'IMAGE

THE SCIENTIST QUESTIONED BY THE IMAGE

Du langage à l'image 108

From language to the image

Philippe Quin

La revanche 110

The revenge

François Dagognet

Image mentale et pensée scientifique 111

Mental images and scientific reasoning

Michel Denis

Directeur de la publication : Goéry Delacôte.

Rédacteur en chef : Véronique Bessonnet-Condé.

Secrétaire de rédaction : Françoise Bescod.

Secrétariat : Martine Roche.

Entretiens : Monique Mounier-Kuhn.

Comité de rédaction : Robert Barbaud, Jean

Bourdon, Georges Chapouthier, Bernard Diemy,

Claire Dupas, Catherine Fuchs, Jean-Philippe

Geuet, James Héblot, Louis Jaumeau, Jean Lecc,

Jacqueline Mirabel, Jean Montuelle, Janine

Rondelet, Sylvie Sahai, Hervé Thierry, Maryvonne

Tustier, Guy Vidal Naquet.

Membres correspondants : Nadine Chalem-

Gourin, Jean Choddy, Gérard Lilamand.

Revue Mensuelle comportant cinq numéros par an.

Vente au numéro : 20 francs (numéros spéciaux : 40 francs).

Nous remercions les auteurs et les organismes qui ont

participé à la rédaction. Les illustrations et les diagrammes

introduits ont été réalisés par la rédaction. Les textes et

illustrations peuvent être reproduits sous réserve de

l'autorisation écrite du directeur de la publication.

Direction artistique : Claude Gollet - François Versteil.

Tangy Hessel, 17, rue Georges Bouvenot, 92120

Maisons-Laffitte. Réimpression : Roto-France Impression,

Boulevard de Beaulieu, Evreuxville, 17200 Torcy.

Photogravure : Plust 11, 45670-9235. Composition :

SEDAG, 4329-8554. Composés par : AD 303.

ISSN : 2222-0492 - ISSN : 0-53-895-X.

© Centre national de la recherche scientifique.

S
O
M
M
A
I
R
E

CNRS
Délegation du Siège
Service Logistique
des Archives - Bâtiment 19
Centre de la Terre 10
Tél. 01-69 82 39 17

UN RAPIDE RETOUR VERS LE PASSÉ

René Ginouvès

L'image sans les mots n'est rien. Sa place, de plus en plus grande dans le développement de la science, ne doit pas nous faire oublier que son poids est fonction de la qualité de l'interprétation qui lui est appliquée.

Depuis les âges les plus obscurs, l'image n'a cessé d'éclairer les hommes : avant même de signifier le monde et de raconter les événements, elle posait sur les parois des cavernes, avec la silhouette de la main, les empreintes digitales de l'humanité ; et c'est à un processus d'enveloppement que se rapportent très probablement les représentations de chasse, qui préparaient et promettaient la domination sur l'animal. Mais la connaissance factuelle apparaît déjà au plafond étalé de la tombe de Sennefer à Deir-el-Bahari, dans l'Égypte du début du XV^e siècle avant notre ère, avec des constellations dont certaines au moins peuvent être identifiées ; bientôt les figures du zodiaque imposent leur organisation au ciel, en fixant un savoir indispensable à ceux qui, dans le désert, circulent la nuit. Et il avait suffi d'un éclat de pierre à un architecte du XXVII^e siècle avant notre ère, toujours en Égypte, pour enregistrer la courbe d'une voûte, avec les indications chiffrées qui en donnent la structure mathématique et permettront de la reconstruire.

Nous imaginons ainsi volontiers les penseurs de la Grèce, dès les débuts du VI^e siècle avant J.-C., — Thalès de Milet ou Pythagore de Samos —, dessinant avec un bâton, dans la poussière du sol, les figures géométriques ou astronomiques dont leurs élèves, serrés derrière eux, suivent la lente construction ; mais les tessons de poterie pouvaient recevoir des traces moins provisoires ; et c'est surtout le rouleau de papyrus, le volumen, qui servait à fixer toutes les images rendues nécessaires par le développement de la science d'observation, à partir d'Aristote, comme illustration et support du discours — qu'il s'agisse des traités d'histoire naturelle comme celui de Théophraste, l'élève d'Aristote, ou ceux d'Archimède sur les figures géométriques ou sur la construction des machines, ou cette *imago mundi* que préparent les géographes entre Eratosthène, au III^e siècle avant notre ère, et Claude Ptolémée, au II^e siècle après

J.-C. : la Table de Peutinger, établie au XIII^e siècle à partir d'un modèle antique, montre, avec les grandes voies du Bas Empire romain, la manière dont on se figurait alors le monde. Ces cartes sont très tôt transposées en mosaïques, surtout en Orient.

À partir du Bas Empire, aussi, l'emploi du parchemin constitue, pour la diffusion de ces images de la science, un support privilégié : c'est lui en particulier qui montrait aux médecins quels traitements appliquer aux maladies du corps humain, selon des formules que l'imagerie médiévale nous a fidèlement rapportées.

Mais, au XV^e siècle, la gravure et l'imprimerie ouvrent des conditions nouvelles à la diffusion de l'image, qui peut être mécanisée, alors qu'auparavant elle dépendait, comme les textes scientifiques qu'elle accompagnait, directement de la main de l'homme. Désormais, c'est le livre — le livre illustré — qui permet de divulguer tous les acquis de la recherche fondamentale et technique, même si l'image garde, à côté de cette fonction, une fonction d'édification qui s'était développée au Moyen Âge. C'est aussi l'époque où la vision de la Terre se concrétise : déjà du XIII^e au XV^e siècle les portulans ont fixé les principaux accidents des côtes dans le monde connu et, au XVI^e siècle, Mercator applique aux mappemondes le système de projection utilisé pour ces cartes marines ; mais il faut attendre le début du XVIII^e siècle pour que se précise l'idée de carte géologique, à la fin du siècle certaines sont en couleurs, et il faut attendre le milieu du XIX^e siècle pour que soit publiée la première carte géologique du monde. Dès le début du XVIII^e siècle aussi, on trouve en Suisse de beaux atlas de poissons, de plantes fossiles. Et il suffit de rappeler que les encyclopédies ne pouvaient se concevoir sans illustrations : celle de Diderot et d'Alembert en comprend onze volumes.

Mais les sciences "humaines", comme on dit aujourd'hui, furent beaucoup plus lentes à utiliser les images : encore dans les années 1930, le Larousse du XX^e siècle recommandait l'histoire des Grecs de V. Dury, datant de 1886-1888, car elle "garde encore l'intérêt d'une abondante illustration, qui manque à presque toutes les grandes histoires de l'Antiquité".

Alors vint la photographie : ce n'était plus, cette fois, la reproduction de l'image qui était mécanisée, mais sa production elle-même, apportant, avec une exceptionnelle richesse d'information, une précision dont il ne faut pourtant pas oublier combien elle est relative : l'objectif photographique est si peu objectif qu'un simple changement de focale change aussi les caractères fondamentaux de l'image.

Il est à peine besoin de souligner le rôle que jouent les photographies dans l'enregistrement et dans la diffusion des connaissances, même si des impératifs économiques limitent l'emploi de l'image en couleurs. Mais ce qui est le plus remarquable, c'est que désormais la photographie ne se contente pas de fixer un certain état de la science, elle en facilite l'avancement. C'est le cas pour la photogra-

phie aérienne, quand la photo-interprétation permet de détecter des bâtiments ensevelis, des routes antiques, et même, avec certaines techniques, le parcellaire ancien, et des parcellaires superposés. C'est le cas, dans la physique atomique, quand les images permettent de suivre des trajectoires de particules élémentaires ; c'est le cas pour la géomorphologie, la climatologie, la géographie des productions ; et combien de renseignements indicatifs peuvent nous apporter, sur les systèmes sociaux, économiques, matériels, mentaux même du passé, des photographies anciennes, celles par exemple d'une petite ville vers les débris de notre siècle, renseignements dont l'auteur des clichés n'avait lui-même aucune conscience.

Ce sont encore des images, cette fois créées par le calcul, ces diagrammes, histogrammes, stéréogrammes qui révèlent au premier coup d'œil le résultat d'études statistiques, ces courbes qui expriment le mouvement de réalités économiques, toutes ces figures qui d'ailleurs, à l'heure actuelle, n'exigent même plus le support du papier, mais se créent et se transforment sur les écrans de l'informatique. — Images électroniques dont il sera essentiellement question dans la présente publication, qui peuvent même rester virtuelles dans une mémoire, alors que le disque optique numérique et le vidéodisque permettent d'emmagasiner et de gérer des masses considérables de documents figurés avec un confort d'utilisation jusqu'ici inimaginable.

Ainsi, puisque nous vivons, comme l'on dit, dans une civilisation de l'image, il est normal que l'image prenne une place de plus en plus grande dans l'avancement de la science. Peut-être simplement convient-il de remarquer que cette énorme vague ne saurait exploiter les mots, parce qu'ils expriment les concepts, ni les concepts, parce qu'ils sont nécessaires au raisonnement, fondamentalement, avec l'expérience, de la pensée scientifique : quel que soit l'impact propre de l'image, son poids est fonction de la qualité de l'interprétation qui lui est appliquée, et qui se traduit en langage.

Fig. 1 - Calcul de la courbure d'une voûte. Dessin sur un éclat de pierre provenant de Saqqarah, Égypte, datant du XXVII^e siècle avant notre ère, et donnant, pour des intervalles réguliers, la hauteur de la construction. D'après William H. Peck, *Drawings from Ancient Egypt, Thebes and Hadra*, London, 1978, p. 193, fig. 126. © John G. Ross.

Fig. 2 - Un perroquet. Mosaïque d'un palais de Pergame, datant du II^e siècle avant notre ère et transposant probablement l'image d'un traité d'histoire naturelle (on peut remarquer la précision du dessin et des couleurs). Elle est publiée, sous la forme qu'on voit ici, dans la grande série des *Altentümer von Pergamon*, éditée à Berlin à partir de 1885, à une époque où le livre reproduisait non des photographies en couleurs, mais des aquarelles comme celle-ci, d'ailleurs admirablement exécutées et imprimées. Le dernier avatar (provisoire) de cette image : elle est désormais enregistrée dans le vidéodisque dont il est question page 96 (2^e article).

René Ginouvès, professeur à l'université de Paris X, responsable de l'unité associée "mosaïque, peinture et stuc, informatique en archéologie classique" (UA 375 CNRS), Institut d'art et d'archéologie, 3, rue Michelet, 75006 Paris.

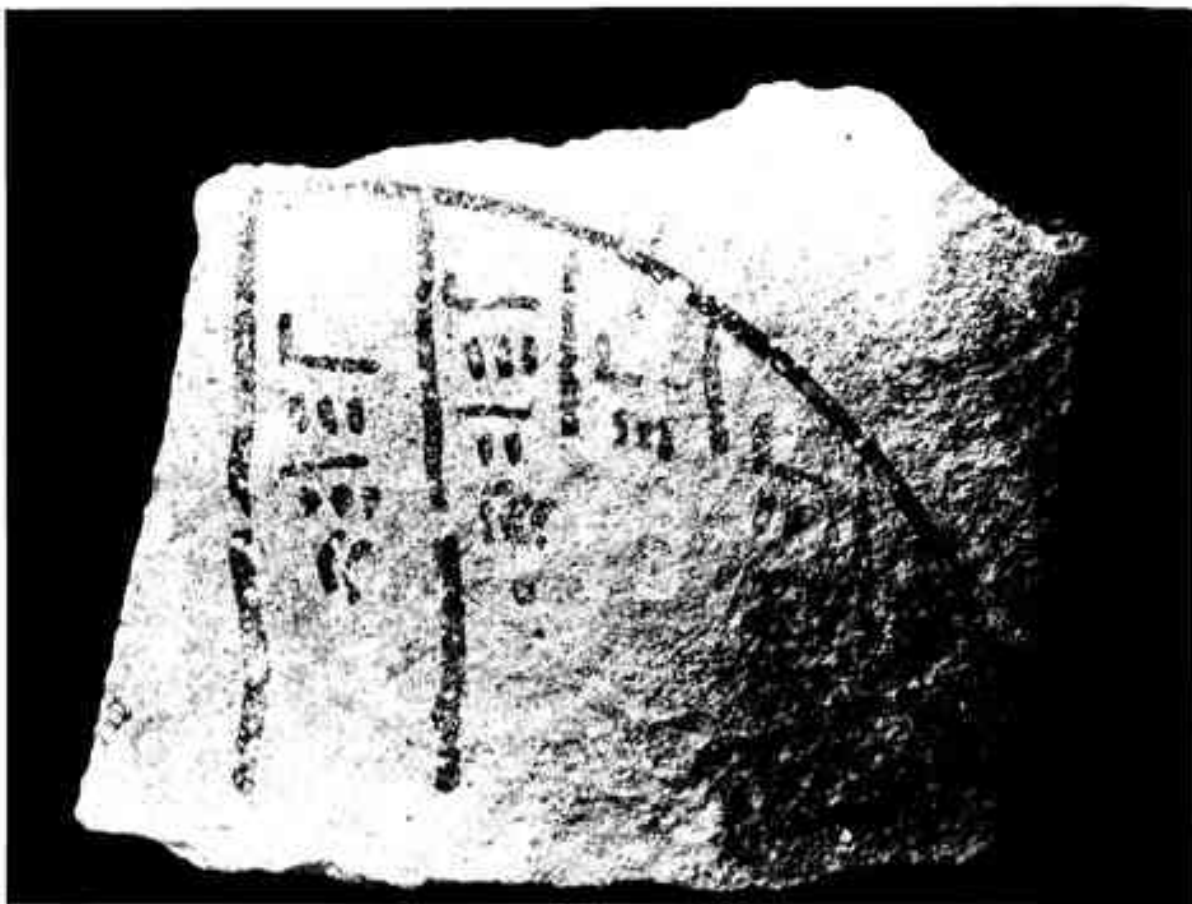


Fig. 1



Fig. 2

L'IMAGE ÉLECTRONIQUE DANS LE MONDE SCIENTIFIQUE

François Becker

Nous vivons à une époque où l'image est omniprésente. Son caractère universel, ses capacités de synthèse prodigieuses, son aspect fascinant font, en effet, de l'image un moyen de communication, d'information et de suggestion d'une puissance exceptionnelle. L'image n'est-elle pas une des portes d'entrée privilégiée dans le monde de l'imaginaire et la distance entre image et magie n'est-elle pas très courte ?

L'image apparaît partout, dans les domaines les plus variés et sous les formes les plus diverses. Le pictogramme, le crayon ou la plume ont, en effet, perdu depuis longtemps leur monopole dans la création des images. Bien entamé par l'arrivée de la photographie, ce monopole a éclaté sous la poussée de l'image électronique. Autrefois réservée à une minorité, l'image devient aujourd'hui accessible à tous grâce aux immenses possibilités qu'offrent les systèmes mis au point pour la créer, la fabriquer, la transmettre et la diffuser.

Les scientifiques n'ont pas attendu cette explosion pour saisir le rôle irremplaçable que jouent l'image et le graphique comme outil de recherche et comme moyen de transmission, de mémorisation et de présentation des connaissances. L'histoire des sciences est en effet parsemée d'images traduisant à chacune des époques, et chacune à leur façon, l'état du savoir et les modes du cheminement de la pensée scientifique dans l'élaboration de ces connaissances. Cet inventaire par l'image de l'état de l'art à une époque donnée se fait non seulement à travers ce que représente l'image elle-

même et la manière dont elle a été conçue, mais aussi à travers les techniques utilisées et la nature même des matériaux employés pour la réaliser. Cette interaction entre image et monde scientifique s'est en effet toujours exercée à double sens et on assiste aujourd'hui à une explosion de ce processus imbriquant de façon de plus en plus étroite progrès scientifique et progrès dans ce qu'on appelle maintenant les sciences de l'image.

Après la révolution extrêmement féconde produite dans le monde scientifique par la photographie, les progrès réalisés dans les systèmes d'acquisition et de traitement des données ont conduit à une suite de bouleversements tout aussi spectaculaires. L'image conquiert l'ensemble du spectre électromagnétique, les rayons gamma jusqu'aux hyperfréquences, puis s'empare des diverses sources d'énergie capables de véhiculer des informations, tels les faisceaux d'électrons et de particules, les ondes acoustiques.

Ayant ainsi ouvert à la vision humaine un domaine extrêmement vaste, source de découvertes nombreuses, l'image électronique fait éclater les limites étroites du champ de la vision humaine. Après avoir donné accès à l'infiniment petit, grâce au développement des techniques de microscopie, l'image ouvre les portes de l'infiniment grand et de l'infiniment loin grâce aux télescopes, aux satellites et aux sondes spatiales, transformant chaque fois profondément les sciences concernées et permettant même à certaines de passer du qualitatif au quantitatif.

C'est maintenant, à côté de l'photographie, la conquête de la troisième dimension permise par le développement des logiciels 3D et l'accès aux modèles eux-mêmes, qui peuvent être visualisés

grâce aux images de synthèse.

C'est à cette histoire vivante, à laquelle de nombreuses disciplines participent, que les articles de ce numéro sont consacrés. Ils illustrent de nombreux aspects des acquis récents tant dans les sciences de l'image que dans les disciplines où l'image est un outil de recherche fécond.

Les images électroniques et leurs limites

Les images électroniques se présentent sous deux formes : raster et graphique ou encore matricielle et vectorielle. L'image type raster est formée de taches réparties suivant les lignes et les colonnes d'une matrice. Chacune de ces taches, éléments d'une image est appelée pixel en anglais (de la contraction de picture element).

Une image type raster est donc la représentation du champ bidimensionnel d'une grandeur scalaire repérée par le "ton du gris" ou la couleur de chaque pixel. On distingue les images analogiques (par exemple la photographie) des images numériques dans lesquelles chaque ton de gris ou couleur est caractérisé par un nombre.

Le graphique ou image vectorielle est essentiellement formé de lignes. L'information donnée en chaque point contient les indications nécessaires pour tracer un trait jusqu'au point suivant. Il n'est pas question ici de variation d'intensité, comme pour l'image raster.

En fait, on mêle de plus en plus les images et les graphiques, le graphique superposé soulignant certains aspects de l'image ; à l'inverse, il existe des programmes de remplissage de faces, d'ombrages qui permettent aux graphiques de ressembler à des images.

On fait aussi la distinction entre les images de synthèse ou images conceptuelles et les images réelles. Les premières sont des images dont le champ bi-dimensionnel qu'elles représentent a été généré théoriquement à partir d'un modèle, tandis que les secondes sont générées à partir d'une grandeur physique mesurée par un système d'acquisition ou des graphiques générés à partir d'une telle image, comme par exemple les contours d'objets.

Lors des traitements et stockages des images, on introduit souvent la notion d'image virtuelle par opposition aux images réalisées dont les pixels sont réellement présents sur le support de l'image, qu'il s'agisse d'une mémoire d'ordinateur, de la mémoire de visualisation d'un écran, de bandes magnétiques ou encore de photographie. Les images virtuelles, au contraire, sont des images latentes dans une mémoire. Cette mémoire contient toutes les données permettant de calculer les éléments de l'image, mais ils ne sont pas calculés. Ceci permet de gagner beaucoup de place mémoire. À titre d'exemple, mémoriser une image du satellite Spot nécessite plus de 100 mégabits, alors que mémoriser les paramètres d'une transformation peut ne nécessiter que quelques dizaines

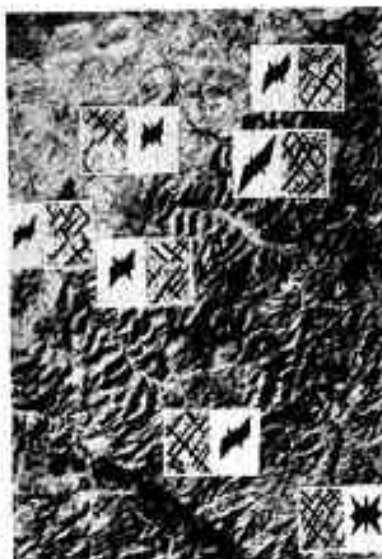


Fig. 1 - Recherche automatique de réseaux de structures (Votans) et rosaces d'occurrence.

François Becker, professeur à l'École nationale supérieure de physique de Strasbourg (ENSPS), Laboratoire des sciences de l'image et de la télé-détection (LIA 1207), université de Strasbourg I, 7, rue de l'Université, 67000 Strasbourg, directeur scientifique du groupement scientifique de télédétection spatiale de Strasbourg (GS 63).

nes de bits. L'image latente est réalisée (c'est-à-dire que l'opération qui la crée est effectuée) au moment où elle est appelée.

Malgré leurs nombreuses ressources, on ne peut tout représenter avec les images qui ont leurs limites. Ainsi, la représentation de champs scalaires tri-dimensionnels est quasiment impossible. Pour représenter la troisième dimension, il faut avoir recours à une série de plans image et s'appuyer sur les ressources des logiciels 3D, ou encore faire appel à la perspective. De même la représentation des champs vectoriels bi-dimensionnels est très difficile ; cependant certaines tentatives ont été faites.

La fabrication des images

La fabrication des images se déroule en trois grandes étapes : l'acquisition des données, leur traitement et leur visualisation. Ces étapes sont réalisées dans les systèmes de traitement d'images. L'acquisition des données est évidemment très différente selon qu'il s'agit d'image réelle ou d'image de synthèse. Dans ce dernier cas, il suffit d'entrer dans le système de traitement d'images un modèle mathématique donnant le champ $S(X, Y)$. Pour les images réelles, les choses sont beaucoup plus complexes et dépendent :

- du véhicule de l'information utilisé qui peut être le rayonnement électromagnétique dans toute l'étendue de son spectre, les ondes acoustiques, les faisceaux d'électrons ou de particules ;
- du processus d'élaboration de l'information caractérisant l'objet observé qui peut être la réflexion, l'émission propre (infrarouge, hyperfréquence, etc.), la diffusion, la fluorescence, la résonance magnétique nucléaire, etc. ;
- du type de saïtie qui peut être passive sur la source d'énergie ne fait pas partie du système d'acquisition (radiométrie infrarouge, sources radioactives, etc.), ou active dans le cas contraire comme dans la microscopie électronique ou l'imagerie radar ;

— du mode d'acquisition qui peut se faire par pixel de façon séquentielle (radiomètres à balayage par exemple) ou simultanée (caméra à matrice de détecteurs par exemple) ou qui peut se faire de façon globale par reconstruction des caractéristiques de la source obtenues en résolvant le problème inverse correspondant au dispositif d'acquisition. Des exemples sont présentés dans les différents articles de ce numéro.

Les images électroniques pour la recherche

L'image a été largement utilisée par les scientifiques comme outil de recherche et comme moyen de communication, de représentation et de mémorisation des résultats de leurs recherches. Cependant, l'image a longtemps été limitée dans ces fonctions, d'abord parce qu'elle ne s'appuyait que sur le système œil-cerveau, extraordinaire dans son domaine de sensibilité (la partie visible du spec-

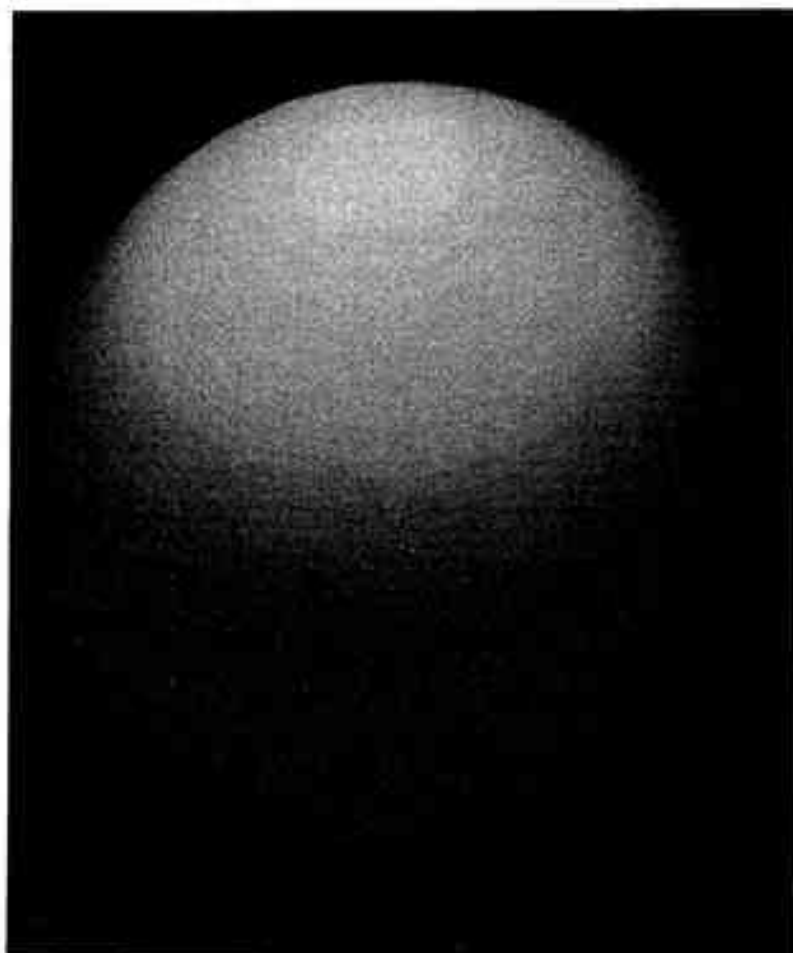
Fig. 2 - Image d'un modèle mathématique. Surface illuminée. Cette modélisation est liée à un problème chimique. Le procédé mathématique est une interpolation par une spline-fonction à deux variables.

Fig. 3 - Image de synthèse représentant des scènes d'objets géométriques avec ombre portée. Le logiciel permet de représenter plusieurs objets géométriques avec possibilité d'éclairage et d'ombrage.



© CNRS J.P. Magné, Y. Thévenaz

Fig. 2



© CNRS J.P. Magné, Y. Thévenaz

Fig. 3



© M.P. SMAIL, EVANS

Fig. 4 - Image de télédétection (région de Strasbourg) traitée au LST pour faire ressortir les contrastes. À noter en particulier les frontières terre/eau. Exemple : le Rhin, les bassins de la zone portuaire sud, etc.

tre électromagnétique), mais limitée à ce domaine, ensuite, parce qu'essentiellement analogique, l'image pouvait difficilement véhiculer des informations quantitatives et enfin, parce qu'elle ne permettait pas de communiquer avec les outils de plus en plus performants utilisés par les chercheurs. L'arrivée des convertisseurs électro-optiques, des nouvelles techniques d'acquisition et des systèmes de traitement d'images a fait éclater ces trois limites : l'image devient numérique, n'est plus limitée à la partie visible du spectre du rayonnement électromagnétique et permet maintenant de communiquer avec les machines.

En associant ainsi les machines au dialogue homme-monde, l'image se trouve projetée au centre d'une trilogie homme-monde-machine, dont elle est un des moyens d'échange privilégiés, les machines actuelles peuvent en effet lire sans problème les images qui lui communiquent les hommes quelque soit leur support (bande magnétique, photographie, etc.). Elles leur transmettent à leur tour des images sur tous les supports disponibles. Les machines communiquent aussi directement avec le monde en enregistrant des images, en les interprétant et en les utilisant. C'est par exemple le cas de la vision robotique qui permet au robot

de saisir un objet de forme donnée ou de se promener en évitant des obstacles. Les machines peuvent aussi échanger entre elles des images. Mais là, des limites sont imposées par la vitesse de transmission des réseaux. Aussi a-t-on entrepris des recherches sur les fibres optiques qui permettent d'accéder à des vitesses bien plus grandes, déjà accessibles aux télécommunications avec, et par les satellites.

Les progrès réalisés dans les techniques d'acquisition et de traitement des images ont aussi accru de façon très importante le domaine d'utilisation des images. En étendant les limites du visible, les systèmes actuels donnent, en effet, une vision "multipliée" de notre monde. Ils permettent, entre autres :

- de visualiser des phénomènes inaccessibles à la vision directe tant par les processus mis en jeu que par les véhicules de l'information utilisés. Dans les articles qui suivent seront présentés des exemples faisant intervenir les divers domaines du spectre électromagnétique, les ondes acoustiques, les faisceaux d'électrons, la résonance magnétique nucléaire, etc. ;
- d'accélérer ou de ralentir les processus d'évolution, notamment grâce à des modèles dynamiques ;
- de mettre à portée de l'œil, des phénomènes inaccessibles autrement, à cause de leur distance ou de leurs dimensions ;
- de visualiser des modèles mathématiques et donc de comparer globalement un modèle avec

les phénomènes qu'il modélise ;

- de modifier des images interactivement dans un dialogue homme-machine de façon à les transformer en temps réel à la volonté de l'utilisateur. Ces diverses possibilités apportent-elles quelque chose au monde scientifique ou ne sont-elles que des gadgets ? Cette question n'est pas anodine. Elle renvoie en effet aux rapports complexes entre le scientifique et l'image. Elle fait aussi référence à la tentation pour le scientifique de se limiter à la réalisation de belles images et de ne juger la qualité des résultats scientifiques obtenus qu'à l'esthétique des images qui les représentent.

On peut cependant noter que l'image est :

- un moyen rapide, efficace, synthétique pour présenter et comparer des résultats. Ici, l'art d'organiser l'espace et les couleurs dans une image pour en accroître l'efficacité de la représentation est très important ;

- un outil d'observation et de reconnaissance de plus en plus utilisé et de plus en plus efficace grâce à la multiplicité des phénomènes visualisables. Ainsi, la comparaison d'images réalisées à partir de méthodes d'acquisition différentes est-elle extrêmement riche en enseignements. Les techniques de traitement d'images associées à l'interactivité constituent une aide efficace à l'interprétation de ces observations. Elles peuvent même conduire à une interprétation automatique des images ;

- un outil original d'analyse permettant de jouer simultanément avec les variables espace, temps, longueur d'onde. La transformée de Fourier spatiale par exemple, renseigne sur les structures périodiques d'espace et les directions selon lesquelles s'organisent les pixels ;

- un outil de simulation et de prédiction qui s'appuie sur les possibilités de visualisation des modèles. Ainsi, l'image permet-elle de visualiser les résultats d'une expérience "numérique", ou de simuler les écoulements d'un fluide. C'est aussi le domaine des CAO, DAO, XAO (conception, dessin, X., assisté par ordinateur), techniques utilisées avec succès aussi bien dans les sciences fondamentales que dans les sciences appliquées. C'est aussi par excellence, le domaine de la confrontation des modèles avec la réalité expérimentale.

Il arrive alors fréquemment que la somme des images restituées nécessite une sélection de l'information difficilement maîtrisable ; aussi, un très petit nombre d'images seulement peut être exploité. C'est particulièrement le cas en télédétection où le très grand nombre d'images acquises, rend impossible leur analyse visuelle systématique. Aussi, pour en permettre une utilisation rationnelle, il est indispensable de développer des bases de données images intelligentes et des systèmes experts. De tels systèmes commencent à fonctionner dans plusieurs domaines tels la chimie moléculaire ou la télédétection.

L'image électronique, qu'elle soit sous forme d'image proprement dite (type raster) ou sous forme de graphique (type vectoriel), modifie de façon importante les conditions de la recherche dans de nombreuses disciplines et conduit à de multiples applications tant dans le milieu industriel que dans les services et dans les arts.

Cette évolution est explicitée et approfondie dans différents articles de ce numéro illustrant dans les disciplines concernées les multiples aspects de l'image électronique.

L'IMAGE : L'ACQUÉRIR, LA PRODUIRE

Les objets dont on veut obtenir une représentation sous forme d'image vont des particules élémentaires aux galaxies en passant par les organes internes d'êtres vivants et les formations géologiques. On assiste à un foisonnement de techniques radicalement différentes les unes des autres et spécifiques à chaque type d'investigation.

La résonance magnétique nucléaire (article d'Eric Guitet, Jean-Yves Lallemand), l'échographie (article de Mathias Fink) sont des termes dont tout le monde a entendu parler et qui recouvrent à la fois des recherches fondamentales et des techniques très sophistiquées et poussées d'instrumentation.

Sans pouvoir prétendre à l'exhaustivité, les premiers articles de ce chapitre présentent un vaste panorama de ces nouvelles méthodes qui connaissent des développements considérables.

Pour la production des images, les textes d'Yves Laisus, Marie-Thérèse Venec Peyré et de Jean Françon présentent un raccourci saisissant de l'évolution en ce domaine : des images obtenues par observation directe et dessin sur papier d'animaux et de végétaux aux images obtenues par microscope électronique, à l'obtention de formes d'arbres créées par des algorithmes sur écran d'ordinateur. Cette dernière technique de production par ordinateur est développée dans les articles de Claude Puech, Pierre-Louis Wendel et Philippe Matherat ; ces deux derniers articles se complétant dans la mesure où le texte de Pierre-Louis Wendel présente l'architecture générale d'un système complet de traitement d'image celui de Philippe Matherat examinant les contraintes pour l'ordinateur central.

On peut également noter que la production d'une image peut être faite sans qu'il y ait acquisition. En effet, si un artiste peut concevoir un tableau sans modèle, de même une image peut être obtenue de manière synthétique par des méthodes de type algorithmique, ce qui est l'objet de l'article de Claude Puech.

Les articles de Odile Bohnké, Maurice l'Her, Gilbert Tribillon, Claudine Bainier et Marie Farge traitent quant à eux des méthodes matérielles de fabrication de l'image. Enfin, le problème de la transmission des images, qui est essentiel, est abordé dans le texte d'Alain Giraud.



PEUT-ON VOIR LES PARTICULES ?

François Jacquet

Les particules sont invisibles mais elles laissent des traces que l'on peut voir ; et des traces si précises qu'il est possible d'en déduire les fiches signalétiques détaillées de ces particules.

Peut-on voir les particules ? Qu'est-ce qu'une particule ? Que veut dire voir ? Devant de telles questions, il est agréable de pouvoir se référer à des images concrètes. On ne peut pas voir les particules, mais seulement les traces qu'elles laissent. Par exemple, une particule électriquement chargée qui traverse le liquide d'une chambre à bulles ionise les atomes du voisinage. Ces atomes ionisés sont l'amarce des bulles qui se développeront lors de la détente du liquide. On obtient ainsi une suite de bulles matérialisant la trajectoire. Dans d'autres types de détecteurs, la trajectoire est révélée par l'ionisation produite dans un gaz et amplifiée par un champ électrique. Pour les physiciens, le jeu consiste habituellement à faire interagir deux particules et à "regarder" les traces qui partent du point d'interaction. Ces traces contiennent de l'information : par exemple, de la courbure des trajectoires dans un champ magnétique, on déduit le signe de la charge électrique et la quantité de mouvement (produit de la masse par la vitesse). Le traitement de l'information est passé par deux phases successives. La première est la phase photographique, ou phase chambre à bulles. Dans un tel détecteur, des photographies stéréo sont prises. L'imagerie est donc première, certaines photos sont très belles ! Mais l'image, et l'image seule, contient toute l'information. Des efforts considérables ont été faits pour l'extraire. On a construit des appareils qui suivent les traces de façon automatique et mesurent sur chaque trace

les coordonnées de points échantillonnés. Des ordinateurs pilotent ces appareils et assurent le calcul des quantités physiques.

Ce procédé a dû être abandonné quand l'intérêt de la physique s'est porté vers des phénomènes rares. Une chambre à bulles ne peut pas être déclenchée sur un mode particulier d'interaction, elle attrape tout et à un rythme trop lent. La nécessité de déclencher le détecteur sur certaines catégories d'interactions a conduit à un très grand développement des détecteurs "électroniques". Dans de tels détecteurs, le choix des phénomènes enregistrés est fait par l'appareillage lui-même, par sa disposition géométrique et par sa programmation. L'information brute est constituée par la localisation des charges libérées dans l'ionisation des atomes du milieu détecteur. Les coordonnées des points de passage des particules, ainsi que d'autres informations, sont enregistrées directement par l'ordinateur. Le travail d'extraction de l'information est donc en un sens tout fait. Le paradoxe est que les physiciens ont investi une grande énergie pour retrouver une visualisation de ces événements (fig. 1). Il apparaît donc que, même si l'information est sur bande magnétique, une représentation intégrée de cette information est indispensable au bon fonctionnement du raisonnement et de l'intuition du chercheur.

Une autre technique utilisant des images s'est développée au cours des dernières années : c'est l'imagerie Čerenkov. Rappelons le principe de l'effet Čerenkov, découvert il y a une cinquantaine d'années. On sait que la vitesse c de la lumière dans le vide est une vitesse limite, qui ne peut être dépassée par aucune particule. Mais, dans un milieu transparent, la lumière se propage à une vitesse plus faible (égale au quotient de c par l'indice de réfraction du milieu). Une particule traversant ce milieu peut aller plus vite que la lumière et elle y produit alors une onde de choc lumineuse analogue à l'onde de choc sonore produite par un avion supersonique. On observe un rayonnement émis sur un cône (le bang lumineux) dont l'ouverture croît avec la vitesse de la particule. La mesure de cette ouverture permet donc de déterminer la vitesse (et la masse et l'énergie si l'on connaît la quantité de mouvement).

Divers détecteurs à imagerie Čerenkov ont été construits sur ce principe. Un système optique transforme le cône de lumière en une image annulaire. La position du centre du cercle donne la direction et le rayon du cercle donne la vitesse de la particule. Il est également possible de regarder directement l'intersection du cône Čerenkov avec un plan de détecteurs de lumière (fig. 2).

Dans les exemples que nous avons vus, l'image qui, au début, était toute l'information de base, est restée indispensable pour résumer cette information. En effet, plus le sujet est difficile à cerner, plus le cerveau humain a besoin de représentations visuelles simples pour l'aborder.

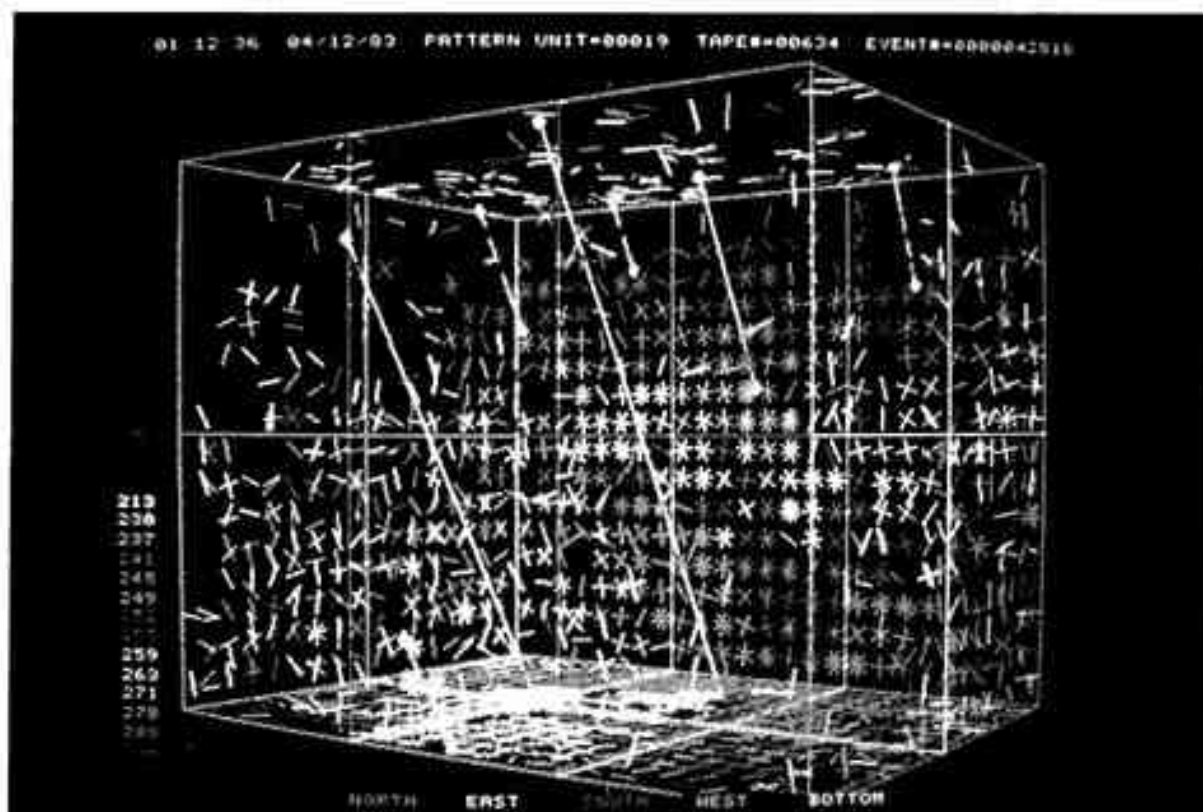
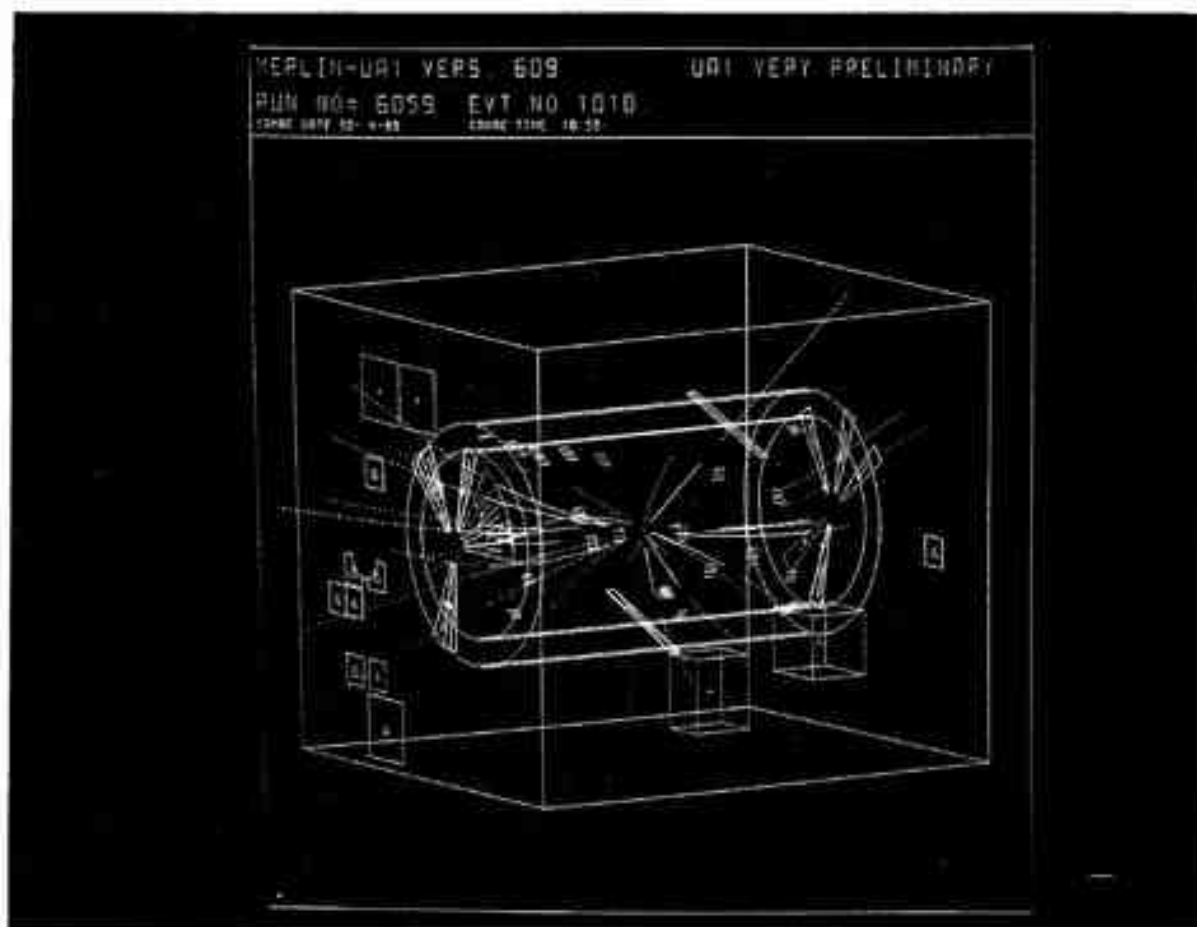


Fig. 1 - Collima proto-antiproton enregistrée dans l'expérience UAI du Centre européen pour la recherche nucléaire (CERN). L'ordinateur, attaché à l'expérience, reconstitue l'événement sur écran de visualisation et fournit des informations sur les réponses des détecteurs. Le cylindre central représente le volume extérieur du détecteur de traces, ensemble de chambres à fils de 5 mètres de longueur et de 2 mètres de diamètre, donnant un point de mesure sur les trajectoires. Ce détecteur est entouré d'un calorimètre électromagnétique qui mesure l'énergie des électrons provenant de la zone d'interaction. Les petits rectangles à crochets indiquent la localisation de l'électron et leur longueur correspond à l'énergie déposée. Le grand cube illustre le volume extérieur du calorimètre hadronique, constitué de scintillateurs et de fer de l'aimant. Les petits cubes représentent la cellule ionisée par une particule. Des indications analogues se retrouvent sur les deux faces latérales des détecteurs. L'énergie estimée des particules est codée par la couleur de leur trace (elle croît du rouge vers le bleu et le blanc). Les traces sont extrapolées en pointillés dans les calorimètres. Il est possible de faire tourner l'événement sur l'écran, comme s'il s'agissait d'une maquette d'autocollable. Le cliché montre la production d'un "baryon intermédiaire" Z^0 qui se désintègre en un électron et un positron. L'électron et le positron sont les deux traces bleues qui font un grand angle avec la ligne des faisceaux (axe des cylindres). Ils ont perdu toute leur énergie dans le calorimètre électromagnétique et s'ont touchés dans la cellule du calorimètre hadronique. (Photo CERN)



Fig. 2 - Image obtenue par ordinateur, d'un événement de l'expérience américaine Irvine-Michigan-Berkeley, qui cherche à observer la désintégration éventuelle d'un proton. Un cube d'événement 30 m de côté, rempli de 8 000 tonnes d'eau ultra-pure, constitue à la fois le réservoir de protons et le détecteur. Il est situé à 800 m au-dessous du sol dans une mine de sel, à Cleveland (Ohio - États-Unis). Les particules chargées qui traversent l'eau font briser de la lumière Čerenkov. Cette lumière est détectée par 2 048 photomultiplicateurs répartis sur les six faces du cube. Dans l'événement considéré, sept muons cosmiques ont traversé simultanément le détecteur, et la lumière Čerenkov émise a touché plus de 1 000 photomultiplicateurs. Le temps d'arrivée et l'intensité lumineuse sont indiqués par la couleur et le nombre de traits portés sur l'emplacement de chaque photomultiplicateur. Les lignes jaunes représentent les trajectoires, reconstituées par l'ordinateur associé à l'expérience, des sept muons cosmiques extragérés. (Cliché : R. Smolodski)

François Jacquet, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de physique nucléaire des hautes énergies (IN2P3 43), École polytechnique, Plateau de Palaiseau, 91128 Palaiseau Cedex.



LA CAMÉRA À POSITONS

Bernard Mazière

La caméra à positons, moyen d'investigation non invasif, non destructif et pratiqué *in vivo*, permet d'obtenir des images pleinement fonctionnelles du cerveau.

La caméra à positons est un instrument d'investigation clinique qui, après injection chez l'homme d'une molécule marquée par un émetteur de positons, permet d'obtenir, par détection externe, des images tomographiques, régionales, quantitatives, de la distribution intracorporelle de cette molécule. La présence des molécules marquées dans une coupe de différents organes ou structures est repérée par les émissions de positons dont on détecte les photons d'annihilation.

Le principe de la détection est le suivant : le positon (électron positif e^+), émis par le radioélément, entre en collision dans la matière biologique avec un électron (e^-). Ils s'annihilent en émettant deux photons gamma à 180° l'un de l'autre et d'une énergie de 511 keV (fig. 1). Les systèmes de détection actuellement employés sont constitués d'anneaux de détecteurs à scintillation disposés selon une géométrie circulaire ou polygonale (fig. 2). Les détecteurs sont conçus pour recueillir les photons gamma de 511 keV émis en coïncidence après l'annihilation des positons. Ils sont reliés par paire électroniquement et en vis-à-vis géométrique. Ils ne détectent un "événement" que s'ils recueillent simultanément chacun un photon de 511 keV (fig. 3). Ceci permet de localiser la source d'émission sur la génératrice les reliant. L'algorithme de reconstruction des images utilise les propriétés des relations intégrales décrivant mathématiquement les données recueillies le long de l'ensemble des génératrices possibles géométriquement. Les caméras de 2^e génération incorporent la mesure du "temps de vol" des photons gamma (mesure de l'écart de temps séparant les instants d'arrivée des photons sur les détecteurs appariés) à l'algorithme de reconstruction. Cette information permet de situer le point d'émission des photons en coïncidence le long de la génératrice de détection avec une incertitude de 7 cm introduite par le temps de résolution des détecteurs (350 à 450 picosecondes) (fig. 4).

Bernard Mazière, Commissariat à l'énergie atomique, Département de biologie, Service hospitalier Frédéric Joliot, Hôpital d'Orsay, 91406 Orsay.

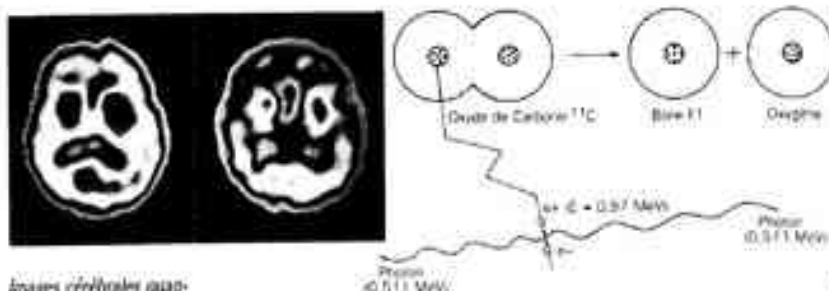


Fig. 1

Images cérébrales quantitatives de la localisation des sites récepteurs D2 de la dopamine (zones apparaissant en rouge plus ou moins sombres et correspondant aux noyaux gris centraux et au cortex occipital) obtenues par tomographie d'émission de positons après injection d'un neuroleptique (pipéridate) marqué par un émetteur de positons (thème-76) chez un sujet témoin (image de gauche) et un malade souffrant d'une maladie dégénérative du système nerveux central entraînant une diminution du nombre de récepteurs dopaminergiques (image de droite) (Cliché SIF/CEA).

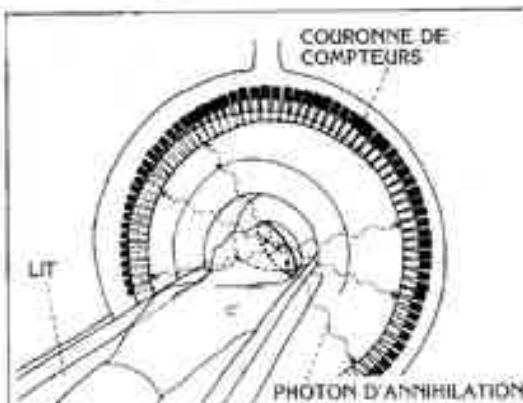


Fig. 2

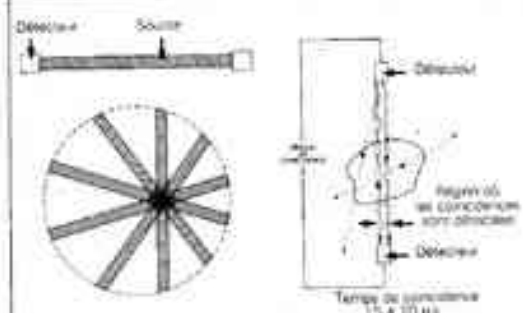


Fig. 3

Fig. 1 — Désintégration d'une molécule marquée par le carbone 11 ($T = 20,4$ min).

Fig. 3 — Principe de la tomographie à positons.

Fig. 4 — Principe de la mesure des temps de vol en tomographie par émission de positons.

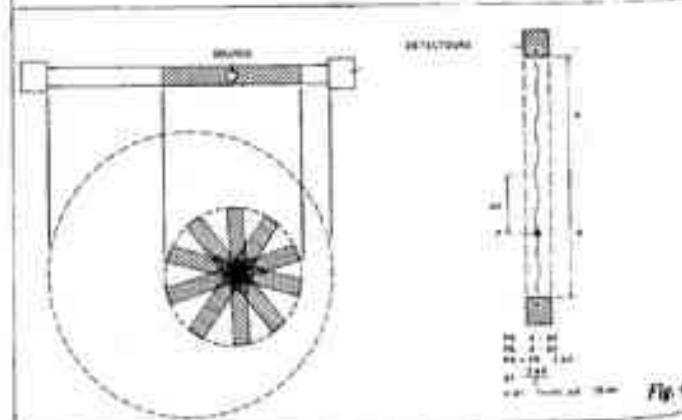


Fig. 4

LES IMAGES NEUTRONIQUES

André Michaudon

Les neutrons donnent déjà certains types d'images très au point, mais offrent encore des possibilités d'imagerie très prometteuses.

Il est maintenant courant d'obtenir des images d'objets, non seulement de leur aspect extérieur mais aussi de leur configuration intérieure cachée au regard, en utilisant des particules autres que les photons lumineux de la vision oculaire.

Le premier exemple fut la radiographie par rayons X qui permet d'examiner un objet par "transparence" en impressionnant un film par des rayons X ayant traversé cet objet. Si ce dernier est composé de parties présentant des absorptions différentes aux rayons X, elles apparaissent aussi de façon différente au développement du film. Cette méthode est utilisée aujourd'hui à très grande échelle en médecine pour la radiographie du corps humain.

Le même principe peut être appliqué pour obtenir des images avec des neutrons : c'est la neutronographie. Rien que les premiers essais datent d'avant la deuxième guerre mondiale, la neutronographie ne put déboucher sur des résultats exploitables qu'avec l'avènement des réacteurs nucléaires produisant des neutrons en flux suffisants. La neutronographie est complémentaire de la radiographie par rayon X car les neutrons et les rayons X interagissent de façons différentes avec la matière. En effet, les photons interagissent surtout avec les électrons atomiques et cette interaction varie lentement tant avec l'énergie du photon incident que d'un atome à l'autre. Les neutrons, au contraire, interagissent essentiellement avec les noyaux atomiques ; c'est l'interaction nucléaire. Ils interagissent aussi avec certains électrons du cortège électronique, ceux qui ne sont pas appariés, appelés aussi électrons célibataires ; c'est l'interaction magnétique. L'interaction nucléaire, seule considérée ici, varie beaucoup non seulement d'un noyau à l'autre, même pour des isotopes, mais aussi en fonction de l'énergie du neutron incident. Les neutrons et les photons ne "voient" donc pas la matière de la même façon et par conséquent les images obtenues avec ces deux types de particules sont différentes et complémentaires.

André Michaudon, directeur adjoint français de l'Institut Max Von Laue-Paul Langevin-ILL, avenue des Martyrs, BP 156 X, 38042 Grenoble Cedex.

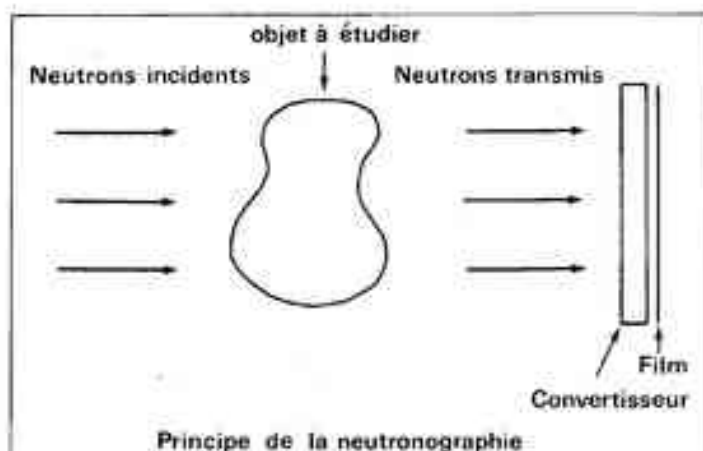


Fig. 1

Un cas intéressant est celui de l'hydrogène dont la probabilité d'interaction est grande avec les neutrons mais faible avec les photons. L'hydrogène présent dans un composé sera donc relativement transparent aux photons mais opaque aux neutrons.

L'obtention de l'image sera également différente, suivant qu'elle est formée avec des neutrons ou des photons. Les photons peuvent impressionner directement un film contrairement aux neutrons qui ne peuvent pas être détectés directement, étant électriquement neutres, mais seulement par l'intermédiaire des produits ionisants issus des réactions nucléaires qu'ils provoquent. La détection peut s'effectuer en temps réel si les produits ionisants sont prompts, c'est-à-dire émis dans un temps très bref au cours de la réaction. Elle intervient en temps différé si les produits de la réaction sont eux-mêmes retardés ou si l'effet des produits prompts est examiné après que la réaction ait eu lieu.

On distingue plusieurs types d'images neutroniques.

- Les images "actives" de la source de neutrons elle-même. Ce peut être par exemple un milieu neutronique, formé d'un plasma d'ions légers entre lesquels se produisent des réactions de fusion émettrices de neutrons rapides.

L'image neutronique de ce milieu permet de reconstituer la carte de combustion éventuellement avec l'évolution temporelle de tout ou partie du milieu. Dans ce cas, les neutrons émis sont des neutrons rapides dont l'énergie est voisine de 14 MeV (méga-electronvolt) si les réactions de fusion interviennent entre des noyaux de deutérium (D) et de tritium (T).

- Les images "passives" et non destructrices d'un objet traversé par un flux de neutrons issu d'une source extérieure. Suivant l'énergie des neutrons, on peut obtenir des images avec des neutrons ultra-froids (microscopie neutronique), des neutrons froids, thermiques ou épithermiques (neutronographie), des neutrons de résonances (carte de température par spectrométrie par temps de vol) ou des neutrons rapides. Les sources

de neutrons, issues d'une source extérieure à l'objet (un réacteur nucléaire dans la plupart des cas), le traversent et viennent induire des réactions nucléaires dans un convertisseur placé derrière lui. Les produits ionisants de ces réactions impressionnent un film placé contre le convertisseur. L'image neutronique est alors obtenue par développement du film avec les méthodes habituelles.

Des neutrons pour les images passives sont la plupart du temps des réacteurs nucléaires à régime permanent, voire pulsé, des accélérateurs bombardant des cibles neutroniques ou même des sources portatives de californium 252 (^{252}Cf) émettant des neutrons en flux relativement faibles par fissions spontanées.

Des images à une (ou deux) dimension(s) du même objet prises à des angles différents peuvent, après analyse, permettre la reconstitution de l'image de l'objet à deux (ou trois) dimensions ; c'est la tomographie.

Nous allons illustrer par quelques exemples les types les plus importants d'images neutroniques.

Neutronographie

La neutronographie utilisant les neutrons froids, thermiques ou épithermiques issu d'un réacteur nucléaire est certainement le type d'image neutronique le plus répandu aujourd'hui. Le principe en est très simple (fig. 1). Les neutrons incidents, après avoir traversé l'objet à étudier viennent frapper un convertisseur où ils induisent des réactions nucléaires dont les produits ionisants impressionnent un film placé juste derrière. L'image est d'autant meilleure que le faisceau de neutrons est dépourvu de bruit de fond, d'où l'intérêt des guides de neutrons. Les neutrons diffusés par l'objet jouent un rôle parasite, car émis dans toutes les directions, ils introduisent une perte de définition spatiale. Cet effet parasite sera réduit si l'objet est de petites dimensions et si les neutrons sont de faible énergie car leur absorption croît alors que leur diffusion reste inchangée quand l'énergie décroît. A flux égal les neutrons froids sont donc plus performants que les neutrons thermiques.

La neutronographie présente, par rapport à la radiographie par rayons X, l'avantage de détecter la présence d'hydrogène (d'où son intérêt pour la pyrotechnie, les lubrifiants, etc.). Par exemple, environ quatre-vingts pour cent des clichés de neutronographie effectués auprès du réacteur Orphée au Centre d'études nucléaires (CEN) à Saclay concernent des dispositifs pyrotechniques du programme spatial Ariane.

Quelques clichés illustrent les résultats obtenus avec des neutrons froids ou thermiques et un convertisseur en gadolinium (fig. 2, 3, 4, et 5). * L'autoradiographie d'un objet après son activation par neutrons présente des applications intéressantes, notamment dans le domaine artistique. Elle est utilisée par exemple pour distinguer les vrais tableaux des faux. Un cas célèbre est celui de "L'homme au casque d'or" exposé au musée de Berlin et attribué initialement à Rembrandt (fig. 6). La radiographie par rayons X, très sensible à la présence de plomb, n'en détecte pas dans les couleurs blanche et jaune alors qu'il est présent dans les mêmes couleurs des vrais tableaux du maître. L'activation par neutrons permet de déceler la présence de sodium (Na) et de phosphore (P), par production de Na^{24} et P^{32} radioactifs respectivement, éléments existant dans la colle de la toile et du fond de la peinture ainsi que dans les traits tracés avec des os brûlés. L'autoradiographie par neutrons a révélé des dessins différents du tableau final ainsi que de nombreuses reprises alors que les vraies peintures de Rembrandt ont été effectuées d'un seul trait (fig. 7). Le tableau de Berlin n'est donc plus considéré aujourd'hui comme un vrai Rembrandt.

La microscopie neutronique

A très basse énergie, les neutrons ont une grande longueur d'onde et interagissent non plus seulement avec les noyaux pris isolément mais collectivement avec un ensemble de noyaux de l'échantillon, ce qui modifie sensiblement leur probabilité d'interaction avec la matière. Les neutrons ultra-froids, dont la vitesse est inférieure à une vitesse limite (v_{lim}) donnée, sont totalement réfléchis par des parois matérielles. La valeur de v_{lim} de l'ordre de 5 à 8 mètres par seconde, ce qui correspond à une énergie d'une fraction de micro-électronvolt (μ eV) et une longueur d'onde (λ) de 0,05 à 0,08 micromètre, dépend du matériau considéré. Des neutrons d'une basse énergie sont très sensibles au champ gravitationnel puisqu'une ascension d'un mètre leur fait perdre une énergie de 0,1 μ eV comparable à l'énergie initiale. Il est possible d'utiliser ces propriétés pour construire un microscope neutronique dont un exemplaire fonctionne déjà à l'Institut Lame-Langevin (ILL) (fig. 8).



* Plus de détails sur le vaste champ d'application de la neutronographie peuvent être trouvés dans les références [1], [2], [3], [4], [5].



Fig. 2

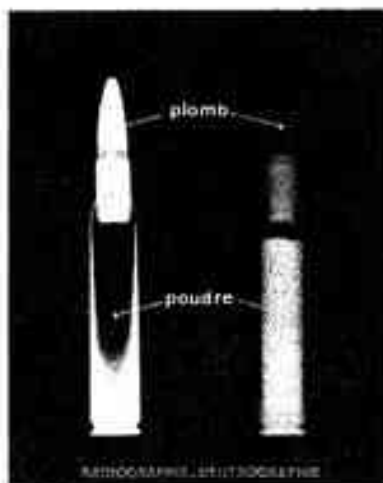


Fig. 3



Fig. 4



Fig. 6

Fig. 2 — Neutronographie d'un appareil photographique obtenu avec le faisceau de neutrons thermiques issu du réacteur Mélusine du Centre d'études nucléaires de Grenoble. Ce cliché permet de voir avec une grande finesse plusieurs des composants surtout les pièces en plastique qui, contenant de l'hydrogène, interagissent fortement avec les neutrons.

Fig. 3 — Radiographie par rayons X (à gauche) et par neutrons thermiques (à droite) d'une cartouche. Ces deux clichés illustrent bien la complémentarité entre neutrons et rayons X. La poudre, élément léger à forte proportion d'hydrogène, est clairement vue avec les neutrons qui pénètrent même d'en distinguer le grain alors qu'elle est transparente aux rayons X. L'inverse est vrai pour les éléments lourds qui contiennent la douille et la balle, lesquelles sont opaques aux rayons X mais transparentes aux neutrons.

Fig. 4 — Neutronographie d'une chaîne de transmission standardisée utilisée sur le lanceur Ariane, qui permet de contrôler la liaison (marquée d'une flèche) entre le cordeau démontant de transmission et le relais de transmission. Cette neutronographie a été effectuée pour le compte de la SNEAS en utilisant le faisceau de neutrons froids disponible à l'extrémité d'un guide de neutrons du réacteur Orphée (Centre d'études nucléaires de Saclay). © Aérospatiale SNE.

Fig. 5 — Tomographie d'un ensemble de 7 crayons combustibles en oxyde d'uranium pour la filière de réacteurs à neutrons rapides. Cette vue a été reconstituée par itérations à partir de 18 clichés effectués tous les 10 degrés avec le faisceau de neutrons thermiques du réacteur Mélusine du Centre d'études nucléaires de Grenoble. Les zones d'absorption différentes sont illustrées par des couleurs choisies arbitrairement [10].

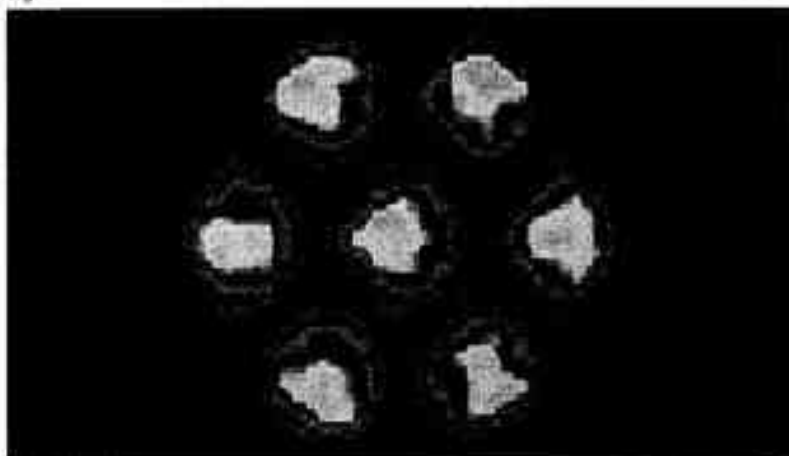
Fig. 6 — Photographie du tableau "L'homme au casque d'or" attribué à Rembrandt et exposé au Musée de Berlin [11].

Fig. 7 — Autoradiographie par neutrons du tableau ci-contre. L'exposition du film a été faite entre le onzième et le vingt-troisième jour après l'irradiation du tableau par neutrons. L'examen de cette autoradiographie permet de conclure que le tableau n'est vraisemblablement pas de Rembrandt [11].



Fig. 7

Fig. 2



L'image d'une source de neutrons rapides, issu par exemple de réactions de fusion (D+D) ou (D+T) entre noyaux d'isotopes légers de l'hydrogène épluchés de leur électron dans un plasma à haute température relève d'un autre principe. Dans ce cas la source et l'objet sont confondus. Pour obtenir l'image neutronique active de ce milieu, on utilise le principe de l'antique chambre noire des débuts de la photographie, bien que son application soit plus difficile avec les neutrons. En effet, en photographie, les photons lumineux peuvent être arrêtés par une très faible épaisseur de matière : il est donc aisé de réaliser une plaque mince, opaque à ces photons sauf à un petit trou par lequel les photons sont obligés de passer pour aller impressionner le film de la chambre noire et y former l'image de l'objet. Les neutrons, contrairement aux photons lumineux, traversent facilement la matière. Au lieu d'un trou d'épingle dans une plaque mince, il faut donc réaliser un long collimateur (≈ 1 m) percé sur toute sa longueur d'un trou très fin ($\varnothing = 1$ mm) comme le montre la figure 9 qui schématise le principe de l'expérience.

Des exemples d'images neutroniques ainsi obtenues sont donnés sur la figure 10. Les plasmas produits dans les expériences de fusion par confinement inertiel induite par faisceaux lasers convergents sont de très petites dimensions, de l'ordre de quelques dizaines de microns. La technique d'image précédente peut toujours être utilisée, du moins en principe, mais le trou d'aiguille du collimateur doit être très fin (environ $10 \mu\text{m}$) ce qui est technologiquement très difficile à réaliser. De plus le nombre de neutrons émis par implosion doit être très élevé, de 10^{14} à 10^{15} pour compenser la faible luminosité du dispositif. Pour de tels plasmas, il est préférable d'envisager une autre méthode, celle des zones de Fresnel alternativement transparentes et opaques [7]. Le principe de cette méthode est schématisé sur la figure 11. Elle donne de très bons résultats lorsqu'un fort contraste entre anneaux transparents et opaques peut être obtenu, ce qui est le cas lorsque les particules émises par la source sont facilement absorbées (rayons X et rayons α) [8]. Ce n'est pas le cas des neutrons qui sont des particules assez pénétrantes. Pour utiliser cette méthode avec des neutrons, il faut remplacer les zones de Fresnel par un ensemble de cônes concentriques à absorp-

tions alternativement faible et forte, grâce à l'emploi de matériaux différents (aluminium et or par exemple) (fig. 12) [8].

Mesure des températures

La mesure de la température, ou même de la carte de température d'un objet utilise la propriété des résonances neutroniques de s'élargir quand la température augmente. Le principe en est illustré sur la figure 13. L'échantillon à étudier est placé sur le trajet des neutrons issus d'une source de neutrons pulvé. Cette dernière peut être par exemple une cible d'uranium bombardée par le faisceau pulvé de particules chargées (électrons, protons...) fourni par un accélérateur. Les neutrons transmis par l'échantillon sont détectés et les impulsions du détecteur sont analysées en temps par rapport à l'instant de production des neutrons de la cible : c'est la spectrométrie par temps de vol de laquelle on déduit aisément la sélection en énergie. Les résonances neutroniques de matériaux constituant l'objet apparaissent en "négatif" dans les résultats et leur analyse donne leur largeur, donc la température de l'échantillon. Si un collimateur fin est placé devant l'objet, seule la partie de l'objet vue par le collimateur sera mesurée et sa température obtenue. En déplaçant l'objet devant le collimateur, on obtient ainsi la carte de température de l'objet. Une technique plus avancée consiste à utiliser un détecteur de neutrons à localisation où l'endroit de détection de chaque neutron peut être localisé, ce qui permet de s'affranchir du collimateur et du déplacement de l'échantillon et d'obtenir en une seule fois la carte de température. Cette méthode a été testée sur des ailettes de turbines Rolls Royce avec la source de neutrons de spallation du laboratoire de Los Alamos (États-Unis) [9]. Des images neutroniques fournissant une carte de température de 10^4 points, chacun d'eux affecté d'une erreur de $\pm 5^\circ\text{C}$ dans la gamme de température $T < 1000^\circ\text{C}$, pourraient être obtenues sans difficultés techniques particulières.

Ces quelques exemples illustrent les nombreuses possibilités offertes par les images neutroniques, lesquelles sont les conséquences des propriétés uniques du neutron. Certains types d'images, telles que la neutronographie, sont arrivés à maturité, ce qui n'empêche pas les améliorations toujours possibles, et sont exploitées à grande échelle de façon industrielle. La tomographie, étape

sophistiquée de la neutronographie, demande des clichés de bonne qualité et des méthodes d'analyse performantes pour reconstituer correctement des images à plusieurs dimensions. Des images de combustion de plasmas sont déjà obtenues, avec leur variation en fonction du temps, pour autant que les dimensions du milieu ne soient pas trop petites. Pour les micro-plasmas de dimensions extrêmement petites produits dans la fusion par confinement inertiel, d'autres techniques d'images, potentiellement supérieures et déjà éprouvées avec d'autres particules, telles que celle des zones de Fresnel, doivent être mises au point. Des images de cartes de températures par neutrons de résonances ont passé le cap de la démonstration de faisabilité et devraient pouvoir être obtenues prochainement sans difficultés. D'autres types d'images, telles que celles provenant d'un microscope neutronique demandent encore des travaux de développement avant de dépasser le stade de curiosité de laboratoire.

Dans la très grande majorité des cas, les images neutroniques exigent des flux de neutrons importants disponibles seulement auprès des grands équipements (réacteurs nucléaires, accélérateurs) surtout quand il s'agit de sources de neutrons aussi exotiques que celles de neutrons ultra-froids.

Déjà employées à grande échelle dans certains cas, ouvertes sur des possibilités originales grâce à des études prospectives audacieuses, les images neutroniques ont un avenir plein de promesses devant elles, surtout si l'on inclut un autre aspect fondamental du neutron, ignoré ici faute de place, son interaction magnétique avec la matière.



Bibliographie

- 1) Laporte (A.), "La neutronographie", *Revue pratique industrielle* n° 121 bis.
- 2) *Neutronographie industrielle associée au réacteur Orphée*, brochure du Centre d'études nucléaires de Saclay.
- 3) *Neutronographie industrielle associée au réacteur Mélinde*, brochure du Centre d'études nucléaires de Grenoble.
- 4) "Neutron Radiography" *Proceedings of the First World Conference*, San Diego, December 7-10, 1981. D. Reidel Publisher.
- 5) *Actes de la 2^e conférence mondiale sur la radiographie aux neutrons*, 16-20 juin 1986, France, (à paraître).
- 6) Bauer (R.-W.), "Taking Fast-Neutron Snapshots of Thermodynamic Plasmas", *Rapport Energy and Technology Review*, UCRL-52900-76-10, p. 12.
- 7) Lerche (R.-A.), Lane (S.-M.), Hawryluck (A.-M.) and Ceglio (N.-M.) "Zone-Plate Imaging of 14 MeV neutron", *Proceedings of the 7th International and Related Plasma Phenomena*, Monterey, Ca. USA, 28/10-1/11 1985. Voir aussi Rapport UCRL-93191.
- 8) Ceglio (N.-M.) and Sweeney (D.-W.), "Zone-Plate Coded Imaging: Theory and Applications", *Progress in Optics*, Vol. XXI, pp. 289-354, Ed. E. Wolf (North Holland Physics Publishing, 1984).
- 9) Fowler (P.-H.) et Taylor (A.-D.), *Communication privée* (1986) et article à paraître.
- 10) Rizo (P.), "Tomographie par neutronographie d'ensembles de crayons combustibles", (Thèse de docteur-ingénieur, 1986).
- 11) "Bilder in Blickpunkt : Der Mann mit dem Goldstein" *Gemäldegalerie - Staatliche Museen Preussischer Kulturbesitz*, Berlin, 1986.

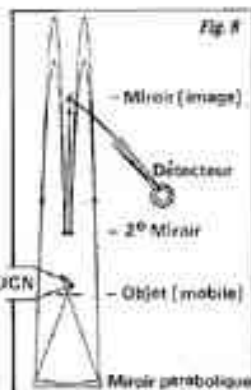


Fig. 8 — Schéma de principe d'un microscope neutronique installé auprès du réacteur à haut flux de l'Institut Laue-Langevin (Grenoble). Ce microscope utilise l'un des faisceaux de neutrons ultra-froids (UCN) produits à partir de la source froide installée dans ce réacteur. Les neutrons traversent d'abord l'échantillon ou du moins certaines parties car ils sont réfléchis par d'autres. Puis ils sont réfléchis par un miroir parabolique et, après une trajectoire parabolique due à la gravitation, par un deuxième miroir avant d'être finalement aiguillés vers le détecteur par un dernier miroir incliné. Ce dispositif achromatique a un grossissement global de 80 et une résolution spatiale de 12 μm environ.

Fig. 9 — Schéma de principe d'une image neutronique d'un plasma thermonucléaire en combustion.

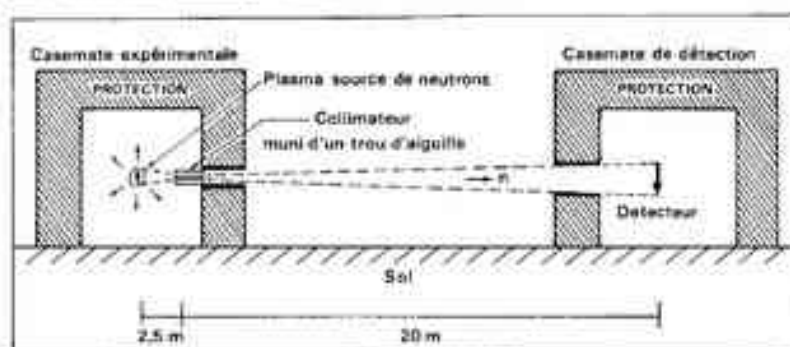


Fig. 9

Fig. 10 — Images neutroniques de plasmas transitoires (D+T) (fig. (a) et (b)) et (D+D) (fig. (c) et (d)) intégrées en temps et obtenues dans différentes conditions. La source de neutrons est confinée dans un volume de 1 cm^3 qui émet environ 10^{12} neutrons pendant une durée de dix à cent nanosecondes. Dans les images (a) et (c), les neutrons sont détectés par un ensemble hexagonal compact de 61 scintillateurs plastiques cylindriques, chacun d'eux étant relié à un photomultiplicateur. Chaque petit cercle représente la partie de la source vue par un détecteur, teinté de façon d'autant plus foncée que la fluence de neutrons reçue par le détecteur est plus élevée. Les chiffres portés sur chacune de ces images donnent la fluence (m^2/cm^2) reçue par chaque détecteur à l'endroit où ils sont écrits. L'enregistrement du signal de chaque détecteur en fonction du temps à l'aide d'oscilloscopes permet de reconstituer l'évolution de la carte de combustion du plasma en fonction du temps (non représentée sur cette figure). Dans l'image (b), le détecteur est un ensemble de 1 000 fibres optiques donnant une résolution spatiale bien supérieure, au prix cependant d'une dégradation de la résolution en temps car la lumière produite dans les fibres doit être amplifiée par un intensificateur d'images dont la résolution en temps est médiocre ($\approx 50 \text{ ns}$). Dans l'image (d), le détecteur est une chambre à bulles à propane liquide dont la résolution temporelle est pratiquement nulle.

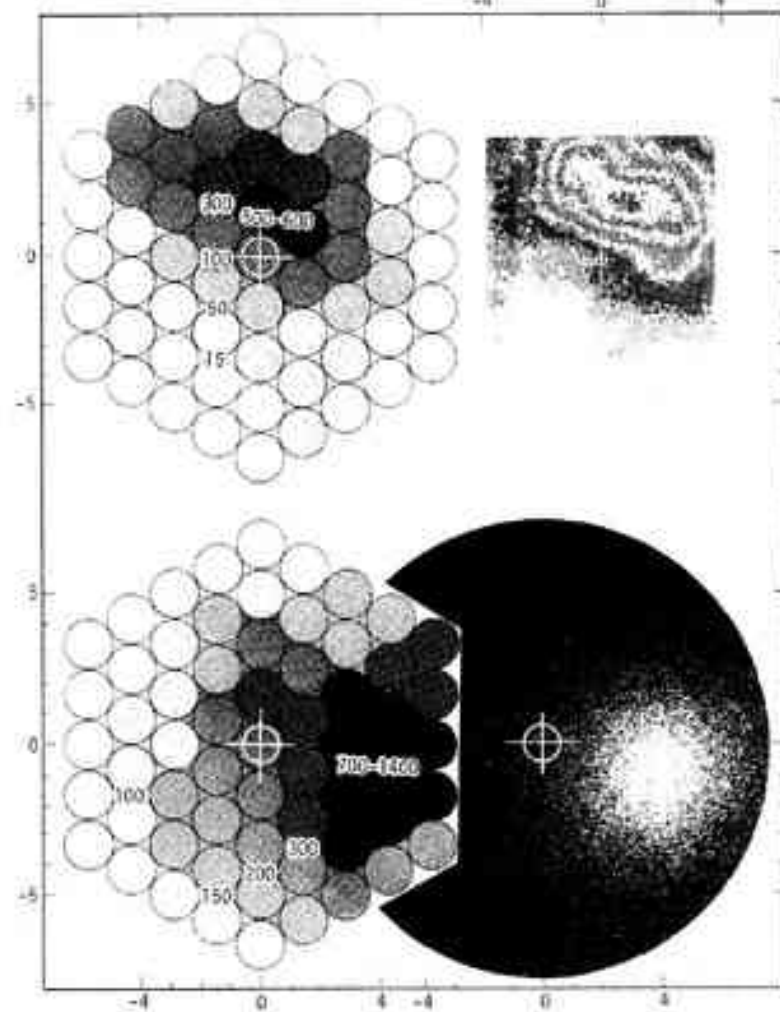


Fig. 10

L'image: l'acquérir, la produire

Fig. 11 — Principe de l'obtention d'une image à partir d'anneaux de Fresnel, illustré en supposant que la source est constituée de trois points. En (a), l'image brute codée est constituée de trois séries d'anneaux plus ou moins déformés et se recouvrant largement, correspondant aux particules issues des trois points sources ayant traversé l'écran. Cette image brute, proprement traitée, peut donner des zones plus ou moins opaques suivant l'éclairement reçu en chaque point, est ensuite illuminée par de la lumière cohérente d'un faisceau laser (en b). Après traversée de l'image brute, cette lumière vient reconstituer l'image de l'objet (7).

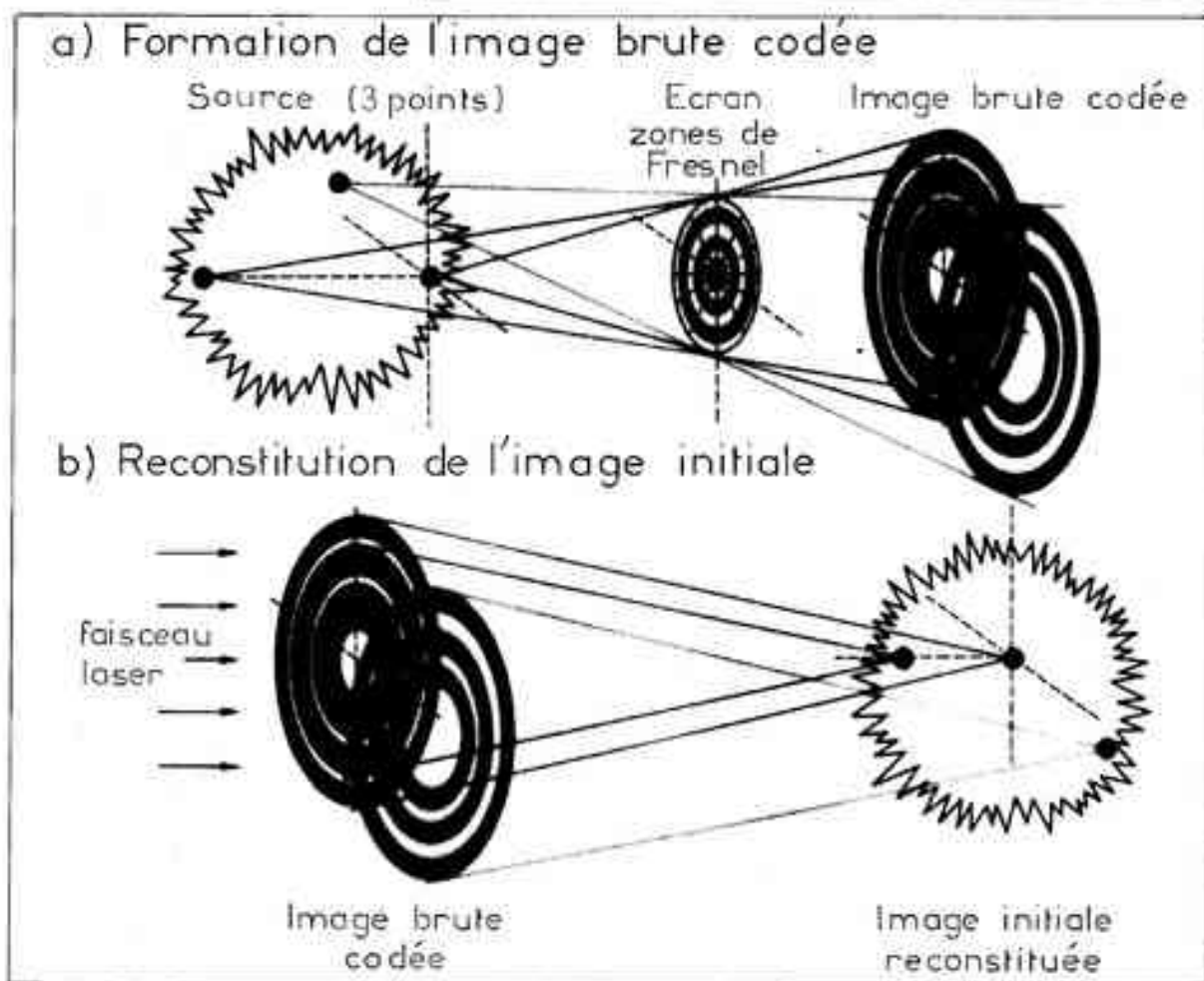


Fig. 11

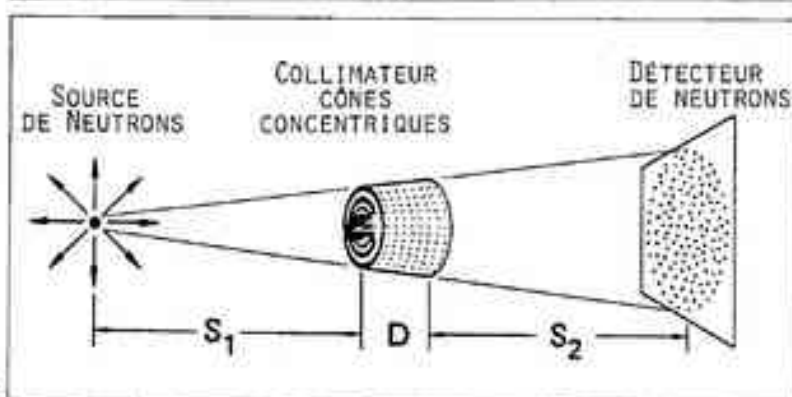


Fig. 12 — Principe de l'obtention d'une image neutronique avec un collimateur stimulant des zones de Fresnel (constitué de cônes concentriques) ayant des absorptions alternativement faibles et fortes (et non des cercles concentriques) alternativement transparentes et opaques pour tenir compte de la grande pénétration des neutrons (7).



Fig. 12

L'image : l'acquérir, la produire



Fig. 13 — Schéma de principe de la méthode de mesure de la température d'un échantillon en utilisant la spectroscopie par temps de vol de neutrons de résonance (partie a). La partie b montre la transmission de l'objet (rapport des taux de comptage du détecteur avec et sans objet dans le faisceau) en

fonction du temps de vol au voisinage d'une résonance pour deux températures T_1 et T_2 ($T_1 < T_2$). L'analyse des résonances dont la largeur augmente avec la température permet de déterminer cette dernière.

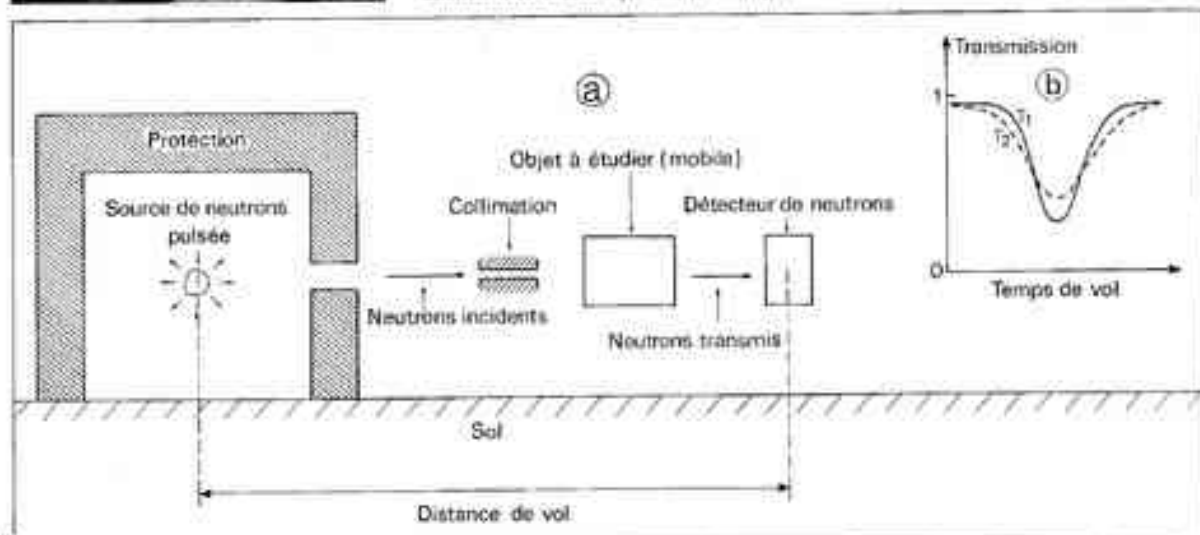


Fig. 13

REVELER L'INVISIBLE

LA RMN EN CHIMIE

Éric Guittet
Jean-Yves Lallemand

La spectroscopie de résonance magnétique nucléaire (RMN) est l'étude des noyaux qui possèdent un moment magnétique, associé à une grandeur quantique non nulle : le spin, placé dans un champ magnétique statique.

Les paramètres (fréquence, temps de relaxation, constantes de couplage) qui décrivent leur comportement dépendent de l'environnement local et en sont une sonde très précieuse.

Une des tâches de la RMN est de traduire ces informations en termes macroscopiques de structure et de conformation des molécules.

Science de l'étude du comportement des systèmes de spins dans un champ magnétique, la résonance magnétique nucléaire occupe maintenant une place de choix dans les laboratoires de chimie. En effet, les propriétés magnétiques des spins étant très dépendantes de leur environnement électronique (donc chimique), elles sont une sonde extrêmement précieuse pour les déterminations de structure ou de conforma-

tions de molécules en solution et les interactions entre molécules.

Dans ces types d'applications, la RMN prend peu à peu sa place, aux côtés de la cristallographie rayons X, de méthode de base, dans la mesure où, de plus en plus, on se sert de paramètres RMN que l'on peut relier à des angles de liaison ou des distances entre noyaux pour construire exactement les géométries des molécules en solution.

Pourtant à la différence de la cristallographie rayons X, où, après la difficile étape de cristallisation, l'image obtenue (la densité électronique) représente directement la molécule, le spectroscopiste rayons X s'efforçant simplement d'ajuster une structure lilaire dans le nuage électronique,

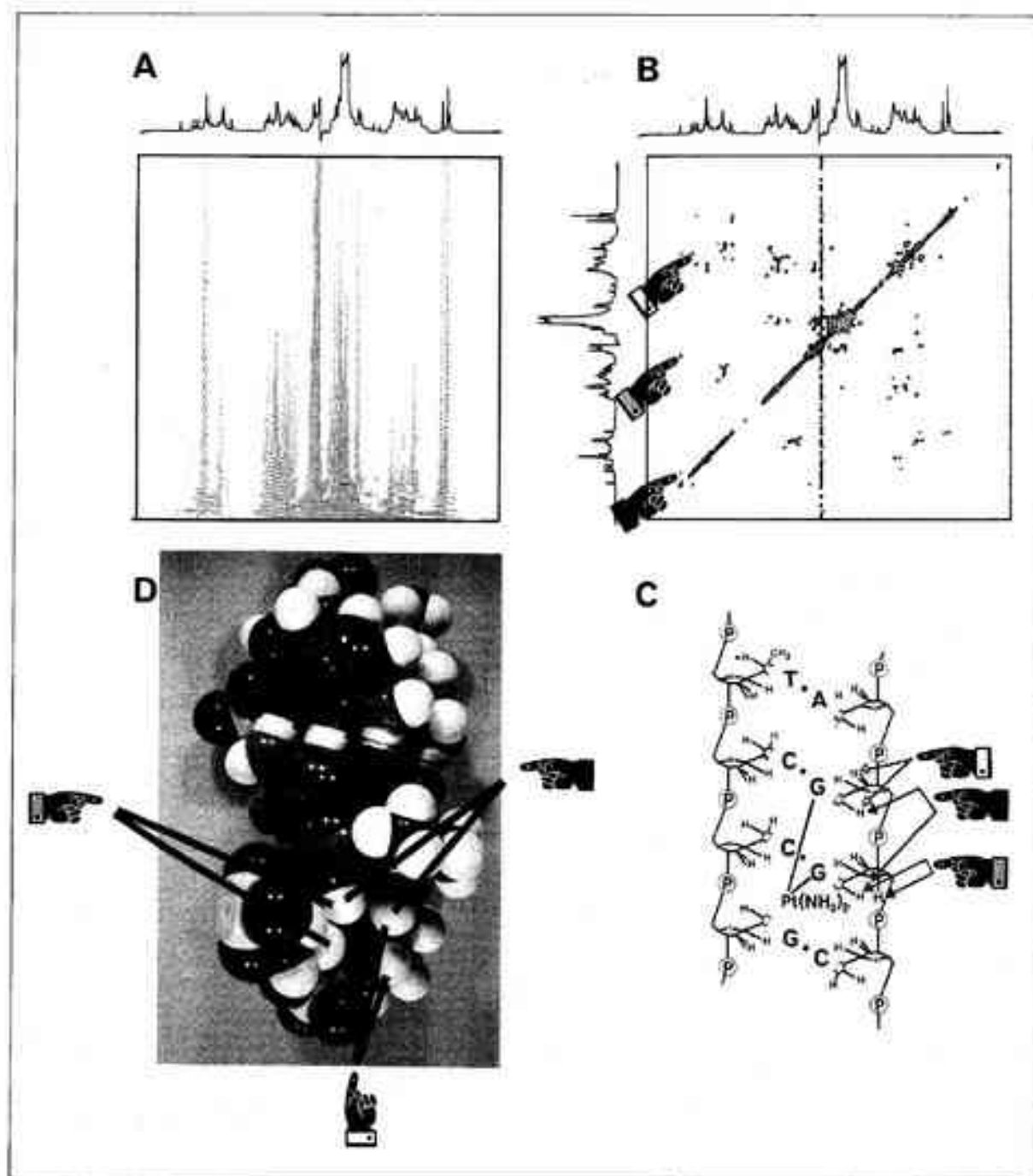
l'"image" RMN, doit être interprétée.

Ce qui caractérise en outre le spectre RMN, c'est son extraordinaire richesse : sont ainsi présents directement (sans expérience supplémentaire) des paramètres aussi variés que les déplacements chimiques (qui dépendent de l'environnement électronique et déterminent la position des signaux), les couplages scalaires (qui donnent les structures fines des signaux) et certains paramètres de relaxation... Ceci va de pair avec une difficulté très grande d'extraction de l'information, même pour des molécules simples.

Ces deux caractéristiques de l'image RMN (richesse et nécessité d'interprétation) ont conduit ces dernières années à une démarche originale : la création d'images simplifiées voire partiellement interprétées. Le meilleur exemple en sont les expériences de RMN à deux dimensions où une information privilégiée (proximité de deux spins dans l'espace ou à travers des liaisons, existence d'un échange entre spins...) est isolée grâce à une séquence d'impulsions complexe et traitée sous forme d'un simple tableau à double entrée par une opération mathématique : la double transformée de Fourier.

Cette simplification et cette sélection d'une information privilégiée permet une interprétation très complète du spectre (l'attribution d'un signal à un hydrogène bien précis de la molécule) et prélude à la mesure quantitative des paramètres qui traduisent des géométries : quelques formules mathématiques simples relient en effet directement cer-

Éric Guittet, chargé de recherche au CNRS, maître de conférence à l'École polytechnique, Jean-Yves Lallemand, directeur de recherche au CNRS, Institut de chimie des substances naturelles (LP 2301 du CNRS), 91190 Gif-sur-Yvette.



taux paramètres à des angles de liaisons (les constantes de couplage) ou à des distances (la relaxation entre spins).

Enfin ces paramètres, seuls ou associés à des calculs de minimisation d'énergie, permettent une reconstitution de la structure tridimensionnelle d'une molécule ou de la géométrie de l'interaction entre plusieurs.

L'exemple d'un oligonucléotide en double hélice (10+10) dans le cadre d'une étude du mode d'action du cis-Platine – collaboration avec J.C. Chottard – illustre ces différentes étapes d'une étude RMN.

Première étape : une séquence d'impulsions spécialisée (qui met en évidence la seule information

de proximité spatiale) crée la matrice (A) qui après transformée de Fourier se présente comme un tableau à double entrée (B) où se correspondent les déplacements chimiques des protons proches dans l'espace.

Deuxième étape : les signaux ayant été attribués à tel ou tel proton à l'aide de cette expérience ou éventuellement d'autres expériences spécialisées, les proximités sont reportées sur la structure plane de la molécule (C) et

Troisième étape : permettent de reconstruire la structure tridimensionnelle de la double hélice. Ici, par souci de simplification, seule est montrée la géométrie (D) déduite pour les résidus les plus proches du site de platinisation. Les taches pointées

(figure B) établissent les proximités des hydrogènes correspondants (figure C) qui sont reportées dans la structure (D).

Il faut enfin souligner le rôle omniprésent de l'informatique pour la génération des images primaires et leur gestion. Ce rôle devrait devenir de plus en plus important. Tous les problèmes d'interprétation plus ou moins automatiques des données brutes et leur traduction, automatique toujours, en termes de structure tridimensionnelle font l'objet de recherches extrêmement actives en RMN.

MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE ET MICROSCOPE A EFFET TUNNEL

Alain Bourret, Frank Salvan,
Alain Humbert

Le microscope électronique classique a bénéficié depuis son invention en 1931 par E. Ruska de progrès constants mais assez lents. La dernière génération d'appareils apparue en 1985 utilise des électrons de haute énergie (300 - 400 kV) et permet de visualiser directement

Alain Bourret, ingénieur au CEA, chef du groupe "Structures", service de physique, département de recherche fondamentale de Grenoble, Institut de recherche fondamentale, Centre d'études nucléaires, 85 X, 38041 Grenoble Cedex.

l'arrangement des atomes. Au même moment une nouvelle technique apparaît : le microscope à effet tunnel. L'attribution simultanée du prix Nobel de physique 1986 à l'inventeur du microscope électronique et aux inventeurs du microscope à effet tunnel a introduit une certaine confusion et a pu laisser penser que la nouvelle technique allait détrôner l'ancienne. En fait il n'en est rien car ces

Frank Salvan, professeur à l'université d'Aix-Marseille II, Alain Humbert, chargé de recherche au CNRS, Groupe de physique des états condensés (UA 783 CNRS), université d'Aix-Marseille II, Faculté des sciences de Luminy, Département de physique, 70, route Léon-Larchamp, Case 901, 13288 Marseille Cedex 9.

deux techniques ne "voient" pas les mêmes éléments d'un objet.

Le microscope électronique classique "regarde" les objets en transparence et explore donc l'intérieur de l'objet dans son ensemble. Il voit tous les atomes d'une lame mince à la fois. En général, la contribution des atomes de surface est faible sinon complètement négligeable. Cette technique est donc bien appropriée pour étudier les défauts plans ou linéaires dans les cristaux, les interfaces, les petits cristaux ou les structures cristallines très complexes. Ces études sont en général représentatives des structures réelles dans le matériau massif. La résolution latérale est comparable à celle du microscope à effet tunnel, par contre il n'y a pas d'information topographique disponible selon

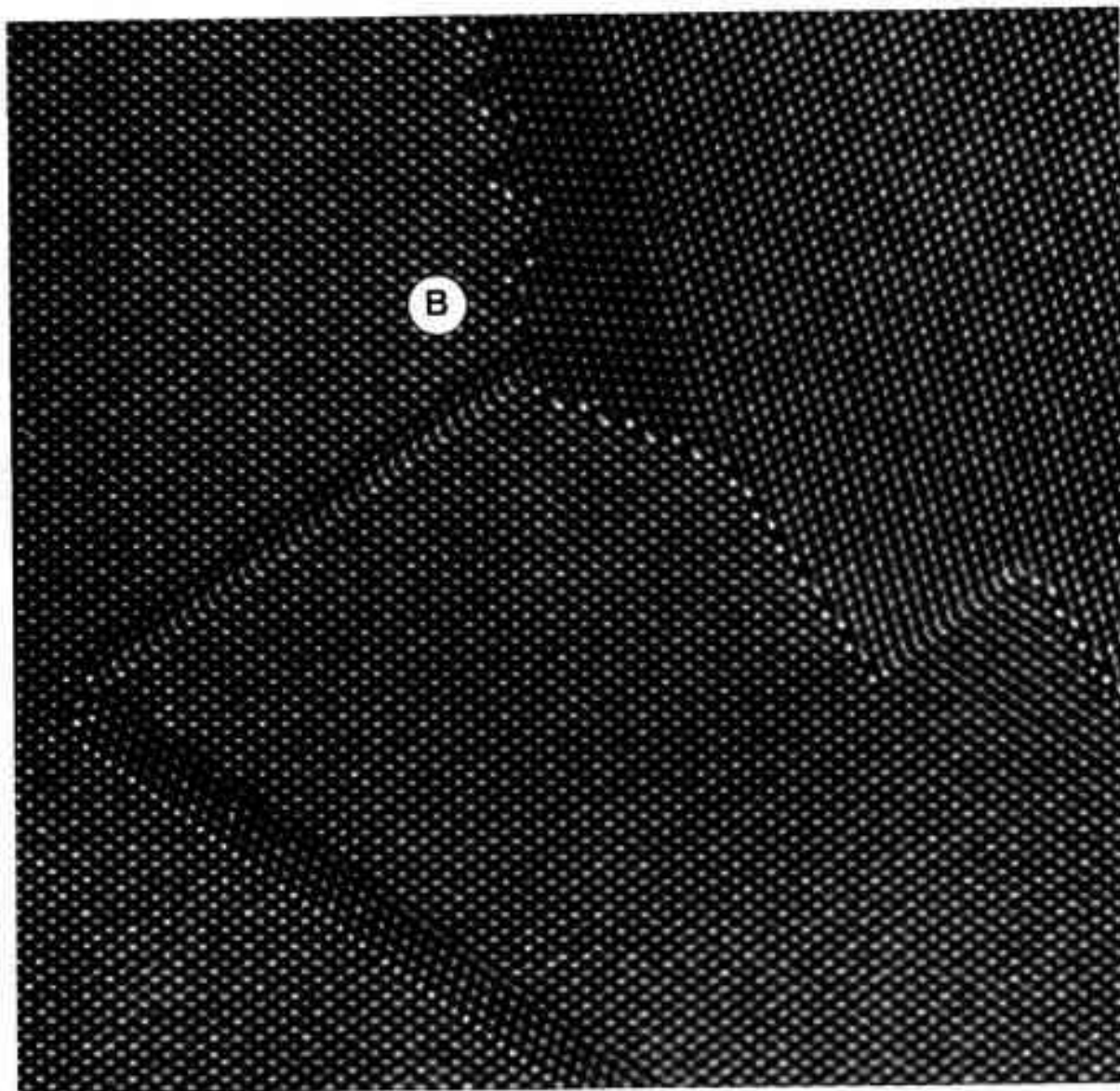


Fig. 1

LES NOUVEAUX MICROSCOPES ÉLECTRONIQUES

Alain Bourret,

l'axe optique : il faut donc plusieurs directions d'observation pour reconstituer une structure tridimensionnelle.

Au contraire, le microscope à effet tunnel "regarde" uniquement la surface de l'objet. Il permet d'obtenir pour les premières couches d'atomes (et principalement la première) des renseignements topographiques précis dans toutes les directions et en particulier normalement à la surface. De plus, il peut éventuellement explorer les orbitales électroniques des atomes qui composent cette surface. Cette technique est donc essentiellement une technique de surface comme le sont par ailleurs l'analyse d'électrons Auger ou la diffraction d'électrons lents. Ce type de microscope devrait être particulièrement adapté à l'étude des surfaces de cristaux en cours de croissance (épitaxie par jets moléculaires par exemple).

Ainsi, loin de s'opposer, ces deux types de microscopie devraient se développer en parallèle et se compléter pour visualiser directement la structure atomique locale de la matière tant en surface que dans le volume.

Fig. 1 - Observation au microscope électronique à haute résolution de la rencontre de plusieurs microcristaux dans du Germanium. Plusieurs faits notables : Les joints de grains tendent à avoir une structure périodique bien définie avec une période aussi basse que possible. Leur structure complète à l'interface a pu être déterminée.

"L'épaisseur" des interfaces est en général très faible. On passe brusquement d'un grain à l'autre.

La structure telle que nous l'avons présentée n'explique pas les propriétés électriques particulières des joints. Nous avons donc été conduits à proposer que des défauts additionnels dans l'interface sont présents et seuls permettent d'expliquer l'introduction de niveaux supplémentaires dans la bande interdite.

Une nouvelle génération de microscopes électroniques est apparue récemment grâce à l'utilisation d'électrons accélérés sous 400 kV. Il est désormais possible de visualiser directement des atomes séparés par une distance de 0,14 nm. Le progrès par rapport aux précédents appareils est très important : la majorité des structures simples est observable car les distances entre atomes dans les métaux ou les semiconducteurs sont de l'ordre de 0,2 nm.

Regarder avec un tel instrument un cristal parfait ne présente pas un intérêt considérable : les structures en sont pour la plupart connues par diffraction aux rayons X. L'examen direct d'une image présente par contre un intérêt considérable lorsqu'on veut étudier une structure très locale et non répétitive au sein du matériau. C'est ce qu'on nomme en général un "défaut", ce mot recouvrant une grande variété de cas. Par exemple, la structure du cœur d'une dislocation a pu être enfin explorée par cette technique dans les années 1980. Plus récemment, la structure des joints de grains dans le silicium et le germanium a été résolue : ces joints, nombreux dans le silicium utilisé pour les piles photovoltaïques, ont un effet néfaste sur les rendements de ces piles et il a fallu comprendre les mécanismes conduisant à ces effets pervers. Les interfaces et leur structure présentent eux aussi un intérêt considérable : les

interfaces jouent un très grand rôle sur les propriétés électroniques des nouveaux dispositifs fabriqués par dépôt de couches successives de compositions différentes (1). Les interfaces et leurs propriétés sont également importantes dans les superalliages métalliques qui contiennent des mélanges de phases, aussi bien que dans les céramiques où les grains sont assemblés par frittage. Pour toutes ces applications les principaux laboratoires d'études des matériaux ont de plus en plus recours à la technique de la microscopie électronique à haute résolution. La structure exacte de l'interface (position et type des atomes), sa planéité à l'échelle atomique, l'existence ou non d'une zone de transition, tous ces facteurs fournissent les éléments pour une interprétation physique fine des propriétés macroscopiques du matériau. Beaucoup de résultats spectaculaires ont déjà été obtenus par le passé avec des résolutions moyennes de 0,2 à 0,25 nm sur des structures à grande maille. Il faut citer par exemple les études exhaustives menées sur les bronzes de tungstène et niobium par J.W. Cowley dès 1975, puis les résultats sur les structures de cœur des dislocations, jusqu'alors inconnues, obtenus dans notre laboratoire. Plus récemment, les études d'interfaces, silicium/sil-

Fig. 2 - Principe de l'obtention d'une image topographique d'une surface.

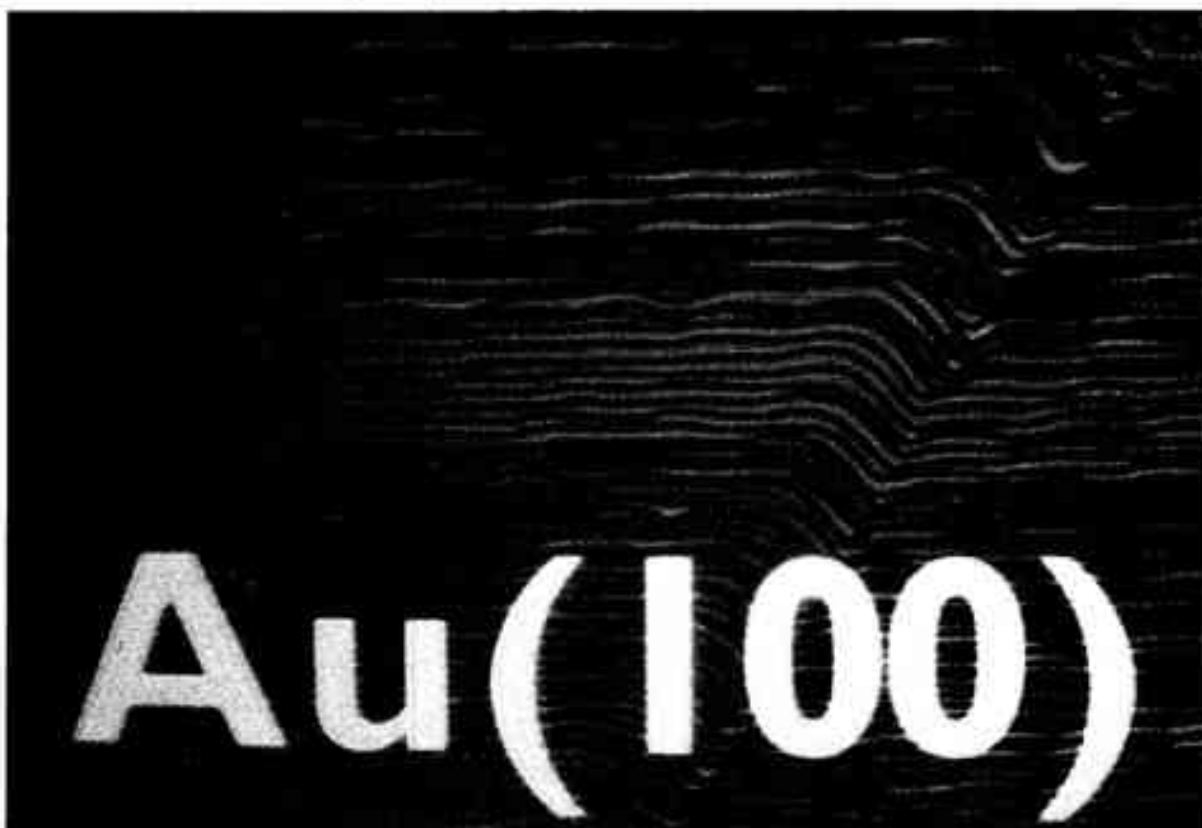


Fig. 2

L'image : l'acquérir, la produire

clure ou les observations de multi-couches AlGaAs/GaAs qui ont suivi les premières observations d'interfaces de Si/SiO₂ en 1977 par Krivanek ont été menées tant en France, au CNET par exemple, qu'aux États-Unis. Ces observations ont montré que, en règle générale, les interfaces sont abruptes (1 ou 2 couches atomiques) sans zone de transition notable. La seule exception a trait aux céramiques qui contiennent une couche amorphe très fine (inférieure au nanomètre) entre les grains.

La figure 1 illustre le type d'observation possible pour les interfaces : il s'agit de ces interfaces particulières que sont les joints de grains, ici dans du germanium.

L'arrivée en France de plusieurs microscopes, de la nouvelle génération 300 - 400 kV devrait permettre d'étendre ces études à une gamme de matériaux plus large. De plus, la possibilité de visualiser la même interface selon plusieurs directions cristallographiques donne des renseignements sur l'arrangement bidimensionnel complet. Cette technique couplée aux méthodes de diffraction plus classiques de rayons X, devrait faire progresser grandement dans l'avenir notre connaissance de la structure atomique des interfaces.

(1) Voir par exemple le transistor à base métallique, E. Bonnier - Centre national d'études des télécommunications (CNET) Meylan - La Recherche, janvier 1987.

LE MICROSCOPE A EFFET TUNNEL

Franck Salvan, Alain Humbert

Le microscope à effet tunnel, inventé par G. Binnig et H. Rohrer lauréats du prix Nobel de physique 1986, est une aide locale à très haute résolution, fournissant des images de topographies superficielles de métaux ou de semi-conducteurs. Il est basé sur l'effet tunnel d'électrons qui franchissent la barrière de potentiel constituée par le vide séparant une pointe métallique et la surface d'échantillon.

Cette méthode d'analyse exploite la forte sensibilité de l'intensité du courant tunnel I en fonction de la distance pointe-surface (un ordre de grandeur de variation sur 1 pour 1 Å (0,1 nm) de variation de distance). Ceci permet une résolution normale à la surface meilleure que 0,1 Å. La résolution latérale, de l'ordre de 1 Å dans les meilleurs cas, dépend de la finesse de l'extrémité de la pointe (amas de quelques atomes).

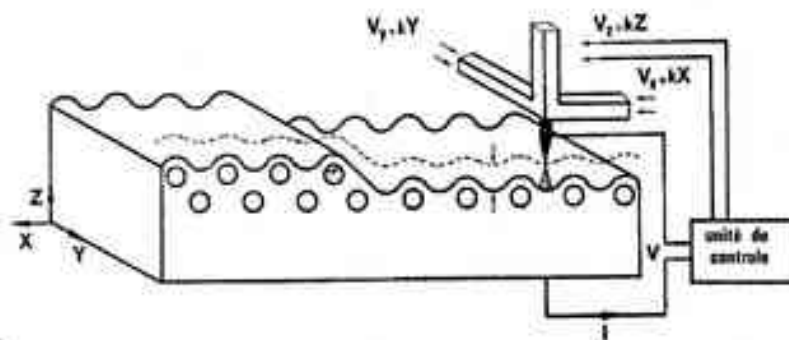


Fig. 3

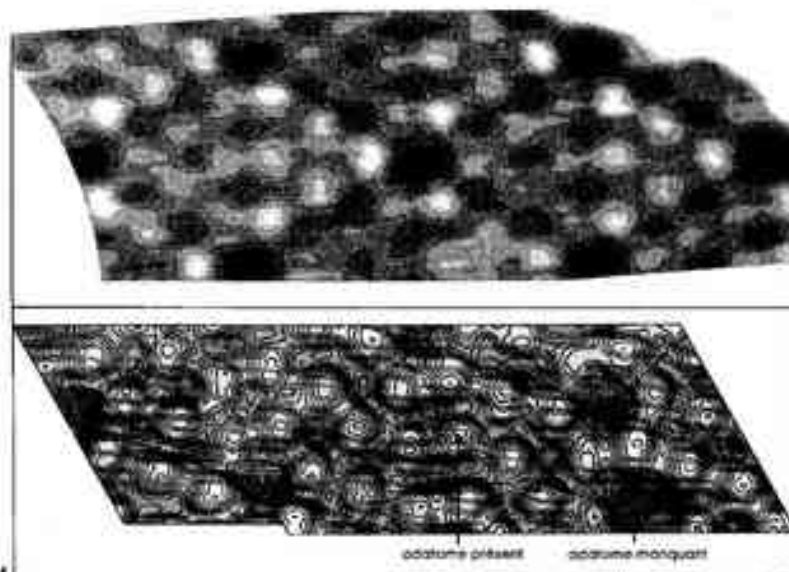


Fig. 4

La figure 2 illustre le principe de l'obtention de l'image topographique d'une surface balayée par la pointe suivant deux directions, OX, OY, et dont le relief est repéré par l'altitude $Z(X,Y)$. La pointe est solidaire de trois céramiques piézoélectriques dont les déplacements X, Y, Z sont proportionnels aux tensions V_x, V_y, V_z appliquées. V_x et V_y assurent le balayage le long de la surface ; V_z est générée par une unité de contrôle qui assure le courant à une valeur de référence. Le balayage est donc effectué à distance pointe-surface constante. Une tension V appliquée entre pointe et échantillon assure le passage du courant I . L'enregistrement de la tension V_z en fonction des tensions de balayage V_x, V_y reproduit la topographie $Z(X,Y)$. La ligne en pointillés visualise une ligne d'enregistrement lors du balayage suivant OX à V_y fixe. La séquence se poursuit pour différentes valeurs de V_y . Le réseau de courbes ainsi obtenu constitue l'image topographique.

La figure 3 illustre la mise en œuvre de ce procédé d'imagerie pour une surface d'un échantillon d'or taillé dans l'orientation (100). On distingue clairement des terrasses séparées par des marches atomiques. On peut observer également des ondulations dont la périodicité dans la direction cristallographique (110) est cinq fois la période observée en volume dans cette direction. Les divisions sur les axes cristallographiques correspondent à 5 Å. Cette image de la reconstruction 5×1 de l'or (100) a été obtenue dans les laboratoires IBM de Zurich par G. Binnig et al. directement sur une table traçante sans aucun traitement d'image. À l'aide d'un traitement d'image plus élaboré, on peut représenter le relief de la surface par une vue de dessus en gris, où les parties sombres correspondent aux creux du relief et les parties claires aux bosses, ou encore par une cartographie en lignes de niveau. La figure 4a montre quelques cellules d'une surface de silicium (111) reconstruite 7×7 . On distingue aux coins de la cellule constituée par un losange de 26,5 Å de côté, des minimums principaux d'1,8 Å de profondeur et des minimums secondaires le long des côtés et de la petite diagonale. On note aussi l'existence de 12 maximums révélant la présence d'adatoms. On remarque une différence de hauteur de 0,2 Å entre les demi-cellules gauche et droite. Une représentation en courbes de niveau est montrée figure 4b en un endroit différent de la surface. La différence d'altitude d'un contour à l'autre est 0,2 Å ! On distingue les 12 adatoms. À droite, en A, on note l'absence d'un adatom situé en position B dans la cellule voisine.

Contrairement aux techniques de diffraction, un arrangement périodique des atomes à la surface n'est pas nécessaire, d'où la possibilité d'étudier des surfaces désordonnées.

Au-delà de l'aspect topographique, on peut aussi obtenir des images de la localisation spatiale d'orbitales électroniques de surface en utilisant la spectroscopie par effet tunnel*.

Fig. 3 - Mise en œuvre du procédé d'imagerie pour une surface d'un échantillon d'or.

Fig. 4 - Traitement d'image élaboré soit en gris (4a) soit en courbes de niveau (4b) d'une surface de silicium.

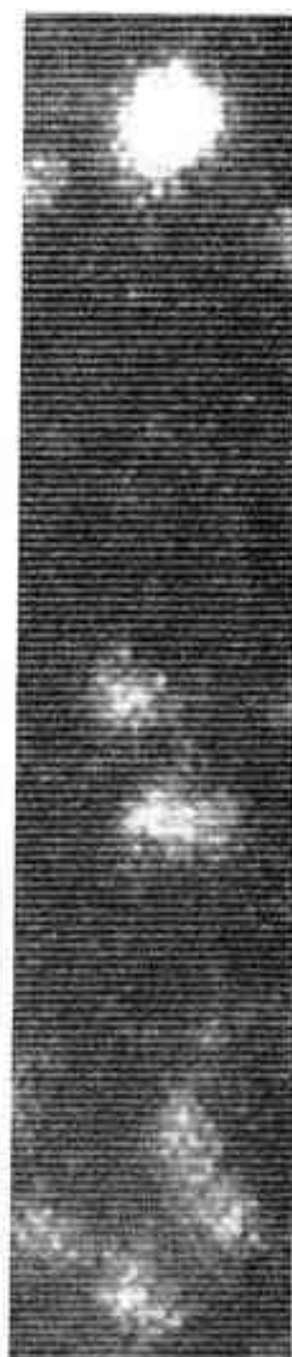
* La Recherche, n° 181, octobre 1988.

LA MICROSCOPIE A BALAYAGE

Pierre Oudet

Le microscope électronique est devenu l'un des appareils fondamentaux des recherches biologiques grâce notamment à la mise au point de techniques de préparation, d'observation et d'analyse de plus en plus précises et sophistiquées.

En microscopie électronique, le rayon lumineux, dont le pouvoir séparateur est bien supérieur à celui de la lumière du classique microscope optique, est remplacé par un faisceau d'électrons. Le microscope électronique à balayage utilise l'exploration point par point d'un objet et reconstitue l'image par balayage sur un oscilloscope cathodique. Grâce à sa résolution de l'ordre de 2 à 5 Å et à l'efficacité de son système de détection, il permet l'obtention d'images de haute qualité de molécules biologiques. Les images ci-contre de minichromosome du virus SV40 proviennent de noyaux de cellules infectées, acquises au microscope électronique à balayage par transmission et traitées sur le système développé au Laboratoire de génétique moléculaire des eucaryotes du CNRS — unité 184 "Biologie moléculaire et génie génétique" de l'INSERM. Le génome viral est compacté sous forme chromatienne. Après étalement en basse force ionique, la structure est visualisée sous forme d'un chapelet de 20-24 perles, les nucléosomes, de 13 nanomètres de diamètre. Dans le microscope électronique à balayage en transmission (STEM), l'efficacité du détecteur annulaire fond sombre permet d'obtenir, à faible dose d'irradiation, des images de macromolécules biologiques non colorées. L'acquisition des données par comptage d'électrons individuels sur le détecteur conduit à des images présentant deux caractéristiques intéressantes : d'une part, leur rapport signal à bruit n'est limité que par le bruit statistique dû au très faible nombre d'événements pro-



duits par l'interaction faisceau-échantillon ; d'autre part, ces images ne présentent pas de contraste de phase et la valeur numérique du point image est directement proportionnelle à la masse locale de l'échantillon.

L'efficacité de l'ensemble système d'acquisition — système de traitement permet de visualiser et caractériser la distribution de masse de particules de masse inférieure à 100 000 daltons en

l'absence de toute fixation d'atomes lourds ou d'ombrage.

Fig. 1 — Dans l'exemple présenté, l'image originale d'un minichromosome de SV40, formée des données brutes recueillies sur le détecteur, montre l'importance du bruit statistique à très faible courant de faisceau. L'autre image a été obtenue en deux étapes : amélioration du rapport signal à bruit par lissage ; augmentation exponentielle de contraste.

Pierre Oudet, chef de travaux, praticien hospitalier à l'Institut de chimie biologique, Laboratoire de génétique moléculaire des eucaryotes (LP 6520 du CNRS) et Unité de biologie moléculaire et de génie génétique de l'INSERM, 11, rue Humain, 67085 Strasbourg Cedex.

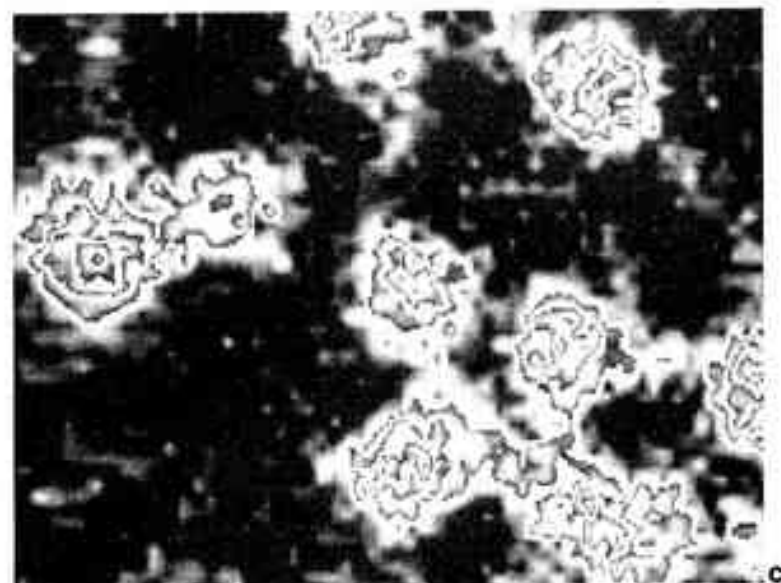
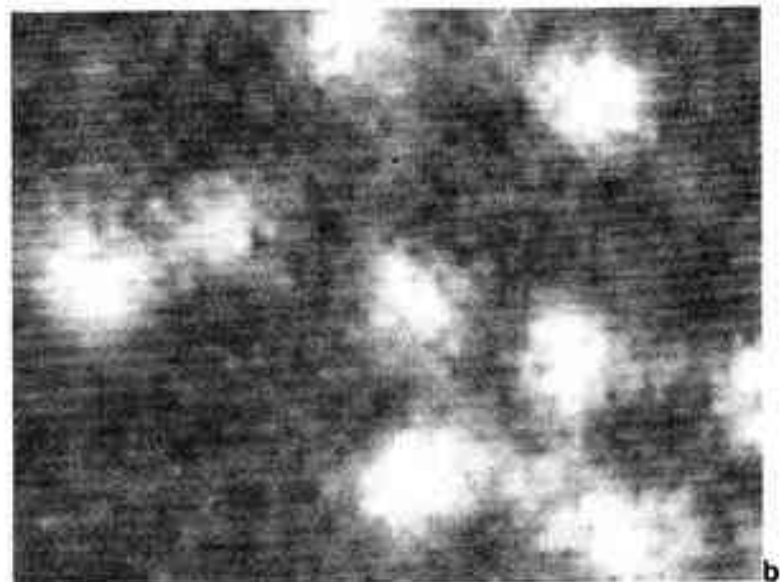
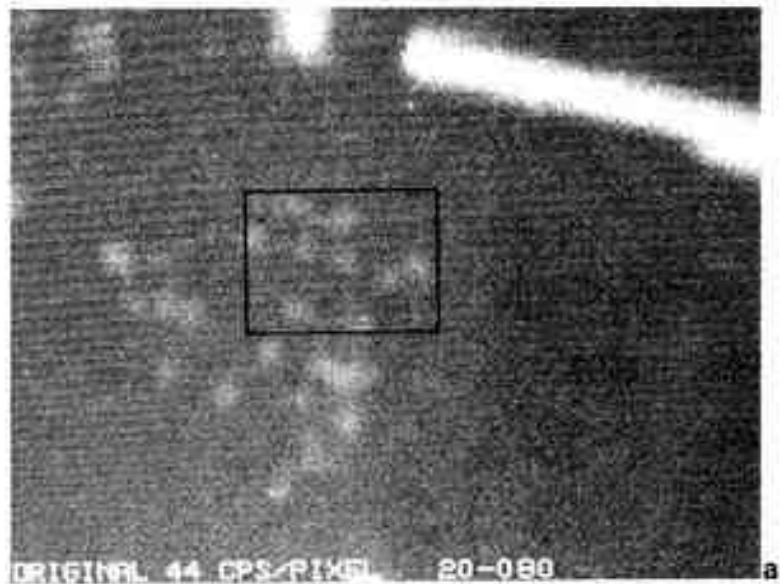


Fig. 2 - a) - Mise en évidence de niveaux d'intensité-densité, image originale.
b) - Après amélioration du rapport signal à bruit et augmentation de contraste, aggrandissement numérique d'une fenêtre de l'image (encadrée sur l'image originale).
c) - Augmentation de contraste linéaire avec repère sur l'image précédente faisant apparaître des courbes d'intensité.
Réalisé par Pierre Collin, Patrick Schultz et Pierre Oudet au Laboratoire de génétique moléculaire des eucaryotes du CNRS et unité de Biologie moléculaire et de génie génétique de l'INSERM.

L'IMAGERIE MICROONDE

Jean-Charles Bolomey, Christian Pichot

Malgré une résolution spatiale inférieure, les images microondes, très sensibles aux propriétés diélectriques donc à tous les facteurs physiques ou physiologiques dont elles dépendent, confirment leur complémentarité vis-à-vis des modalités traditionnelles - infrarouge, optique, ultrasonore ou X - d'imagerie.

Dans le spectre des ondes électromagnétiques, les microondes occupent un domaine de fréquences qui s'étend environ, de 300 MHz à 300 GHz. Actuellement, les microondes sont principalement utilisées pour les besoins des télécommunications terrestres ou spatiales et du radar. Dans certaines applications industrielles ou biomédicales, les microondes procurent, de surcroît, un moyen de chauffage non-invasif.

Contrairement aux rayonnements de fréquences plus élevées infrarouge, optique et X dont l'usage est courant en imagerie, les microondes ont été quelque peu délaissées en vue de cette application. L'absence d'images microondes s'explique, notamment, par les conditions particulières de propagation des microondes dans les milieux observés et par le défaut de moyens d'enregistrement des fronts d'onde, comparables à la plaque photographique dans le domaine optique.

La particularité des microondes tient à leur longueur d'onde, variable du décimètre au millimètre, qui est de l'ordre de grandeur des structures analysées. Aussi leur régime général de propagation est-il complexe et relève-t-il de la diffraction. Ce qui est considéré comme un effet parasite dans l'instrumentation optique, par exemple, est à la base même de la formation des images microondes. Avec les microondes, le concept de rayon perd de sa consistance et la notion de front d'onde est mieux adaptée à la description des phénomènes. Une telle situation exige la mise en œuvre

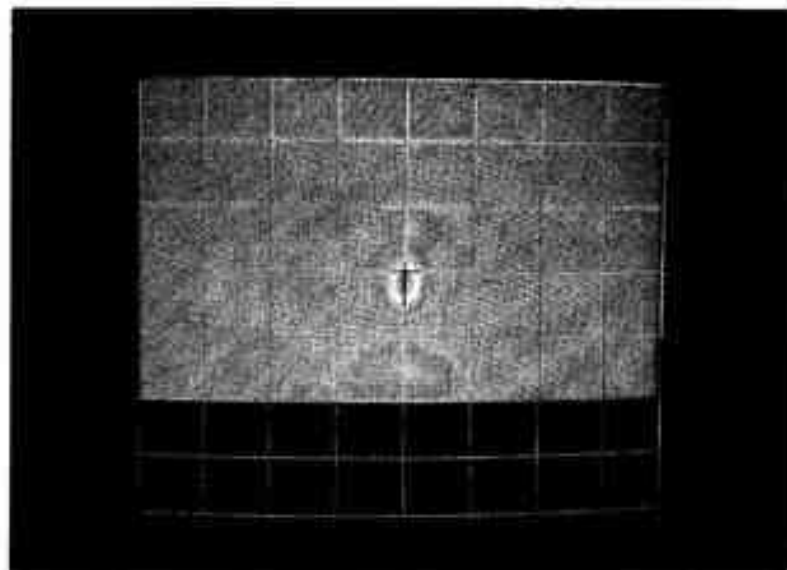


Fig. 58

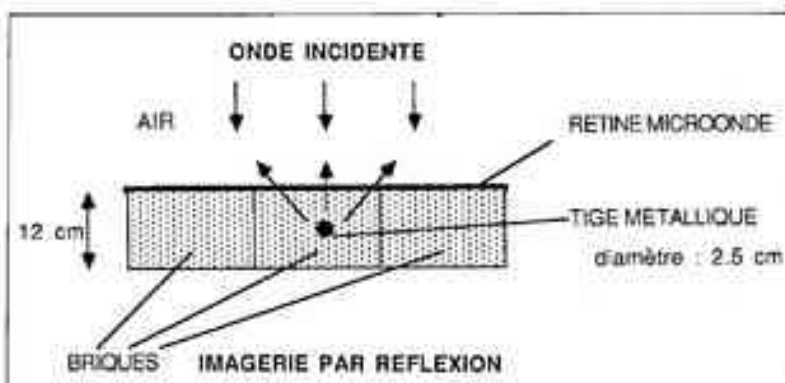


Fig. 5A

de techniques particulières reposant sur une prise en compte globale des fronts d'onde, incluant la cohérence et l'état de polarisation des rayonnements microondes.

Techniques de formation d'images microondes

Le principe des techniques de formation d'images microondes peut être, formellement au moins, appréhendé à partir d'une analogie optique (fig. 1). L'objet observé, éclairé par une onde incidente aussi uniforme que possible, se comporte, selon le principe de Huygens généralisé, comme un ensemble de sources dipolaires induites. L'image de ces sources peut être formée au moyen d'un système focalisant, réflecteur ou lentille, comparable à ceux qui sont déjà utilisés dans les antennes de radar ou de télécommunication. La différence majeure avec l'optique résulte de ce que les dimensions du système focalisant ne peuvent plus être considérées comme infiniment grandes devant la longueur d'onde. Il en résulte, conformément aux phénomènes de diffraction, que l'image d'un point objet est une "tache" de dimen-

sions non négligeables à l'échelle de celles de l'objet, limitant ainsi la définition de l'image. La largeur de cette tache qui, selon le critère de Rayleigh, fournit une estimation de la résolution spatiale, est de l'ordre de la demi-longueur d'onde dans une direction transversale et de deux à trois longueurs d'onde dans une direction longitudinale. De par sa profondeur de champ, un tel système procure déjà une certaine possibilité d'analyse tomographique. Une modification du plan de mise au point, permet de reconstruire l'image d'une tranche de l'objet intégrée sur une épaisseur de l'ordre de la résolution longitudinale.

Pour des raisons de commodité, l'effet du système focalisant sur l'onde transmise par l'objet peut être simulé numériquement à partir des valeurs de l'amplitude complexe du front d'onde, mesurées sur sa pupille d'entrée, en amplitude et phase. Le traitement le plus élémentaire consisterait à pondérer les valeurs complexes mesurées d'un déphasage propre à transformer un front d'onde divergent en un front d'onde convergent. Plus efficace est le traitement spectral qui permet, à partir des seules mesures sur la pupille d'entrée, de recon-

Jean-Charles Bolomey, professeur à l'université de Paris Sud, Christian Pichot, chargé de recherche au CNRS, équipe électromagnétisme, Laboratoire des signaux et systèmes (UM 14 CNRS), Ecole supérieure d'électrique, Plateau du Moulin, 91190 Gif-sur-Yvette.

L'image : l'acquérir, la produire

tituer numériquement l'objet, tranche par tranche. Toutefois, comme c'est le cas pour le "scanner" à rayons X, une véritable analyse tomographique nécessite un protocole d'observation "multivue" correspondant à plusieurs orientations relatives de l'objet par rapport à l'onde incidente. Contrairement aux rayons X dont il est possible de constituer des faisceaux très fins et qui se propagent en ligne droite, les microondes, en raison de la diffraction, ne peuvent être aussi bien confinées dans des faisceaux étroits de telle sorte que c'est à une prise en compte globale du front d'onde en amplitude et phase transmis par l'objet qu'il faut procéder.

Le cœur d'un imageur microonde est sans doute la caméra susceptible d'enregistrer les fronts d'onde, en amplitude et phase, dans des conditions de rapidité et de coût supportables. La difficulté de réalisation d'une telle caméra résulte de la juxtaposition d'un nombre élevé de capteurs et de leur connexion à un récepteur. On pourra estimer le nombre de ces capteurs en sachant que le pas d'échantillonnage requis par le traitement numérique de reconstruction tomographique est égal à la demi-longueur d'onde et que la surface à couvrir, liée aux dimensions de l'objet observé, peut facilement atteindre quelques dizaines, voire quelques centaines de longueurs d'onde. Le déplacement mécanique d'une sonde de mesure est d'une lenteur prohibitive dans la plupart des applications qui exigent une imagerie en temps réel ou quasi-réel. D'autre part, la réalisation d'un multiplexeur microonde possédant le nombre de canaux requis pour connecter les différents capteurs à un même récepteur est complexe et coûteuse. Probablement faut-il voir dans ces circonstances les causes principales du retard pris par l'imagerie microonde. La figure 2 donne le principe d'une caméra développée par le laboratoire qui allie une possibilité d'analyse rapide à un coût de réalisation modéré. La caméra se compose d'une rétine sensible aux microondes et d'un collecteur destiné à récupérer les signaux délivrés par celle-ci. La rétine est constituée par un réseau de petites antennes - dipôles électriques - chargées par une diode. La modulation d'une de ces diodes par un signal basse-fréquence provoque une perturbation qui est captée par le collecteur, lui-même réalisé sous la forme d'une antenne de type cornet. Le signal disponible à la sortie du collecteur est ainsi proportionnel au champ microonde à l'emplacement du dipôle dont la sonde est modulée. Par un adressage séquentiel des différentes diodes, on peut enregistrer l'amplitude complexe du front d'onde, en amplitude et phase, à la surface de la rétine. Des cadences de mesure de l'ordre du millier de points par seconde ont été typiquement obtenues par ce procédé.

Interprétation des images microondes

Il découle des considérations précédentes que la résolution spatiale des imageurs microondes, limitée par la diffraction, est, par essence, inférieure à celle qu'il est permis d'obtenir dans l'infrarouge, en optique ou avec les rayons X. Bien plus, pour une application donnée, le choix de longueurs d'onde aussi courtes que possible est limité par des considérations de sensibilité. L'atténuation des microondes dans les milieux est en effet une fonction croissante de la fréquence de telle sorte que,

pour un milieu donné et une profondeur d'investigation fixée, on ne peut augmenter arbitrairement la fréquence de l'imageur. Il convient cependant de remarquer que la définition d'une image, pour importante qu'elle soit dans les applications les plus usuelles, ne constitue pas pour autant une mesure exclusive de la qualité et de l'intérêt de cette image. Le contraste, la sensibilité des images vis-à-vis de possibles variations des grandeurs représentées peuvent même, dans certains cas, l'emporter sur la définition. Les images formées selon la procédure qui a été décrite représentent, avec l'inévitable lissage résultant d'une imparfaite résolution spatiale, la répartition des sources équivalentes induites par l'onde incidente dans l'objet. De ce fait, les images microondes représentent des grandeurs liées tout à la fois aux propriétés diélectriques de l'objet - constante diélectrique, conductivité - et à la façon dont il est éclairé, comme c'est d'ailleurs le cas dans notre perception optique. A cet égard, un certain apprentissage semble nécessaire pour décoder le contenu et la signification des images microondes. Sensibles aux propriétés diélectriques, les images microondes le sont donc implicitement à tous les facteurs physiques ou physiologiques dont elles dépendent. Température, pression, teneur en eau constituent quelques exemples. Une telle sensibilité permet donc d'entrevoir une complémentarité vis-à-vis d'autres modalités d'imagerie plus conventionnelles (ultrasons, rayons X, RMN...). La complémentarité est encore plus évidente si on prend en compte d'autres aspects liés à la commodité de mise en œuvre et au coût de réalisation.

Alors que les images des courants équivalents relèvent de l'imagerie qualitative, suffisante dans bien des applications, on pourrait espérer d'une imagerie quantitative, un accès non-invasif aux propriétés intrinsèques des milieux observés, indépendamment de tout facteur d'éclairage susceptible d'introduire des artefacts. Il s'agit là d'un problème beaucoup plus difficile, soluble par des méthodes de diffraction inverse dont on connaît les instabilités à l'égard du bruit de mesure. De nombreux efforts théoriques seront encore nécessaires avant de parvenir à des algorithmes de reconstruction tomographique stables et rapides.

Quelques exemples

L'imagerie microonde peut être envisagée dès lors que le milieu observé présente une relative transparence vis-à-vis des microondes. Meilleur sera cette transparence aux fréquences élevées, meilleure sera la résolution spatiale.

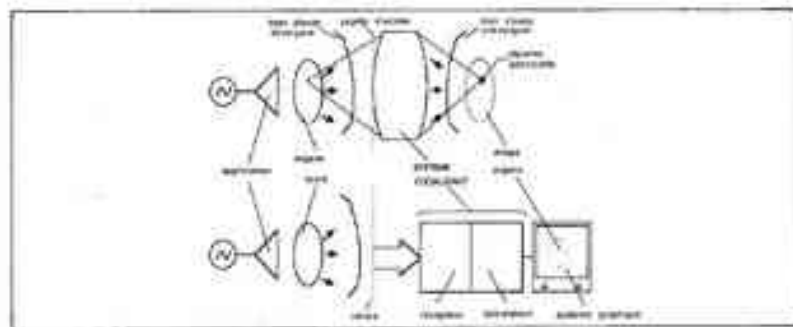


Fig. 1

Les premiers travaux du laboratoire ont été engagés dans le domaine biomédical à partir des résultats prometteurs de Larsen et Jacobi du Walter Reed Army Institute (Washington D.C.). Des expérimentations sur organes animaux, isolés et perfusés, menées en collaboration avec le Laboratoire de thermologie biomédicale (INSERM, Strasbourg) ont très vite confirmé la sensibilité attendue des images microondes à la teneur en eau et à la température et permis la réalisation industrielle de deux prototypes fonctionnant à une fréquence de 2,45 GHz. Des images de volumes de tissus de l'ordre de $20 \times 20 \times 20$ cm³ peuvent être obtenues avec une résolution spatiale de l'ordre du centimètre selon le protocole (monovue ou multivue). La figure 3 illustre la dépendance des images vis-à-vis de la teneur en eau - organe perfusé ou non perfusé. (Une dépendance des images existe également vis-à-vis de la température). Tandis que la figure 4 montre l'image d'une main, c'est-à-dire la répartition des courants équivalents induits par le rayonnement microonde. Les deux prototypes ont été engagés dans une Procédure de transfert et d'évaluation à l'Institut Curie (Paris) et au laboratoire INSERM de Strasbourg en vue de l'utilisation de la tomographie microonde pour le contrôle non-invasif des traitements d'hyperthermie en cancérologie.

D'autres applications, sans doute prometteuses à très court terme, sont à l'étude dans le domaine des capteurs industriels, du contrôle non-destructif et du test rapide des grandes antennes de télécommunications. La complexité du traitement numérique des données peut varier très sensiblement selon les applications. La seule connaissance du champ transmis par un milieu peut suffire, dans certains cas, en l'absence de tout traitement. Dans d'autres applications, seul l'accès au champ rétro-diffusé est possible comme c'est le cas pour la détection d'objets enfouis dans le sol. La figure 5 représente l'image obtenue en réflexion d'une tige métallique placée à l'intérieur d'un matériau constitué de briques.

Le développement d'un imageur microonde repose sur un double pari. Le premier, d'ordre physique, consiste à en vérifier la faisabilité physique, à savoir, la visibilité de ce qu'on recherche à travers un rayonnement microonde. Le second, d'ordre technologique, consiste à s'assurer de la faisabilité d'un équipement opérationnel dans des contraintes fixées d'environnement et de coût. L'imagerie microonde n'en est qu'à ses tous premiers balbutiements. Son essor demandera des efforts de recherche importants au niveau des algorithmes de reconstruction tomographique et

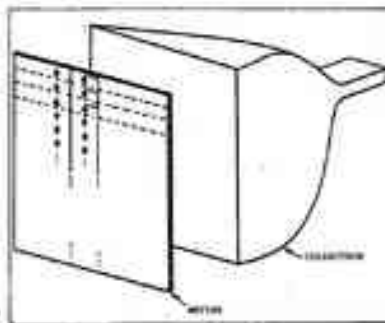


Fig. 2

à celui des équipements. Le développement attendu des circuits intégrés monolithiques sur AsGa aura, à coup sûr, un impact déterminant sur l'évolution de l'imagerie microonde. D'ici là, une caractérisation diélectrique systématique des milieux et un apprentissage dans l'interprétation d'images microondes plus ou moins élaborées constituent des tâches prioritaires, indispensables pour mieux cerner le champ d'application de cette nouvelle modalité d'imagerie.

Fig. 1 - D'un point de vue concret, la formation des images microondes s'apparente à l'holographie et à l'imagerie optique. Les algorithmes de reconstruction simulent l'action d'une lentille à focale variable et à faible profondeur de champ. Par modification de la distance focale, on fait varier le plan de mise au point. La faible profondeur de champ garantit l'exploitation d'une tranche réduite. Cette analogie optique est connue. Toutefois, dans le cas des microondes, il existe des aspects spécifiques. D'une part, les milieux étudiés sont peu transparents. D'autre part, la dimension des structures étudiées ne peut être considérée comme infiniment grande devant l'onde. Ces deux aspects contribuent à limiter la résolution : l'image d'un point se répartit en fait dans un volume (réponse ponctuelle). Pratiquement, le système optique peut être remplacé par une rétro-mesure permettant la mesure du champ sur la pupille d'entrée. L'effet de la lentille est simulé par des algorithmes de reconstruction. Un calculateur permet alors d'effectuer les calculs et d'afficher l'image par l'intermédiaire d'un système graphique.

Fig. 2 - Dans tous les cas, le problème expérimental est celui de la mesure d'un champ microonde en amplitude et déphasage, sur une surface dont les dimensions se comptent en dizaines de longueurs d'onde. La mise en œuvre des algorithmes de reconstruction nécessite un pas de mesure maximal d'une demi-longueur d'onde. Le système de la caméra microonde se compose d'une rétro-mesure et d'un collecteur. La rétro-mesure est constituée d'un grand nombre d'antennes, dipôles par exemple, chargées par des diodes et placées en chaque point où l'on désire mesurer le champ. En modulant successivement les différents diodes, on peut relever rapidement la carte du champ en amplitude et déphasage. Le collecteur, quant à lui, est constitué par un guide à profil non uniforme.

Fig. 3 - Coupe sagittale d'un rein de cheval perfusé (vue supérieure) et non perfusé (vue inférieure). Dans cette expérimentation, l'organe étudié était un rein de cheval prélevé sur un animal abattu. La fréquence de travail était de 3 GHz avec une puissance incidente de l'ordre du mW/cm².

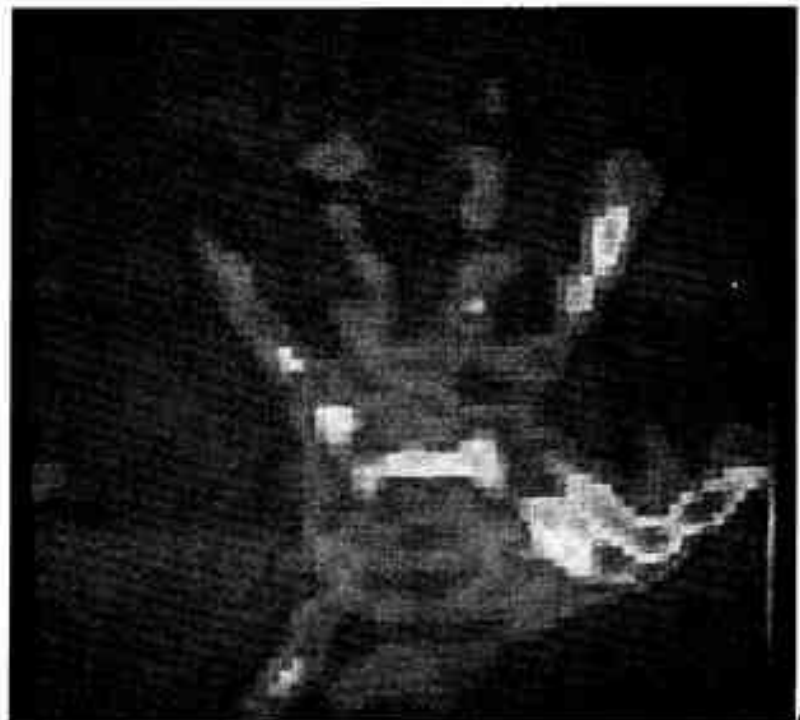


Fig. 4

La perfusion était assurée de façon externe et l'organe était plongé dans un bain d'eau à 37°C. Deux types d'images ont été obtenues : sur la première (image supérieure), on voit une coupe verticale au centre de celui-ci. Sur la seconde (image inférieure), la même coupe mais plusieurs heures plus tard après que la perfusion eût été supprimée. La première image correspond donc à un organe vivant et la seconde à un organe mort. On remarque des différences importantes dans la répartition des zones brillantes et des zones d'ombre et donc que l'imagerie microonde est sensible avant tout à la teneur en eau. En effet, quand l'organe est perfusé, le liquide de perfusion (perfusat) se répartit dans les zones d'échange du rein (glomérules). Le perfusé étant plus conducteur, diélectriquement parlant, ces zones ressortent brillantes. Par contre, dans le cas de l'organe non perfusé, tout le perfusé accumulé dans le rein se répartit de façon presque uniforme sous l'effet de la suppression de la perfusion (plus de pression au niveau des artères). On note sur l'image supérieure, les tuyaux de perfusion qui passent au-dessus de l'organe.

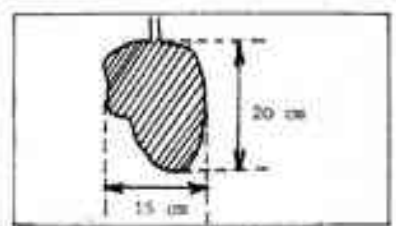
Fig. 4 - Il s'agit de la reconstruction d'une main placée dans un bain d'eau à 30°C parallèlement et à une distance de 5 cm de la rétro-mesure. La fréquence utilisée est de 2,45 GHz.

Fig. 5 - L'expérimentation suivante évoque l'application de l'imagerie microonde à la détection d'objets enfouis. On cherche dans ce cas à utiliser le front d'onde rétrodiffusé par l'objet. La tige métallique est enfouie dans de la brique à une profondeur de 6 cm. La fréquence du signal incident peut varier de façon discrète dans la gamme de 8 à 12 GHz.

La combinaison des différentes images obtenues pour chaque fréquence permet d'améliorer considérablement la résolution spatiale longitudinale. On peut ainsi arriver à une résolution spatiale quasi-isotrope. Sur la figure 5.a est représentée la configuration de l'expérimentation et sur la figure 5.b l'image obtenue avec un pas en fréquence de 500 MHz dans la gamme considérée.



Fig. 5



LE MICROSCOPE ACOUSTIQUE

Jacques Attal, Jean-Marc Saurel

Instrument qui utilise les ultrasons pour réaliser des images microscopiques d'élasticité de la matière. Les possibilités de pénétration de ces ondes acoustiques permettent l'observation de structures en profondeur dans des matériaux optiquement opaques.

Optique, électronique et maintenant acoustique sont aujourd'hui les trois domaines exploités par la microscopie. L'utilisation des ultrasons dans ce domaine remonte aux années 1970, suite notamment aux travaux des équipes de recherche de l'université de Stanford (Californie). Depuis, plusieurs prototypes de microscopes acoustiques ont été mis au point à travers le monde, et plusieurs industriels ont récemment commercialisé cet instrument. Le microscope acoustique, par la nature de la radiation utilisée, présente les avantages habituels des ultrasons : rayonnement non ionisant, donc sans danger pour les applications biomédicales, et non destructif lorsqu'il s'agit d'observer les solides en profondeur. La résolution de cet instrument, qui conditionne le grossissement maximal, est comparable à celle des meilleurs appareils optiques. En outre, l'opacité acoustique, différente de celle de l'optique, explique que chaque instrument puisse fournir des informations complémentaires sur un même échantillon. C'est ainsi qu'un morceau de plexiglas aussi transparent qu'un morceau de verre ne produit qu'un faible contraste optique, tandis que le verre, beaucoup plus réfléchissant aux ultrasons que le plexiglas, donne un contraste acoustique plus fort. En revanche, l'aluminium et le verre ont des caractéristiques acoustiques similaires, alors qu'en optique, ils sont très nettement différenciés.

Principe du microscope acoustique à balayage mécanique

Alors que nous disposons de détecteurs pour enregistrer un flux lumineux provenant d'un objet, il n'existe pas de récepteurs acoustiques analogues à l'œil ou à la plaque photo pour fixer sur un support l'image acoustique. On a donc cherché différents artifices de transcription, ce qui a conduit au système actuel qui s'inspire en partie du microscope électronique à balayage. Dans son principe de base (fig. 1), le microscope acoustique comprend un générateur d'ultrasons constitué par un transducteur piézoélectrique qui convertit un signal électrique haute fréquence en un signal acoustique de même fréquence, au moyen d'une couche mince d'oxyde de zinc et d'un cristal de

Jacques Attal, professeur à l'université de Montpellier II, Jean-Marc Saurel, ingénieur de recherche au CNRS, Laboratoire d'automatique et de microélectronique de Montpellier (UA 371 CNRS), université de Montpellier II, Institut des sciences de l'ingénieur, place Eugène Bataillon, 34060 Montpellier Cedex.



niobate de lithium dont les orientations cristallographiques, ainsi que leurs épaisseurs, sont parfaitement contrôlées. Ces matériaux piézoélectriques sont déposés ou fixés sur l'une des faces planes et polies d'un petit barreau de saphir préalablement métallisé. Comme en optique, on peut aussi focaliser des

ondes ultrasonores en interposant entre la source et l'objet un dioptre sphérique ou lentille, séparant deux milieux d'indices différents : le premier milieu étant le barreau de saphir, le deuxième milieu étant un liquide de couplage, les ultrasons ne se propagent pas dans l'air. Le faisceau d'ultrasons est donc focalisé en une très petite tache



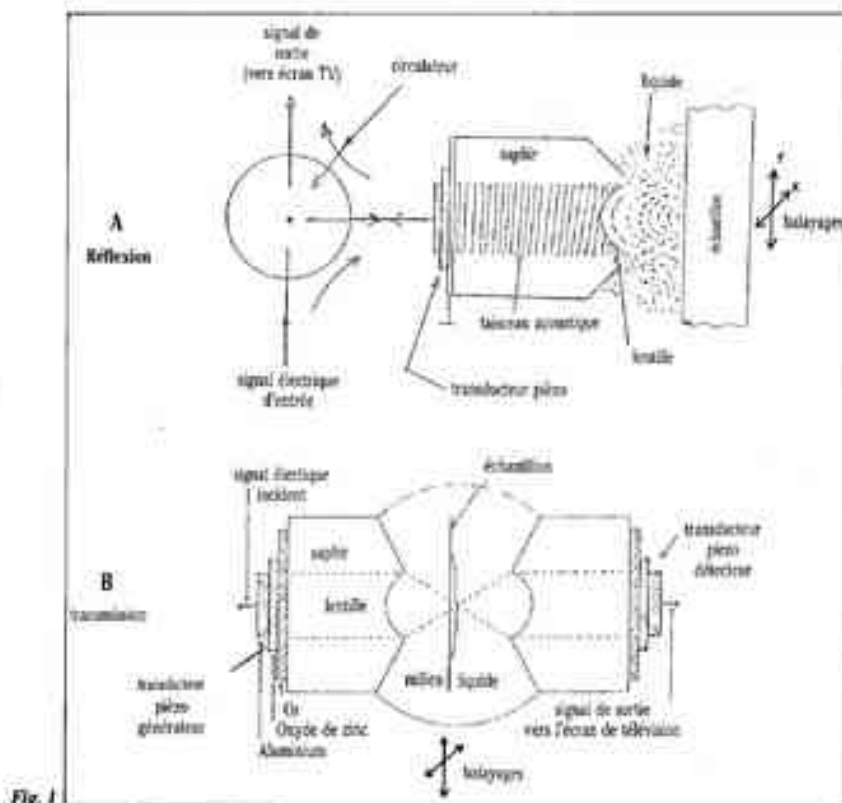


Fig. 1

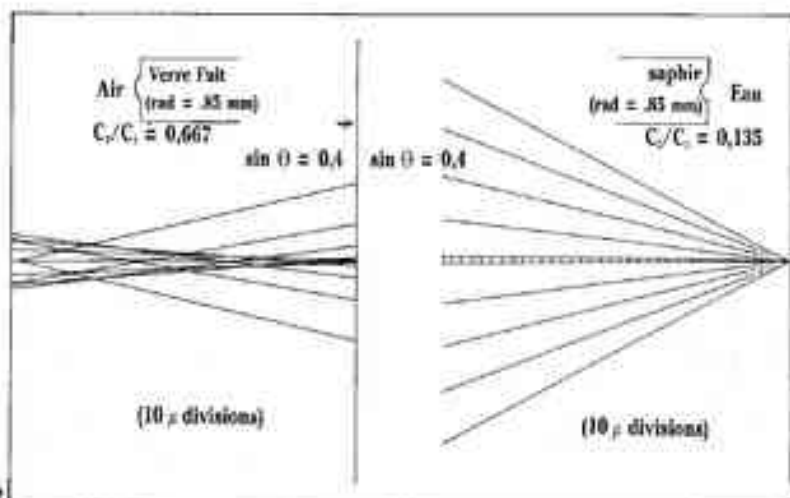


Fig. 2

située dans le plan de l'objet. Il est possible de visualiser l'objet par réflexion ou par transmission en recueillant respectivement les faisceaux réfléchis et transmis. Dans le premier cas, le système émetteur joue aussi le rôle de récepteur en utilisant l'effet piézoélectrique inverse ; les signaux émis et réfléchis sont alors séparés dans le temps de la même manière que dans un radar. En transmission, on dispose un second capteur symétriquement par rapport au premier. L'image acoustique de l'objet dans un plan parallèle à la surface est obtenue par balayage mécanique de l'échantillon par rapport au capteur (ou le contraire) suivant deux directions perpendiculaires dans le plan focal de la lentille. Les informations reçues à la sortie des transducteurs sont stockées dans une mémoire numérique en correspondance avec les

déplacements de l'objet et l'image finale est visualisée sur un moniteur vidéo classique. Les grandissements atteints vont d'une dizaine à quelques milliers. Le champ maximal observé varie suivant les possibilités mécaniques du système de balayage et de l'utilisation faite de l'instrument. Il est de la fraction de centimètre carré pour un temps d'acquisition d'image d'une dizaine de secondes environ.

La lentille de focalisation

La lentille de focalisation doit être taillée avec soin pour assurer la meilleure qualité d'image possible. L'atténuation dans le liquide de couplage impose des rayons de courbure qui peuvent être inférieurs au dixième de millimètre. La fabrication de surfaces sphériques de cette dimension est certes délicate, mais elle est sans comparaison

avec la forme asphérique idéale qu'il faudrait donner pour une focalisation rigoureuse et qui pourrait compenser les défauts des aberrations indésirables par un étalement de la tache locale dans la direction de l'axe de la lentille. Cet étalement ou aberration sphérique est proportionnel au carré des vitesses de propagation des ondes dans les deux milieux constituant le dioptré.

La figure 2 permet de comparer une focalisation obtenue avec une lentille optique, à celle obtenue avec une lentille acoustique de même courbure. En fait, les valeurs de l'aberration doivent être corrigées pour tenir compte de la diffraction qui impose une limitation.

Une seule lentille acoustique sphérique permet d'obtenir une focalisation exempte d'aberration et approchant la valeur théorique donnée par la diffraction, tandis qu'une bonne focalisation en optique ne peut se concevoir sans une association de plusieurs lentilles.

Le liquide de transmission

Son rôle est capital : de lui dépendant la résolution, la pénétration et la nature des objets à observer. Tout naturellement, les premières investigations ont commencé avec l'eau qui présente un grand nombre d'avantages : compatibilité et facilité d'utilisation permettant des observations à température ambiante inoffensive pour l'opérateur. Son principal inconvénient est qu'elle absorbe fortement les ondes acoustiques avec typiquement 200 décibels par millimètres à un gigahertz. Ainsi, la résolution maximale espérée pour le microscope acoustique ne peut descendre au-dessous de 1000 Å avec ce liquide et ce, au prix de la réalisation de lentilles de rayon de courbure proche du micromètre et de capteurs piézoélectriques hautement sophistiqués. Elle est malgré tout, largement utilisée dans la plupart des microscopes. Cependant, d'autres liquides ou gaz ont été utilisés afin d'augmenter la résolution : l'hélium superfluide ou l'argon sous pression, mais ils présentent l'inconvénient de technologies lourdes et difficiles à réaliser.

Si l'utilisation de tous ces liquides ou gaz permet d'obtenir des images fines de structures voisines de la surface, il est à constater que le domaine de prédilection des ultrasons reste l'imagerie en volume dans les matériaux optiquement opaques. Or, le principal obstacle rencontré est l'irradiation de l'objet en profondeur, limitée par la transmission du son à l'interface liquide-objet. Cette transmission dépend essentiellement des valeurs des impédances acoustiques des milieux, elle est définie comme le produit de la masse volumique par la vitesse du son. L'impédance des solides étant généralement dix à soixante fois plus élevée que celle de la plupart des liquides, 80 à 95% de l'énergie acoustique est réfléchi à l'interface liquide-

Fig. 1 - Principe de fonctionnement du microscope acoustique.

A) en réflexion

B) en transmission

L'objet dans le plan focal est animé de mouvements de translation perpendiculaires qui assurent la prise de l'image point par point en une dizaine de secondes.

Fig. 2 - Comparaison des performances d'une lentille optique et acoustique composée d'un simple dioptré asphérique. Le tracé des rayons a été limité à une ouverture égale à 0,4 et l'on constate que le champ d'aberration est beaucoup plus prononcé en optique.

L'image : l'acquérir, la produire

solide. Cette perte rend l'imagerie en profondeur difficile. Fort heureusement, deux liquides échappent à cette règle : le mercure et le gallium. Ces deux métaux quasi liquides à température ambiante ont des impédances comparables à celles de la plupart des solides ; de plus leurs absorptions intrinsèques sont respectivement quatre et seize fois plus faibles que celle de l'eau mais des précautions doivent être prises afin d'éviter l'amalgame avec certains métaux tels que l'or, l'étain, le plomb, etc.

Les différents domaines d'utilisation de la microscopie acoustique

Le biomédical

La plupart des applications des ultrasons dans le domaine médical se limitent à une dizaine de mégahertz, ce qui correspond à une pénétration de quelques centimètres, pour une résolution maximale approchant le dixième de millimètre. Le domaine de fréquence allant jusqu'à un gigahertz est actuellement presque totalement inexploité, faute de motivation sérieuse, et d'appareils existants. Pourtant deux axes de recherche s'esquissent aujourd'hui dans le domaine de la biologie et de la médecine.

- La biologie. Un des aspects les plus intéressants de la microscopie acoustique, outre son caractère non destructif, est le fait qu'il n'est pas nécessaire de colorer le tissu à examiner. C'est ainsi qu'il est possible d'observer des coupes de tissu frais de cinq à quarante microns d'épaisseur, ou des cultures de cellules ou de bactéries dans leur milieu d'environnement, avec une résolution atteignant celle de l'optique (fig. 3). Les images acoustiques comparées à celle optique (obtenues après fixation et coloration) sont tout à fait superposables lorsque l'optique le permet, c'est-à-dire pour de faibles épaisseurs. Les contrastes sont par nature très différents, ce qui incite les chercheurs à développer toute une connaissance sur les "échostructures" caractéristiques des tissus.

- La médecine. La phase de différenciation des "échostructures" caractéristiques des différents types de tissu peut mener au diagnostic après une étude statistique sur un grand nombre de cas. C'est ainsi que l'échantillon de tissu peut être prélevé ou analysé *in vivo* directement sur toute son épaisseur, évitant ainsi la découpe en tranches de cinq microns, la préparation et la lecture optique fastidieuse de plusieurs dizaines de coupes, sans être sûr d'avoir observé l'endroit suspect. Pour aller au plus près des tumeurs, une version endoscopique est déjà à l'étude grâce aux progrès des techniques microélectroniques visant à miniaturiser le capteur et son environnement.

La microélectronique

En revanche, les résultats obtenus en microélectronique sont très prometteurs et les exemples abondent dans ce domaine. Nous distinguerons cependant deux grandes classes d'observation.

- Imagerie de surface. Elle concerne la surface et les premiers microns pour la surface avec, comme exemple type, les structures multicouche métalliques et diélectriques constituant la zone active d'un microcircuit. Bien que n'étant pas totalement inerte, l'eau est actuellement utilisée comme liquide de couplage. Il est possible de mettre au point sur l'une quelconque de ces couches et

d'observer d'éventuels défauts naturellement peu ou pas visibles optiquement, apparus lors de l'élaboration du circuit. D'autres expériences du même genre, visant à vérifier l'adhérence d'une couche mince sur son substrat avant et après photographie montrent clairement qu'après cette opération, les bandes métalliques ont tendance à se décoller sur les bords du fait de l'infiltration de la solution d'attaque chimique sous la couche. Des défauts de croissance cristalline résultant de la présence d'impuretés ou de contraintes induites par polissage ont été décelés. D'une manière générale, différentes phases des processus de fabrication des circuits intégrés peuvent être qualifiées par la microscopie acoustique.

Reconfiguration de circuit par microscopie acoustique. Le fait de pouvoir identifier différents matériaux rend possible la reconfiguration d'un circuit intégré par niveau de masque. Des expériences ont été tentées avec succès sur un empilement de plusieurs couches en utilisant en outre un système d'analyse d'image performant qui opère la séparation des niveaux de gris de l'image acoustique (figure 4). C'est la technologie du *reverse-engineering* qui devrait permettre de retrouver d'une part, les tracés des masques et d'autre part, de mettre en évidence les défauts de structure ou d'épaisseur.

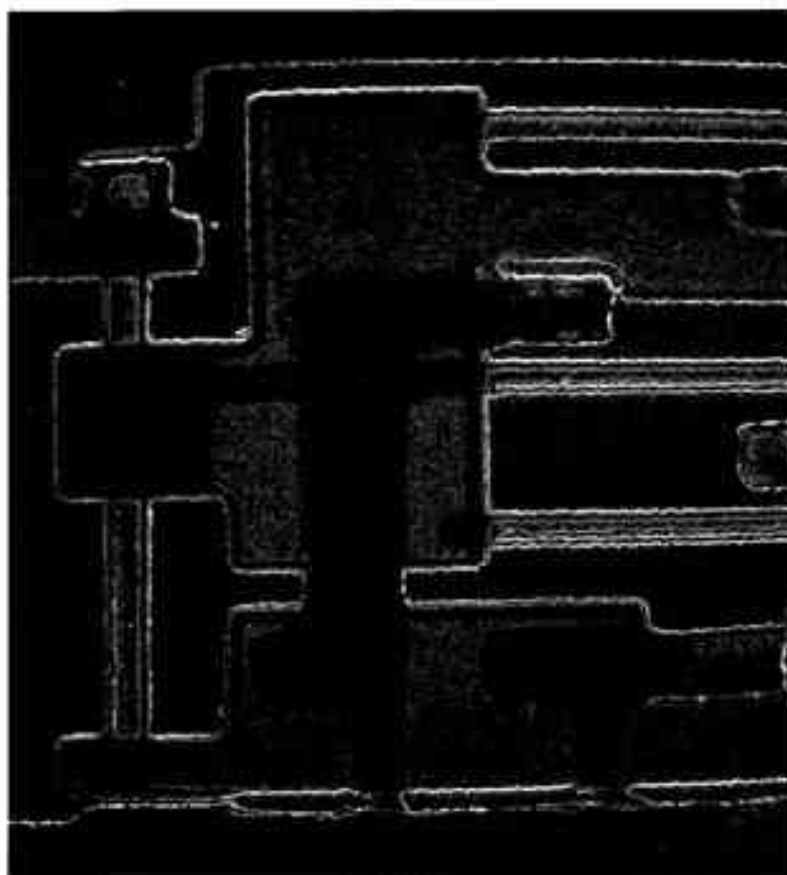
- Imagerie de volume. Le domaine le plus important d'applications de la microscopie acoustique concerne l'observation de structures en volume, lorsque les autres techniques d'investigation atteignent leurs limites. Le contrôle qualité des matériaux est concerné essentiellement par cette nouvelle technique non destructive. C'est ainsi que

laïlles, fractures, inclusion, bulles ou tout défaut interne susceptible de modifier localement les constantes mécaniques engendrent une variation de coefficient de réflexion des ondes acoustiques, et par là-même donnent un contraste sur l'image. Dans le cas, par exemple, de céramiques ou de matériaux à fibres composites, des défauts de cette nature, invisibles ou difficilement visibles par d'autres techniques, sont responsables de défaillances graves et peuvent compromettre sérieusement les propriétés mécaniques, thermiques ou électriques spécifiques. Ces préoccupations industrielles, qui visent une diminution du coût de production tout en respectant un "gabarit" précis de fabrication pour chaque matériau en fonction de son utilisation, ne laissent que de faibles marges d'erreur. Le contrôle en cours de production, en continu ou par prélèvement d'échantillons, devient donc le garant d'une qualité suivie tout en perfectionnant les outils de fabrication pour s'approcher du "zéro défaut".

Pour ce genre d'application, il n'est pas toujours utile de stocker l'image acoustique avec toute la résolution possible, mais de détecter et d'identifier plutôt la présence de structures ou de textures parfaitement connues des spécialistes comme étant un point de faiblesse. Il est donc évident que ce type de microscope aura des paramètres acoustiques (fréquence, locale, pénétration, etc.) optimisés pour une application donnée.

Deux exemples en laboratoire illustrant les possibilités d'un appareillage spécifique peuvent être donnés.

Le premier exemple concerne le test de soudure



L'image : l'acquérir, la produire

et de placage de deux matériaux : silicium sur molybdène et cuivre sur céramique, structures qui constituent les éléments de base d'un composant électronique de puissance. L'observation peut se faire soit à travers le molybdène, soit à travers le silicium de même pour le cuivre/céramique. Les épaisseurs de matériaux étant de plusieurs dixièmes de millimètre, la fréquence d'opération se situe autour de 200 mégahertz, avec une résolution d'une vingtaine de microns. Très clairement, apparaissent sur l'image acoustique (fig. 5) des zones homogènes correspondant à une bonne adhérence, et des endroits très hétérogènes identifiés comme étant les prémices d'un décollement. Il est possible, grâce à un système d'imagerie, de quantifier l'étendue relative des différentes zones, et de définir pour chaque soudure un critère de qualité.

Le second exemple et peut-être le plus spectaculaire sur le plan de l'imagerie acoustique, a été de visualiser l'intégralité d'un microcircuit à travers son substrat de silicium. Ce type d'observation est rendu nécessaire car les techniques de fabrication ont évolué vers la disparition des fils de liaison du circuit à son étaiement. Le circuit est alors retourné (technologie flip-chip) de telle sorte que les plots de sortie soient directement soudés, après positionnement précis, à ceux de l'embase. On conçoit alors que de telles soudures soient difficilement contrôlables au même titre que le circuit lui-même. L'image optique ne donnant aucune information, l'image obtenue aux rayons X renseigne sur l'emplacement des plots, mais la résolution ne permet pas de faire apparaître plus de détails. En revanche, la microscopie acoustique nous donne une image complète du circuit avec une résolution de quelques microns améliorable après une traversée de substrat d'une fraction de millimètre.

Perspectives d'avenir

À l'heure actuelle, où quelques instruments ont été mis sur le marché, il semble que le premier domaine d'application soit les matériaux industriels, c'est-à-dire tôles, céramiques, composites, soudures et ceux de la microélectronique. L'utilisation en tant que contrôle de défaillance et de reconfiguration de circuit pourra se faire après développement de logiciels spécifiques d'imagerie en interaction avec les outils de conception assistée par ordinateur. Enfin, après un délai, suivra un instrument biomédical d'une part, pour le chercheur désireux de suivre le milieu vivant dans son environnement sans intervention externe invasive, et d'autre part, pour le médecin ou le chirurgien qui pourra qualifier le tissu prélevé sur le lieu même d'intervention.

Dans tous les cas, le couplage de cet instrument avec un système d'analyse d'images accroîtra ses possibilités en donnant des résultats quantitatifs indispensables en imagerie moderne. Les appareils de demain, spécifiques à chaque application et conçus actuellement dans les laboratoires, franchiront une nouvelle étape vers l'automatisation et la robotisation.

C'est dans la perspective d'un développement industriel que le CNRS, l'université scientifique et technique du Languedoc et la Société Bertin ont signé un accord cadre en 1986, portant sur le transfert du savoir-faire sur la conception, réalisation

et utilisation des microscopes acoustiques basse et haute fréquence, des différents types de capteurs acoustiques ayant fait l'objet de plusieurs années d'étude et de recherche. La Société Bertin, très armée pour résoudre les problèmes que peut poser le développement industriel d'une telle technologie, s'engageait à pourvoir les efforts du Laboratoire d'automatique et de microélectronique en envisageant la réalisation d'appareils spécifiques aux différents types d'utilisation possibles, laissant l'équipe de microscopie acoustique du laboratoire s'orienter vers d'autres recherches et d'autres améliorations sur l'imagerie ultrasonore.

Différentes images vues au microscope acoustique

A/ Examen de couches minces.

Mise en évidence de défauts de surface ou de défauts dans la structure de couches minces de SF6A Y de surface de cadmium utilisées pour les cellules solaires ; (photo 1), vue d'un détail : le microscope acoustique permet de déterminer les dimensions des inclusions ou aspérités. La répartition de l'amplitude réfléchie (courbe en bas de la photo) permet de caractériser la hauteur du défaut ainsi que sa longueur et largeur (10 millimètres, 35 millimètres, 25 millimètres ; fréquence d'utilisation du microscope 1 gigahertz).

B/ Vues de composants microélectroniques (plots en silicium).

Vues par la face avant des structures multicouches à différentes profondeurs (photo 2 ; photo 3). Ce composant comprend une couche de polysilicium de Si 32 et d'aluminium. Les mêmes vues après traitement d'image (filtrage des contours et égalisation) (photo 4) ; fréquence d'utilisation du microscope 1,9 gigahertz.

C/ Analyse d'un support de composants microélectroniques de puissance.

Détection des défauts d'adhérence entre l'interface cuivre/aluminium 200 (épaisseur de cuivre traversée 0,3 à 0,4 millimètres, fréquence d'utilisation du microscope 200 mégahertz).

D/ Traversée du cuivre : détection des macles et joints de grains (photo 5).

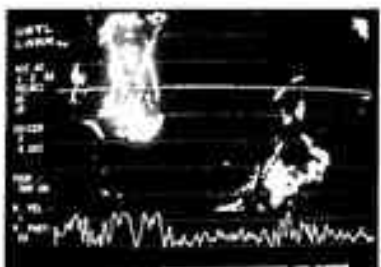
Identification d'un défaut par microscopie acoustique méthode non destructive (observation à travers le cuivre (photo 6) et avec un traitement d'image qui permet d'en mieux définir les contours (photo 7), la hauteur du décollement est de l'ordre de 15 à 20 millimètres).

E/ Détection au microscope acoustique à 200 mégahertz des variations de contraintes mécaniques dues au dopage d'un composant électronique de puissance (photo 8).

F/ Analyse de cultures de cellules d'hépatocyte par microscopie acoustique fonctionnant en transmission (photo 9). Détection des noyaux et défauts à l'intérieur de la cellule.

Bibliographie

- 1 - Lemons, (R.A.), Quate (C.F.), "Advances in mechanically scanned acoustic microscopy," *Ultrasonics symposium proceedings IEEE*, 1974, pp. 41-44.
- 2 - Ilett (C.), Somekh (M.G.) and Briggs (G.A.D.), "Acoustic microscopy of elastic discontinuities," *Proc. R. Soc. Lond.* A393, 171, 183, 1984.
- 3 - Kazushi, Yamazaki, Yuji Enomoto, "Observation of surface cracks with scanning acoustic microscope," *J. Appl. Phys.*, 53(2), February 1982.
- 4 - Attal (J.), Bagnol (J.), Dandenneau (J.M.), Ly (C.C.), Merle (P.), Saurès (J.M.), Vellas (J.R.), "Utilisation de la microscopie acoustique pour l'investigation des matériaux. Applications aux circuits intégrés," *J. Microsc. Spectrosc. Electron.* Vol. 9, 1984, pp. 251-257.



IMAGERIE MÉDICALE ULTRASONORE

Methias Fink

L'intérêt essentiel des ultrasons est leur sensibilité aux variations d'élasticité des tissus mais aussi leur absence de nocivité.

Le succès des ultrasons en imagerie médicale est lié en grande partie à leur absence de nocivité aux doses utilisées en mode échographique. C'est une des raisons de leur impact en obstétrique où ils ne connaissent pratiquement pas de concurrence. Ils sont aussi très bien adaptés à l'exploration abdominale, à l'angiographie cardiaque et à l'ophtalmologie.

Les images obtenues avec ce type de rayonnement contiennent une information particulièrement utile aux médecins, qui est liée à l'interaction des ultrasons avec les tissus et qui met en évidence leurs propriétés mécaniques : compressibilité (ou élasticité) et densité volumique.

Il faut noter qu'à côté des propriétés d'élasticité, l'interaction ultrasons-tissus peut aussi révéler à travers la mesure de l'atténuation ultrasonore d'autres informations. Les deux composantes de l'atténuation : la diffusion et l'absorption sont liées, toutes les deux, à des paramètres cellulaires qui intéressent au premier plan le médecin. La diffusion est reliée au taux d'hétérogénéité des tissus à l'échelle de la longueur d'onde (taux de collagène et taux de lipides). L'absorption, qui mesure les pertes d'énergie ultrasonore sous forme de chaleur, est reliée, quant à elle, à l'intensité des forces de cohésion inter-cellulaire.

Jusqu'à présent, ce sont les procédés d'exploration séquentielle des plans de coupe échographique qui ont donné les résultats les plus exploitables par le médecin. Dans ces systèmes, l'emploi d'une sonde ultrasonore unique émettrice-réceptrice permet à chaque tir ultrasonore de réaliser l'image d'une ligne de l'objet, en tenant compte du temps d'arrivée et de l'intensité des échos. Actuellement, l'image ultrasonore ne révèle que les différences d'élasticité entre tissus, sans pour autant donner la valeur exacte de cette élasticité, ce qui impliquerait une connaissance rigoureuse de l'atténuation.

La qualité de ces images échographiques d'"élasticité" est évidemment liée aux caractéristiques du faisceau ultrasonore. La résolution axiale est excellente puisqu'elle est reliée à la durée de l'écho reçu car, aux fréquences ultrasonores les plus uti-

Mathias Fink, professeur à l'université de Paris VII, Groupe de physique de solides de l'Ecole normale supérieure (UA 17 CNRS), université de Paris VII, Tour 23, 2, place Jussieu, 75251 Paris Cedex 05.

linées, est de l'ordre de quelques longueurs d'onde. La résolution latérale, liée à la largeur du faisceau, dépend de la géométrie du transducteur utilisé. Pour augmenter la profondeur de focalisation, on a développé à partir de réseaux annulaires de transducteurs, une technique de zoom électronique ultrarapide. Pendant la phase d'émission, l'ensemble des anneaux est utilisé pour réaliser un faisceau incident relativement large. Ce n'est que pendant la phase de réception des échos qu'on synthétise une ouverture focalisante qui trie parmi tous les échos ceux qui proviennent de l'axe du transducteur.

Le procédé le plus naturel pour réaliser cette ouverture localisante consiste à utiliser derrière les transducteurs du réseau annulaire un ensemble de lignes à retard électronique. La loi de retard doit être adaptée à chaque instant à celle des fronts d'onde sphériques réfléchis par les cibles observées (fig. 1).

À côté des sondes à symétrie annulaire, on a cherché à développer des sondes échographiques à partir de barrettes de transducteurs. De telles sondes comprennent typiquement 128 transducteurs. Une commutation électronique rapide permet d'atteindre une cadence d'images élevée. On synthétise une ouverture focalisante en regroupant un certain nombre des transducteurs à travers des lignes à retard, et on décale progressivement cette ouverture le long de la barrette. Les images les plus intéressantes sont obtenues lorsqu'on maintient un nombre d'ouverture N constant de l'ordre de deux sur toute la profondeur d'exploration (fig. 2).

La qualité de l'image échographique a continuellement évolué depuis une dizaine d'années grâce à l'utilisation d'ouvertures localisantes de plus grande dimension. Il reste cependant à l'imagerie ultrasonore plusieurs étapes à franchir pour atteindre véritablement son stade de maturité. Les images échographiques sont toujours entachées d'un très fort bruit de speckle acoustique qui se manifeste sous la forme d'une image très granitée de la plupart des organes. Ce bruit échographique résulte des interférences entre tous les échos des petits diffuseurs situés dans les tissus. La cohérence spatiale des faisceaux ultrasonores générés par les sondes piézoélectriques rend ce phénomène inévitable. Curieusement, cette cohérence du champ, si facile à obtenir en acoustique relativement à l'optique, se révèle être une sérieuse limitation dans l'imagerie des organes riches en diffuseurs.

Les images échographiques sont souvent distordues par les effets de réfraction qui affectent la propagation rectiligne des ultrasons à l'interface entre tissus de célérité différente. En outre, les fluctuations de célérité à petite échelle, qui sont présentes dans les milieux riches en inhomogénéités acoustiques, perturbent l'efficacité des procédés de focalisation à grande ouverture.

Enfin, les images échographiques actuelles sont qualitatives. Elles ne révèlent que les différences d'élasticité entre tissus. Pour obtenir une cartographie quantitative de l'élasticité, il faudrait dans un premier temps obtenir la carte de l'atténuation

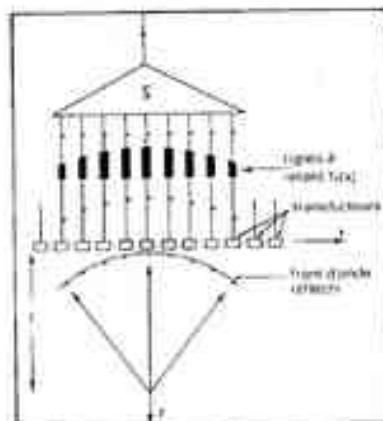


Fig. 1



Fig. 2

ultrasoore. Une telle carte présente pour le médecin un intérêt majeur, aussi bien pour quantifier le taux d'hétérogénéité des tissus que l'amplitude des forces inter-cellulaires. Une correction rigoureuse des effets de l'atténuation permettrait alors, en mesurant la valeur absolue des échos d'interfaces, de calculer la valeur de l'impédance acoustique et donc l'élasticité des tissus. L'approche actuellement la plus utilisée pour mesurer l'atténuation en mode échographique consiste à s'intéresser non pas aux échos d'interfaces mais au bruit échographique provenant des petits diffuseurs.

Ces techniques d'analyse spectrale instantanée permettent en suivant l'évolution spectrale du bruit échographique avec le temps (temps = profondeur) de mesurer l'atténuation locale. Ce sont cependant des mesures qui, pour converger vers une valeur non biaisée de l'atténuation, nécessitent de moyenniser de nombreuses lignes échographiques décorréliées. Le volume élémentaire de tissu sur lequel on peut mesurer proprement l'atténuation est de l'ordre du centimètre cube. Pour diminuer cette cellule de résolution d'un facteur significatif, la recherche actuelle s'oriente vers l'utilisation de transducteurs incohérents du même type que ceux destinés à réduire le speckle.

Fig. 1 - Les lignes à retard appliquent derrière chaque anneau transducteur une correction de retard, de telle sorte que les signaux délivrés par tous les transducteurs sont remis en phase avant d'être additionnés.

Fig. 2 - Image échographique de la tête d'un fœtus de 20 semaines (d'après Acunon).

LE RADAR ET LE GÉOÏDE MARIN

Michel Lefebvre, Anny Cazenave

Le radar altimètre permet de déterminer la surface de l'océan avec une précision centimétrique. A partir de cette surface, on peut entreprendre des recherches en géophysique interne et l'étude de la circulation océanique à l'échelle globale.

Les recherches sur l'océan vont faire un bond en avant dans les quinze prochaines années. Deux raisons à ce progrès : l'apparition de calculateurs puissants permettant la mise en œuvre de modèles de circulation océanique ;

l'utilisation de techniques spatiales pour observer l'océan. Bien que ces techniques observent principalement la surface, elles ont l'avantage de couvrir l'ensemble de l'océan — 70 % de la terre — en peu de temps, avec une résolution inégalée permettant ainsi une couverture fréquente.

Parmi ces techniques, les instruments hyperfréquences actifs sont les plus prometteurs car ils opèrent par définition sans contrainte météorologique.

Ces techniques ont été utilisées sur le satellite préatoire de la NASA, SEASAT, la charge utile de SEASAT comprenait entre autres un radar à synthèse d'ouverture (imagerie), un diffusionomètre (mesure du vent) et un radar altimètre.

Les illustrations ci-jointes présentent quelques résultats obtenus avec le radar altimètre. Le principe en est donné dans le cliché n° 1 : le radar altimètre mesure la distance entre le satellite et la surface de l'océan après réflexion à la verticale de celui-ci. La précision de mesure est de 10 centimètres actuellement, et sera de quelques centimètres pour les futures missions altimétriques. Si l'on connaît la trajectoire du satellite il est possible de cartographier la surface de l'océan. Celle-ci est en première approximation assimilable au géoïde marin. Les "trous et les bosses" de ce géoïde marin sont liés à la structure interne de la terre.

Michel Lefebvre, ingénieur au CNES, unité mixte du CNRS "mouette" (UM 39 CNRS), 18, avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse Cedex.

Anny Cazenave, ingénieur au CNES, Groupe de recherche de géodésie spatiale (GRGS), équipe de recherche "dynamique terrestre et planétaire" (ER 234 du CNRS), 18, avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse Cedex.



Fig. 1

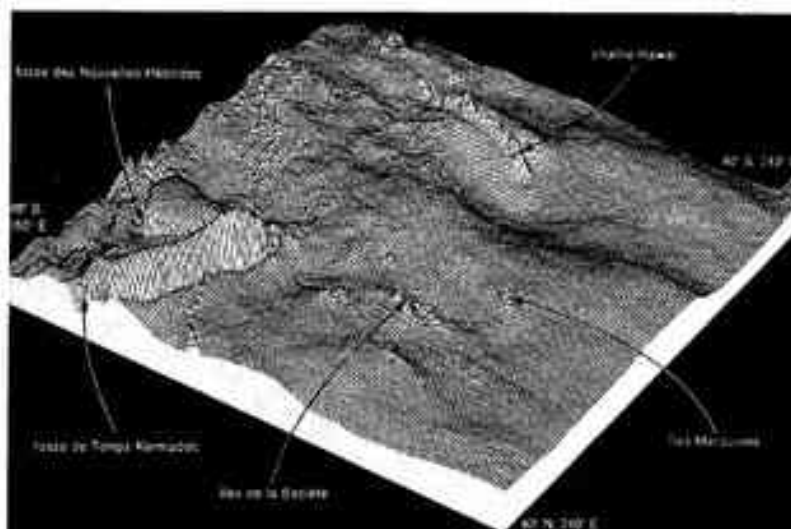


Fig. 2

La figure 2 donne quelques exemples du géoïde marin sur l'océan Pacifique. Les écarts par rapport à une surface de référence sont de 1 à 20 mètres (les plus grandes longueurs d'onde sont ici filtrées). On remarque la signature en surface des zones de fracture, des zones de subduction, des montagnes sous-marines. La figure 3 présente ces ondulations sous forme de courbes de niveau à l'échelle du globe : en jaune et rouge sont représentées les bosses de la surface marine, en vert et bleu les creux de dénivellation, 15-20 mètres environ. Ces signatures sont liées à des variations de densité dans le manteau de la terre liées à différents phénomènes dont la convection. Superposées au géoïde marin, les variations du niveau de l'océan sont dues aux phénomènes océaniques dont l'amplitude est de 10 centimètres à 2 mètres. La figure 4 donne une représentation de la marée lunaire M2 dans l'océan Indien

Fig. 1 - Le satellite Topex/Poseidon qui doit être réalisé en coopération franco-américaine est équipé d'altimètres et de systèmes de positionnement. Sa mission est la détermination de la circulation océanique.

Fig. 2 - Chaque structure du fond marin produit une signature caractéristique dans le champ de gravité, donc sur le géoïde. Cette carte des hauteurs du géoïde représente le Pacifique central et a été réalisée grâce au satellite altimétrique Seasat. Les très grandes ondulations du géoïde supérieures à 4 000 km ont été filtrées. On reconnaît très bien plusieurs chaînes volcaniques marines telles Hawaï en haut de la figure, la chaîne des îles Australes et de la Société vers le bas de la figure, associées à des bombements du géoïde. La zone de subduction de Tonga-Kermadec et celle des Nouvelles Hébrides sont nettement marquées à gauche de la figure par des dépressions du géoïde d'une amplitude de moins 20 m sur une distance de 200 à 300 km.

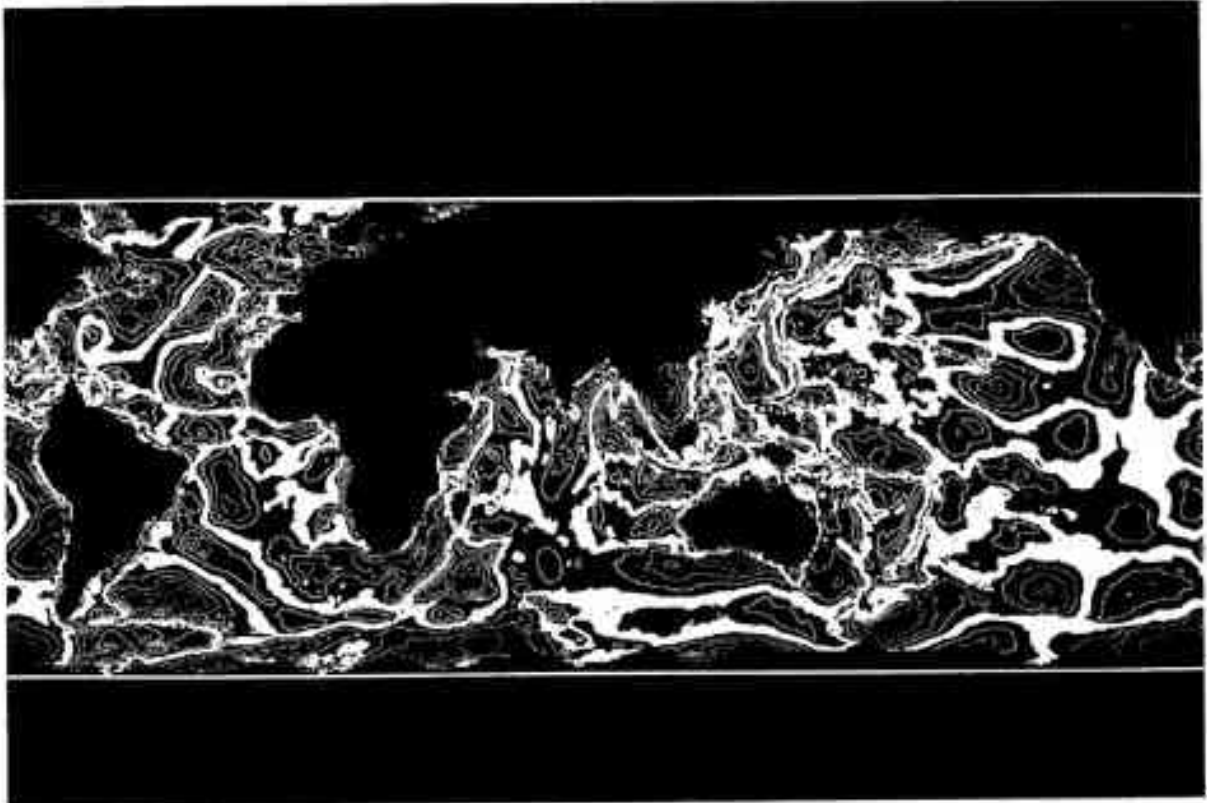


Fig. 3

Fig. 3 - Hauteurs de la surface de l'océan après filtrage. On distingue les zones négatives en bleu-vert et les zones positives en rouge. L'amplitude est de plus ou moins 10 mètres. Ces ondulations reflètent la convection dans le manteau de la terre.

Fig. 4 - Représentation de la hauteur de la marée lunaire M2 dans l'océan Indien. Les lignes de phase égale sont visualisées en fausse couleur – les contours sont représentés tous les vingt centimètres. On distingue les 4 points amphidromiques (points où l'amplitude de la marée est nulle).

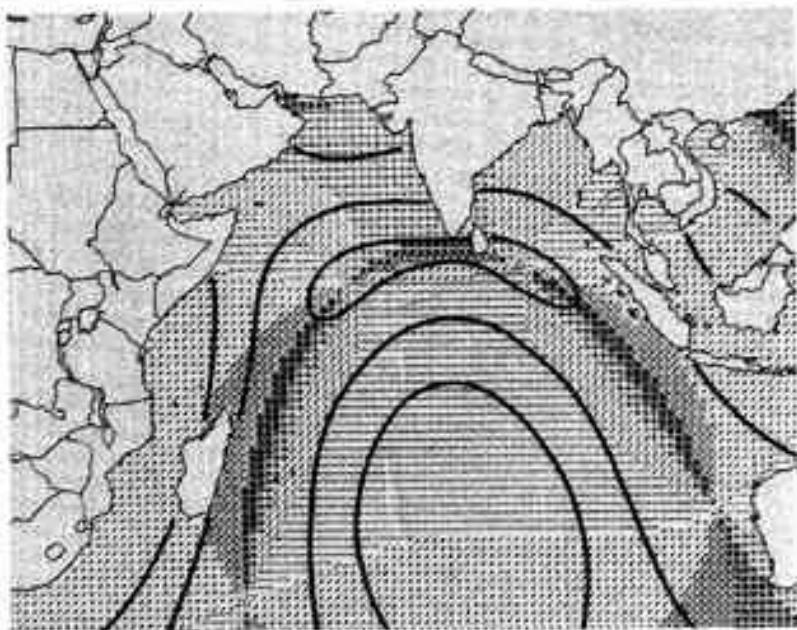


Fig. 4

Fig. 5 - Variabilité du courant dans la zone périan-tarctique mesurée à partir des pentes de la surface océanique. On distingue très nettement, avec un mois de mesures, les cellules de variabilité liées à une activité intense des tourbillons.



Fig. 5

calculée à partir de mesures altimétriques. On remarque les 4 points amphidromiques (marée nulle) : les contours sont donnés avec un maillage de 20 centimètres (amplitude de 60 centimètres au centre) et les lignes de phase égale sont données en vert et rouge. Cette carte de marée a été réalisée à partir de seulement trois semaines de mesures.

Outre la marée, on peut mettre en évidence les variations du niveau de l'océan dues à la circulation océanique. La figure 5 met en évidence la variabilité du courant périan-tarctique (toujours calculée avec trois semaines de mesures altimé-

triques du satellite SEASAT). On voit en rouge les cellules de variabilité du courant périan-tarctique. L'amplitude des variations étant de quelques décimètres.

Ces exemples limités montrent le potentiel des mesures obtenues par les techniques spatiales. Dans la décennie 1990-2000, des progrès majeurs seront rendus possibles dans la détermination de la circulation océanique dont l'influence sur le climat est bien connue mais qui doit être quantifiée. Les observations serviront de contraintes aux modèles en cours de développement. On passera de la compréhension à la prévision.

L'image : l'acquérir, la produire.

LA TÉLÉDÉTECTION DANS LE VISIBLE ET LE PROCHE INFRA-ROUGE EN GÉOGRAPHIE

Fernand Verger

Pour étudier les ressources terrestres par télédétection, les géographes tirent profit du large éventail des bandes spectrales utilisables comme de la gamme étendue des résolutions spatiales. La répétitivité des données satellitaires leur permet en outre de suivre les évolutions.

Parmi les bandes spectrales employées en télédétection, les géographes utilisent tout particulièrement deux d'entre elles : celle du visible comprise entre 0,4 micromètre et 0,7 micromètre et celle du proche infra-rouge de 0,7 à 1,5 micromètre, même s'ils ont parfois recours aussi à l'infra-rouge thermique et au domaine des micro-ondes.

Cette préférence tient à plusieurs raisons :

- raisons instrumentales : les capteurs les plus nombreux et les émulsions photographiques les plus courantes sont sensibles à ces bandes spectrales ;

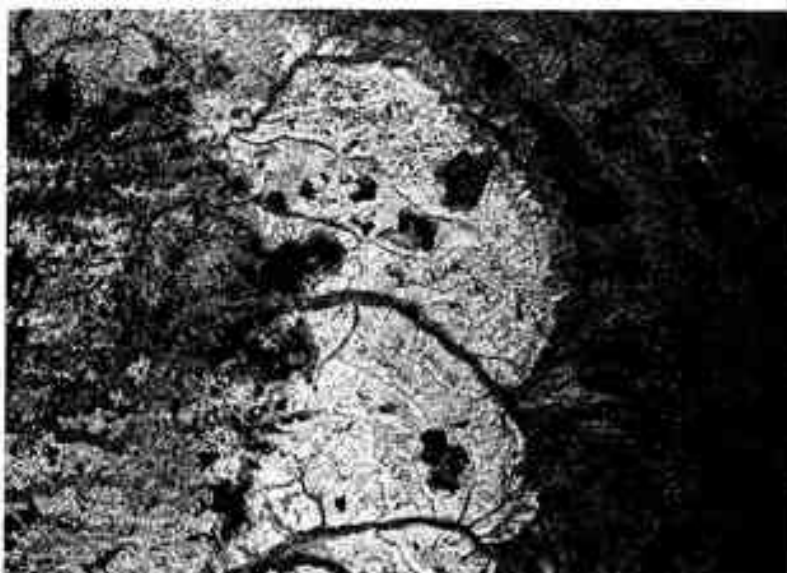
- raisons de familiarité : les habitudes de la perception visuelle nous ont rendu intelligibles les couleurs des étendues géographiques ; c'est ainsi que le caractère plus ou moins verdoyant d'un paysage est une notation descriptive très fréquente ;

- raisons de clarté d'interprétation : dans l'état actuel des techniques, la signification des menues dans ce domaine spectral est à la fois riche, diverse et assez claire. C'est ainsi que les bandes spectrales d'un des capteurs multibandes les plus utilisés par notre discipline — le Thematic Mapper qui équipe les satellites Landsat 4 et 5 — sont significatives dans les domaines suivants :

Canal 1 : 0,45 - 0,52 μm : cartographie des eaux littorales, turbidité, bathymétrie, critères de différenciation des feuillets et des conifères.

Canal 2 : 0,52 - 0,60 μm : réflectance de la végétation à forte activité chlorophyllienne.

Fernand Verger, professeur à l'École normale supérieure, directeur d'IMAGEO (LP 30 du CNRS), Centre de géographie, 191, rue Saint-Jacques, 75005 Paris.



Canal 3 : 0,63 - 0,69 μm : absorption par la chlorophylle assurant la différenciation des différentes espèces.

Canal 4 : 0,76 - 0,90 μm : quantification de la biomasse, délimitation des surfaces d'eau. Bien que l'œil humain ne soit pas sensible à cette bande spectrale, son emploi est très général par suite de la qualité du signal — faible diffusion atmosphérique — et de la richesse de sa signification. C'est le mésophylle¹ qui réfléchit le rayonnement ; ainsi le blé est-il ici moins réfléchant que la pomme de terre.

L'image reproduite ci-contre illustre l'utilisation des bandes spectrales 0,5 - 0,6 μm , 0,6 - 0,7 μm et 0,8 - 1,1 μm dans une synthèse colorée obtenue à partir de données du capteur MSS du satellite Landsat 1. Les mesures recueillies dans ces trois bandes ont été traduites respectivement en jaune, en rouge magenta et en bleu cyan.

Cette image acquise à la fin du mois de mars fait apparaître nettement la variété des paysages représentés. De l'Ouest vers l'Est, on reconnaît le plateau de Brie limité par la Côte de l'Île-de-France avec l'avancée boisée et brulée des feuillets démodés de la montagne de Reims. Au-delà s'étendent les terres blanches encore de la Champagne crayeuse. Trois taches importantes brunes y indiquent, du Nord au Sud, les savaris (terres incultes) et les bois des camps militaires de Suippes, de Mourmelon et de Mailly. Au-delà vers l'Est, ainsi que dans les vallées de l'Aisne et de la Marne, une végétation verte apparaît ici en rouge par suite de sa réflectance dans la bande de l'infra-rouge proche et de l'absorption dans les autres bandes spectrales utilisées.

L'interprétation des données acquises dans le visible et le proche infra-rouge apporte ici un tableau précis et contrasté des régions géographiques.



Données NASA : composition colorée IMAGEO.

(1) Mésophylle : tissu chlorophyllien.

LE LIDAR EMBARQUÉ

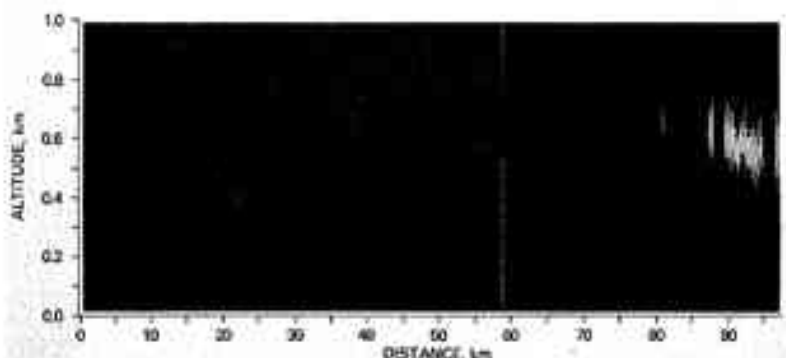
Gérard Mégie

Une nouvelle phase pour le LIDAR avec l'apparition de systèmes embarqués sur avion : une véritable image bi- et même tridimensionnelle des propriétés de l'atmosphère est ainsi obtenue.

Le lidar (Light detection and ranging) est un instrument de télédétection active qui permet, à partir de l'interaction entre la lumière émise par une source laser et le gaz atmosphérique, de mesurer, à distance et dans la profondeur de l'atmosphère, la distribution de certaines grandeurs caractéristiques, paramètres météorologiques ou constituants minoritaires, de l'environnement terrestre (1). L'utilisation de sources laser à impulsions et l'analyse à haute résolution temporelle des signaux reçus permettent en effet d'obtenir une résolution spatiale pouvant atteindre la dizaine de mètres le long de la ligne de visée. Plusieurs processus d'interaction lumière-matière sont aujourd'hui couramment utilisés — diffusion de Rayleigh par les molécules, diffusion de Mie par les particules, diffusion résonnante, diffusion Raman, absorption différentielle — auxquels correspondent différents types de sources laser : à fréquence fixe (Nd : Yag, Rubis, Excimère) ou accordables (lasers à colorant, alexandrite, CO₂...).

Utilisés depuis près de vingt ans pour des observations à partir du sol, les lidars sont aujourd'hui entrés dans une nouvelle phase de développement avec l'apparition de systèmes embarqués sur avion. Au lieu d'une simple coupe suivant la ligne de visée, telle qu'elle pouvait être obtenue à partir d'un point fixe, le mouvement de la source permet d'obtenir une véritable image bidimensionnelle (ou même tridimensionnelle si le système est muni d'une possibilité de balayage perpendiculairement au déplacement) des propriétés de l'atmosphère. En particulier, les principaux champs météorologiques (pression, température, humidité, vent, nuages) sont aujourd'hui mesurables par cette méthode, et le projet français LEANDRE (lidar embarqué aérosols nuages dynamique et rayonnement) sur l'avion de recherche atmosphérique et de télédétection permettra dès 1988 d'apporter une dimension nou-

Gérard Mégie, directeur de recherche au CNRS, directeur adjoint du Service d'aéronomie (BP 3501 du CNRS, Fort de Vaux, BP 3, 91371 Verrières-le-Buisson).



velle aux études de la basse atmosphère. Des expériences similaires ont déjà été conduites en coopération avec plusieurs équipes de la NASA et la figure illustre en termes d'« imagerie » les résultats ainsi obtenus.

Le système lidar est ici embarqué sur un avion volant à 4 kilomètres d'altitude et mesure de façon continue (résolutions horizontale et verticale de l'ordre de 10 mètres) la rétrodiffusion par les particules en suspension dans l'air. Celles-ci sont piégées dans la couche inférieure de l'atmosphère (couche limite) et leur observation permet ainsi de visualiser directement la morphologie de cette couche. La coupe verticale ainsi obtenue et dont l'extension horizontale est d'environ 100 kilomètres, correspond à un vol effectué à partir de la côte Est des États-Unis au-dessus de l'océan Atlantique (2). Elle met en évidence la croissance de la hauteur de la couche limite au

Sondage LIDAR aéroporté de la rétrodiffusion particulaire dans la couche limite planétaire mettant notamment en évidence les variations spatiales de la hauteur de cette couche. D'après Melfi et al. (2)

fur et à mesure que l'on s'éloigne de la côte, et permet de visualiser les différentes cellules de convection qui entraînent une modulation de l'altitude du sommet de la couche limite. L'analyse de ces « images » permet ainsi d'étudier sous un angle nouveau les processus d'échange de matière, de quantité de mouvement et d'énergie à l'interface entre le sol ou l'océan, et l'atmosphère.

(1) Voir article de Marie-Lise Châtin « Le LIDAR pour sonder l'atmosphère » dans le n°59 du Courrier du CNRS.

(2) Melfi et al., *J. of Applied Meteorology*, 24, 806-821, 1985.

L'ASTRONOMIE GAMMA

Gilbert Vedrenne

L'astronomie gamma est une composante récente de l'astronomie. Elle ne peut être abordée que par des moyens spatiaux car les rayons gamma sont absorbés par l'atmosphère terrestre.

Les rayons gamma peuvent être émis dans des situations astrophysiques extrêmes : températures très élevées (10^8 K et plus), présence de particules accélérées à de très hautes énergies (électrons ou protons). L'astronomie gamma s'adresse donc à des phénomènes violents dans l'univers se produisant par exemple dans les pulsars, les noyaux actifs de galaxies, le centre de notre galaxie. Sans les avoir encore identifiés, on a également détecté des sources émettant des bouffées de photons gamma. En outre, des émissions non localisées ont été mises en évidence. L'une d'entre elles, la composante diffuse gamma, a une origine extra galactique qui n'a pu, à ce jour, être précisée. Une autre composante gamma diffuse associée à l'émission du disque de la galaxie, a été révélée par les satellites SAS 2 et COS B. Elle résulte de l'interaction du rayonnement cosmique (constitué, pour une large part, de protons de très haute énergie) avec la matière interstellaire. Par ailleurs, on a pu détecter des émissions gamma monoénergétiques en direction des

régions centrales de la galaxie. L'une des raies observées (^{26}Al) a un rôle essentiel dans les théories de nucléosynthèse car la durée de vie de cet élément (10^6 ans) est courte par rapport à l'âge de la galaxie (10^{10} ans). Sa détection est donc une signature de la nucléosynthèse présente. De plus, la localisation des émissions peut être extrêmement précieuse pour mettre en évidence les sites de nucléosynthèse.

De nouvelles techniques d'observation dans l'espace

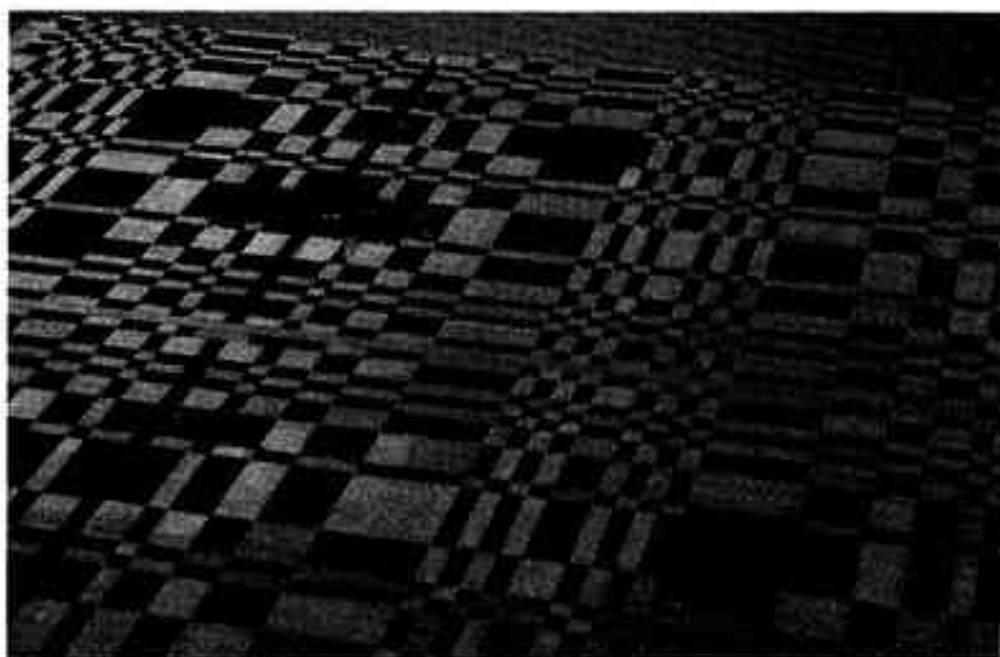
Les techniques d'observation dans ce domaine sont aussi originales. En effet, en astronomie gamma on ne peut utiliser la réflexion et la concentration des « rayons lumineux » au foyer d'un système comme cela est le cas avec un télescope. Les photons gamma sont trop énergétiques pour être défléchis. Le collecteur de photons est donc aussi le récepteur, celui-ci est utilisé depuis fort longtemps en physique nucléaire. Il s'agit souvent d'un scintillateur, c'est-à-dire d'un cristal qui, lorsqu'un photon gamma y dépose de l'énergie, est capable de transformer une partie de cette énergie d'excitation sous forme de lumière détectable par un photomultiplicateur qui la convertit en impulsion électrique. Un tel cristal peut donc détecter un photon gamma qui le traverse, mais il n'est en aucun cas capable à lui seul de restituer la direction d'arrivée du photon et donc d'isoler les photons gamma issus d'une source. Pour transformer un tel détecteur en télescope, il faut qu'il soit directif, et donc insensible à des photons parasites hors d'un champ de vue prédéterminé. On peut pour cela le plonger dans un blindage qui ne présente qu'une faible ouverture dans la direction que l'on veut observer ; mais

cette technique ne permet ni de localiser précisément les sources, ni d'obtenir leur image dans le champ observé.

SIGMA, un télescope dans l'espace

Aujourd'hui, des idées originales ont prévalu pour le développement de nouvelles générations de télescopes gamma. Ces idées reposent sur le principe simple et fort ancien de la caméra trou d'épingle. Sa généralisation permet d'envisager l'association d'un détecteur gamma classique de type scintillateur et d'un masque dont le motif n'est pas choisi au hasard et qui pour chaque direction d'une source gamma est capable de projeter sur le détecteur un motif caractéristique de la direction de la source. Il faut bien sûr pour identifier ce motif que le scintillateur-détecteur gamma ait une propriété supplémentaire : la capacité à reconnaître la position d'interaction de chaque photon gamma. Ce type de détecteur existe aujourd'hui, il a été largement utilisé dans les caméras gamma médicales. Le télescope SIGMA développé par le Centre d'étude spatiale des rayonnements et le Commissariat à l'énergie atomique, section d'astrophysique de Saclay repose sur ce type de détecteur. Cet instrument unique, qui sera le premier de ce type à être embarqué à bord d'un satellite soviétique en 1988 devrait permettre d'obtenir des images originales du ciel dans le domaine des rayonnements gamma.

Gilbert Vedrenne, professeur à l'université de Toulouse III, directeur du Centre d'études spatiales des rayonnements du CNRS (LP 8002 du CNRS), université de Toulouse III, 8, avenue Colonel-Roché, BP 4346, 31029 Toulouse Cedex.



Le masque codé est un dispositif qui est placé devant le détecteur de photons gamma. Ce masque projette sur le détecteur une ombre caractéristique de la direction d'arrivée des photons. L'ensemble détecteur-masque permet d'obtenir des images du ciel dans le domaine des photons gamma. (R. J. Deniau)

NATURE ET IMAGE : DE L'AQUARELLE AUX ÉLECTRONS

Yves Laissus, Marie-Thérèse Vénec-Peyré

De l'aquarelle au microscope à effet tunnel, que d'étapes franchies par les naturalistes dans la compréhension des phénomènes et par là-même, dans la diffusion des connaissances !

Ce n'est évidemment pas sans raison que l'histoire naturelle a été traditionnellement placée parmi les sciences « d'observation » : le naturaliste est homme du concret : chargé d'inventorier la nature, d'étudier toutes les productions de celle-ci jusque dans leurs structures et leurs mécanismes les plus intimes, il travaille sur des échantillons prélevés dans le monde qui l'entoure, sur des collections. Et faute de pouvoir transporter, conserver, manipuler dans son cabinet tous les spécimens dont il a besoin, il lui faut recourir à des représentations, à des images : le texte, pour lui, ne va pas sans la figure. Ce sont là aussi les seuls moyens de faire connaître les résultats de ses travaux.

De fait, le progrès des sciences naturelles est intimement lié à celui des images dont elles se servent. La valeur informative de ces images a été elle-même augmentée par un grand nombre de progrès techniques lesquels, tout en améliorant la qualité de la représentation ou en facilitant la diffusion, ont permis aussi une toujours plus grande accélération de l'observation. De l'enluminure des manuscrits médiévaux jusqu'aux plus récentes applications de la microphotographie, ces perfectionnements sont trop nombreux pour être énumérés ici : quelques-uns seulement des plus importants seront évoqués.

Pendant de nombreux siècles le dessin fut le seul mode d'illustration des sciences naturelles

D'abord, et pendant des siècles, l'œil du naturaliste est son seul instrument d'observation, un instrument physiologiquement limité et conditionné aussi par l'esprit de l'observateur. Le fameux rhinocéros dessiné en 1515 par Albrecht Dürer, qui porte entre les épaules une corne imaginaire, est un bon exemple de ce que l'œil ne voit point

Yves Laissus, conservateur en chef de la Bibliothèque centrale du Muséum national d'histoire naturelle, 38, rue Geoffroy-Saint-Hilaire, 75005 Paris.
Marie-Thérèse Vénec-Peyré, chargée de recherche au CNRS, Institut de paléontologie (UA 12 CNRS), 8, rue Buffon, 75005 Paris.



Fig. 1

mais croit voir, ou croit avoir vu. Au XIX^e siècle déjà, les ornithologues se sont étonnés que des animaux aussi communs dans nos campagnes que certains rapaces, d'ailleurs utilisés par la fauconnerie, aient été si longtemps mal représentés. Et plus près de nous, dans une conférence donnée vers 1900 aux futurs voyageurs-naturalistes, Ernest-Théodore Hamy, fondateur du Musée d'ethnographie du Trocadéro, s'indignait que, dans l'Atlas du voyage de Dumont d'Urville, on eût fait à un naturel de l'île Tonga Tabou la propre tête du roi Henri IV.

Pourtant, de grandes entreprises iconographiques sont mises en chantier à partir du XVII^e siècle. En France, Guy de la Brosse, premier intendant du « jardin royal des plantes » fondé à Paris en 1635, fait graver par Abraham Bosse près de quatre cents planches représentant les plantes les plus rares du jardin ; Louis XIV, conseillé par Colbert, décide de continuer la collection de peintures de fleurs et d'oiseaux sur vélin héritée de son oncle Gaston d'Orléans ; l'Académie royale des Sciences, peu après sa fondation en 1666, entreprend un gigantesque travail botanique dont il reste les trois cent dix-sept planches in-folio connues sous le nom de « Plantes du roi ». A Londres, après 1771, Sir Joseph Banks fait dessiner et graver sept cent trente-huit planches représentant les espèces botaniques récoltées pendant le premier voyage de Cook.

L'importance du document iconographique, aux siècles passés, est d'autant plus grande que le naturaliste — le plus souvent homme de cabinet, tel Buffon, Réaumur ou Bernard de Jussieu — n'a pas récolté lui-même les échantillons de la nature

qui font l'objet de son étude. Quel précieux recours, alors, qu'un dessin ou une aquarelle, pour se représenter mieux une plante séchée dans un herbier ou un poisson décoloré par l'esprit de vin ?

Certains naturalistes, surtout au XIX^e siècle (Cuvier, d'Orbigny, Milne-Edwards et bien d'autres) ont été de remarquables dessinateurs ; d'autres, moins doués, ont dû recourir à des artistes professionnels ; tous ont porté une attention de plus en plus grande au fil des décennies à la qualité des images réalisées par eux ou pour eux. Les très nombreux documents iconographiques ainsi accumulés sont le plus souvent d'une grande qualité esthétique ; ils ont acquis de ce fait un autre intérêt qui peut équivaloir, dépasser même, en tout cas prolonger dans le temps leur valeur proprement scientifique.

Pois la révolution technologique a multiplié les techniques d'observation et transformé l'imagerie scientifique.

L'apparition du microscope au XVII^e siècle, représente une étape importante dans l'exploration de la nature et sa représentation : en tout foi, entre autres exemples, le dessin des globules de la levure de bière publiés en 1685 par Antoni Van Leeuwenhoek, et plus tard celui du grain d'acier figuré par Réaumur en 1722. Les perfectionnements ultérieurs de ce nouvel instrument (contraste de phase, fluorescence, fond noir, contraste interférentiel, polarisation, etc...) procurent une moisson d'images complètement nouvelles mais parfois aussi fascinantes sur le plan purement esthétique que celles qui les ont précédées : qu'on songe seulement aux *Kunstformen der Natur* publiées par Haeckel en 1899.

Entre-temps, événement majeur, la photographie a fait dans notre société occidentale une apparition spectaculaire, suivie de progrès très rapides. Les naturalistes ont saisi, d'emblée, tout ce que cette nouvelle technique pouvait leur apporter ;

Fig. 1. Tortue, dessin à la plume rehaussé à l'aquarelle, exécuté par le Père Louis Feuillée (1680-1732) pendant son voyage le long des côtes du Chili et du Pérou en 1709 et 1710 (Bibliothèque centrale du Muséum, Ms 35).

Fig. 2. Trois illustrations d'une même espèce de diatomée :

1. Dessin d'après N. Hustedt, 1859 (agrandi 1 000 fois).
2. Photographie au microscope optique en contraste de phase interférentiel, agrandi 500 fois (référé M. Ricard, Muséum national d'histoire naturelle - MNHN).
3. Photographie au microscope électronique à balayage, agrandi 2 500 fois (référé M. Ricard, MNHN).

Fig. 3. Dessin effectué par S. Ramón Cajal au début du siècle : copie d'une préparation traitée par le bleu de méthylène (coupe de cerveau de chat adulte). On distingue les corps cellulaires et les varicosités. © Cajal, *Histologie du système nerveux de l'homme et des vertébrés*, édition CNRS, Madrid, 1955.

Fig. 2-3

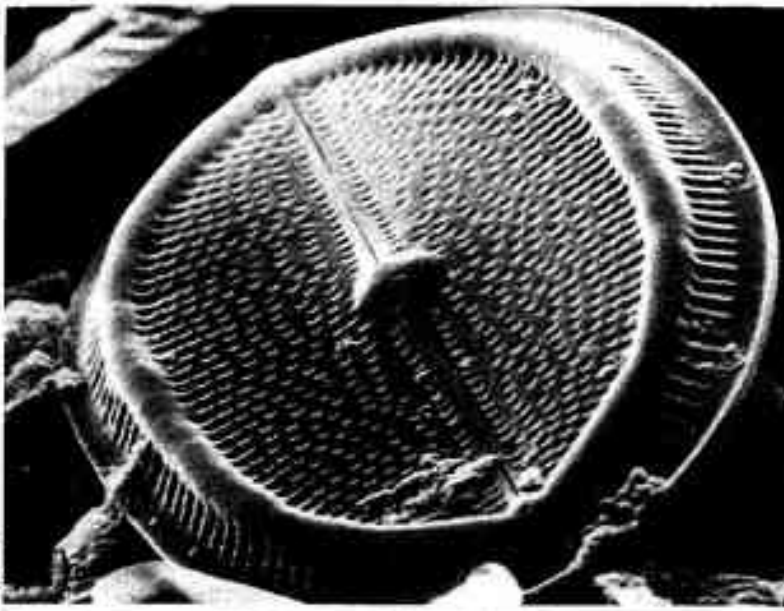


Fig. 3

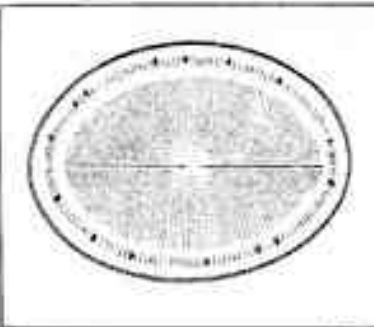


Fig. 2-1

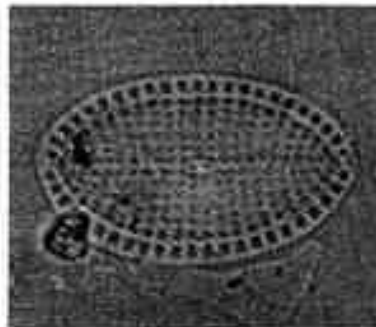


Fig. 2-2

Fig. 4 - Localisation par immunofluorescence indirecte de la synapsine sur des neurones en culture.
Après fixation des neurones par la paraformaldéhyde, la préparation est exposée à un anticorps anti-synapsine produit par un lapin. La synapsine est une protéine localisée au voisinage des réseaux synaptiques contenant les neurotransmetteurs. Pour visualiser l'anticorps fixé, on ajoute un second anticorps couplé à la rhodamine (marqueur fluorescent) et qui lui reconnaît spécifiquement les anticorps de lapin. La fluorescence du second anticorps est observée avec un microscope à fluorescence ($\times 400$). Noter le marquage dense au niveau des varicosités dans lesquelles se trouvent les vésicules.



Fig. 4

L'image : l'acquérir, la produire

dès 1853, Louis Rousseau et Philippe Potteau, du Muséum national, commencent la publication de la *Photographie zoologique*. A ce moment sont déjà parus les premiers dispositifs de prise de vues adaptés au microscope ; cette même année 1853, l'Académie des sciences confie à Henri-Miine Edwards, pour examen, une série de « photographies microscopiques » d'A. Bertsch qui comptent parmi les premiers essais de micrographie appliquée aux sciences naturelles.

Bientôt la réduction des temps de pose et la cadence plus rapide des prises de vues permet de décomposer le mouvement : le *lumiérophotographique* (1882) de Jules Marey, qui prend douze images par seconde, et son *chronophotographie* (1888) livrent aux zoologues, sans erreur possible, les différentes positions de l'oiseau en vol, du cheval au galop, etc... Le cinéma n'est pas loin : il en sera de même de la radiographie et de la ciné-radiographie.

L'irruption de la photographie dans un domaine où la main de l'artiste, jusque-là, était reine, a de quoi troubler même les bons esprits et l'hésitation, un temps, se fait jour, pimentée par quelques controverses où les « anciens », défenseurs du dessin, s'opposent aux « modernes » enthousiasmés par la photographie. Le débat, sans doute, n'est pas clos. Rapidement, toutefois, chacun des deux modes de représentation ayant montré, l'un par rapport à l'autre, ses avantages et ses limites, trouve la place qui est sienne. A la photographie, le soin de refléter la réalité, souvent foisonnante, de la nature ; au dessin, instrument analytique et didactique par excellence, celui de montrer tel détail spécifique dans l'attache d'une feuille ou les pièces buccales d'un insecte.

C'est surtout dans l'exploration et la connaissance du monde situé hors des frontières de la perception oculaire que la photographie s'est révélée un outil irremplaçable, car elle permet d'atteindre des domaines inaccessibles autrement.

Les progrès les plus spectaculaires dans l'icnographie scientifique — parce que concernant l'infiniment petit — restent sans conteste ceux que nous devons à la microscopie électronique, non seulement par l'extrême richesse des informations recueillies mais aussi par la qualité et la beauté des clichés micrographiques. Les microscopes électroniques, pouvant atteindre des grossissements de 100 000 et plus, ont décelé les structures et les constituants cellulaires au niveau macromoléculaire (microscopie électronique à transmission à basse et à très haute tension) ; révélé l'existence d'êtres inconnus et restitué les formes microscopiques dans leur aspect tridimensionnel (microscopie électronique à balayage) grâce à une profondeur de champ plus de 300 fois supérieure à celle du microscope optique. Ils ont révolutionné l'état des connaissances dans bien des disciplines des sciences de la vie comme des sciences de la terre. Au cours de ces investigations, le chercheur n'a plus le contact visuel direct avec le matériel examiné, il ne travaille que sur l'image que lui renvoie « l'optique électronique » ; le cliché obtenu n'est plus uniquement le véhicule de l'information, il en devient le seul détenteur accessible. Cette ascension vers la connaissance de l'infiniment petit se poursuit et l'apparition toute récente du microscope à effet tunnel, permettant des grossissements de 100 millions, constitue une révolution dans ce domaine.

L'une des préoccupations du naturaliste est également de resituer les objets qu'il étudie dans leur environnement, dans leur contexte spatio-temporel et ceci aux différentes échelles qui lui sont accessibles. Longtemps régional, ce cadre peut être actuellement considéré à l'échelle planétaire grâce aux progrès de la technologie spatiale. Mais le saut considérable vers l'infiniment grand fut franchi grâce à la photographie spatiale et à la télédétection aux multiples applications dans les sciences de la nature.

Mettant à profit les puissants moyens d'investigation et utilisant au mieux les progrès de l'imagerie, les naturalistes sont ainsi passés de l'aspect descriptif à la compréhension de bien des phénomènes. C'est encore l'icnographie qui leur fournit l'outil nécessaire à la transmission de l'information non seulement vers la communauté scientifique mais aussi vers le grand public. Le rôle de la photographie et de la cinématographie dans la diffusion et la vulgarisation naturaliste est considérable, si l'on en juge par l'abondance des clichés et des films concernant le monde vivant et son environnement.

Fig. 5 - Mise en évidence de la glutamate décarboxylase ou GAD par immunofluorescence dans des neurones en culture.

La GAD est une enzyme qui synthétise le GABA (neuro-médiateur inhibiteur). Pour ce marquage on utilise un anticorps anti-GAD (donné par le Dr. Tappaz), le second anticorps est couplé à la fluorescéine (marqueur fluorescent). Notez la fluorescence importante dans les corps cellulaires alors que les terminaisons restent peu marquées ($\times 400$).

Clichés des figures 4 et 5 : A. Demuis, M. Sobben, J. Boekaert, Centre CNRS-INSERM de pharmacologie, endocrinologie, UMR 6 CNRS, rue de la Cardonille, BP 5055, 34033 Montpellier Cedex.



Fig. 5

UN JARDIN EXTRAORDINAIRE

Jean François

Des modèles mathématiques permettent de représenter la structure, la géométrie et l'aspect d'un arbre et d'en simuler la croissance.

Et l'arbre tout entier est une pure fonction mathématique » écrivait Le Corbusier en observant ce mélange particulier de régularités et d'irrégularités de l'architecture des arbres. Dans les années 70, alors que Hallé, Oldeman et Tomlinson classaient les arbres en vingt-trois types architecturaux sur des bases qualitatives, Philippe De Reffye proposait un modèle mathématique macroscopique de croissance des plantes. Obtenus après observations et mesures de divers paramètres de croissance de caféiers, ce modèle s'est avéré indiqué pour tous les types

Jean François, professeur à l'université de Strasbourg I, Département d'Informatique, université de Strasbourg I, 7, rue René Descartes, 67084 Strasbourg cedex.

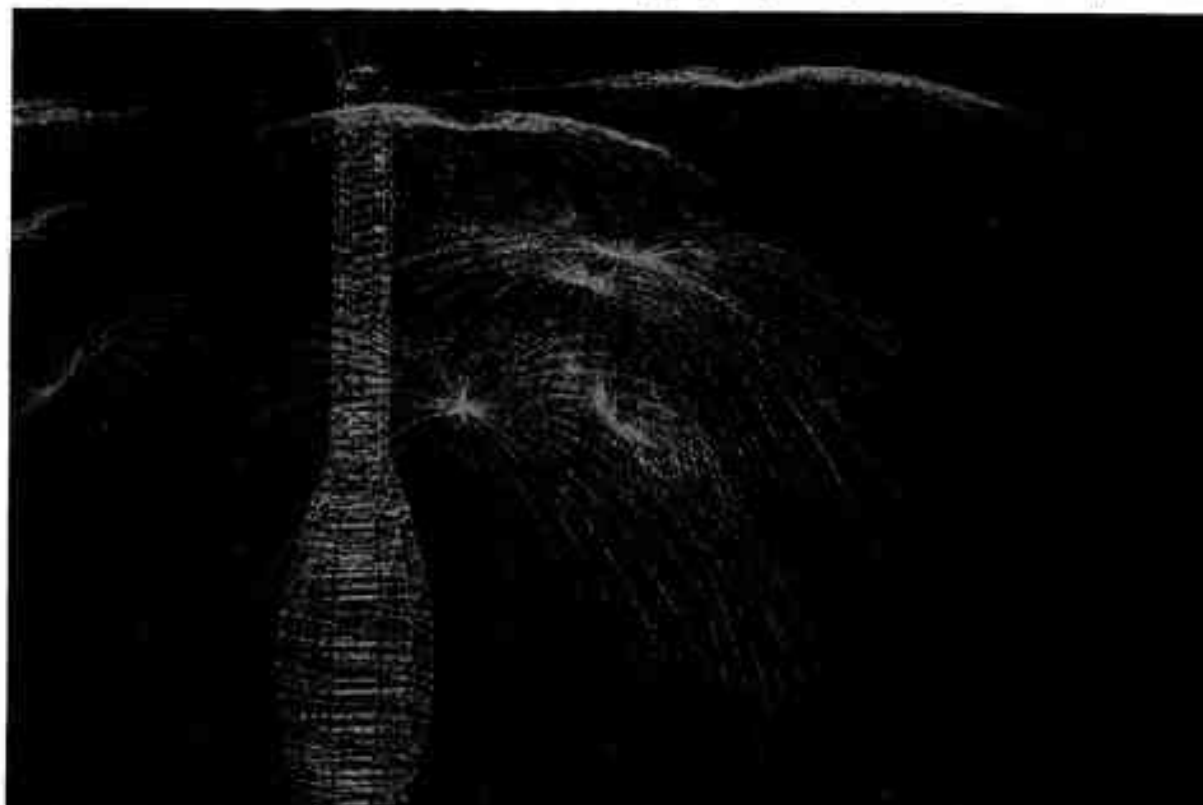
architecturaux d'arbres et bien d'autres plantes. Le Corbusier était bel et bien prophète.

Le modèle mathématique considère un entrenœud, muni de bourgeons et de feuilles, comme l'unité de base de la croissance. Il observe ce qu'il advient d'un bourgeon (plus exactement d'un méristème) : soit il produit un nouvel entrenœud, soit il produit une fleur ou une inflorescence, soit il meurt et ne produit rien. Un bourgeon apical produit un entrenœud sur le même axe que le précédent ; un bourgeon axillaire produit un entrenœud qui forme le début d'un nouvel axe. Ces différentes possibilités peuvent être affectées de probabilités qui dépendent de paramètres, comme l'âge de la plante, la position du bourgeon sur son entrenœud, la position de cet entrenœud sur son axe, la position de cet axe sur la plante... Le modèle considère les variables temporelles, essentiellement la durée de croissance d'un entrenœud et la durée de dormance d'un bourgeon, comme des variables aléatoires dépendant des mêmes paramètres. Les variables géométriques, comme la longueur et le diamètre des entrenœuds ainsi que les angles entre les axes et la divergence déterminant la phyllotaxie sont encore des variables aléatoires dépendant, grosso modo, des mêmes paramètres. Les lois de probabilité sont obtenues par des mesures sur le terrain.

A partir du modèle mathématique, la simulation de la croissance sur ordinateur s'impose, pour valider et développer le modèle, par l'importance des paramètres et des calculs. La visualisation des résultats sur un écran graphique de qualité

s'impose aussi pour que l'œil de l'expert, botaniste, agronome ou sylviculteur, puisse juger rapidement de la validité de la modélisation. Cette visualisation est considérablement améliorée par la prise en compte de phénomènes comme la flexion des axes sous l'action de la gravité ou la chute des branches mortes, et, bien entendu, par l'utilisation de méthodes informatiques et graphiques élaborées. Une dizaine de paramètres donne, pour certaines plantes, des résultats visuels acceptables ; avec une cinquantaine de paramètres et des mesures précises sur le terrain (ce qui a été fait pour certaines variétés de caféiers et de cotonniers) les résultats sont très satisfaisants. « Il est possible de calculer et de représenter une plante aussi bien qu'on en a le courage » dit Philippe de Reffye.

De la conjonction de travaux de botanique, de modélisation et de simulation de croissance, est né l'atelier de modélisation de l'architecture des plantes (AMAP), regroupant le laboratoire de modélisation du Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD), l'Institut de botanique de l'université des sciences et techniques du Langedoc (USTL) à Montpellier, l'équipe de synthèse d'image de l'Ecole normale supérieure et celle de l'université Louis Pasteur à Strasbourg. Ses recherches sont fondamentales tant en botanique qu'en modélisation mathématique et informatique. Ce type de modélisation et la simulation sur ordinateur constituent un outil tout à fait nouveau, donc à explorer, tant en botanique qu'en agronomie et sylviculture. Les applications dans



SYNTHÈSE D'IMAGES

Claude Puech

L'objectif de la synthèse d'images est la visualisation, de manière aussi réaliste que possible sur un écran graphique, d'une scène de l'espace à trois dimensions. Les exigences dans le rendu ou le "réalisme" des images produites dépendent à la fois du sujet traité et de l'objectif visé et l'on doit réaliser un bon compromis entre la richesse de l'image et sa facilité de compréhension.

Il est possible, de manière schématique, de distinguer trois grandes phases dans la "construction" d'une image de synthèse. La première phase est une modélisation de la scène que l'on veut représenter ; cette modélisation comprend des éléments géométriques (description de la surface des objets constituant la scène, position dans l'espace de ces objets) ainsi que des éléments physiques (caractéristiques physiques de la surface des objets, par exemple) qui permettront de calculer comment est perçue par l'œil l'interaction de la lumière (dont on précise par ailleurs les sources : position, couleur, puissance...) avec ces éléments. Une deuxième phase effectue des transformations (changements d'axes, perspective...) sur les objets de façon à déterminer ce qui est vu par l'œil de l'observateur sur l'écran. Une troisième phase, enfin, intègre les données relatives à la lumière et celles relatives à la géométrie pour calculer le "rendu" de la scène. En fait, la décomposition en phases distinctes n'a pas toujours de sens et il peut y avoir intersection entre les différentes phases, les calculs liés au rendu de l'image jet donc, en fin de compte, au calcul de la couleur de chacun des éléments, "pixels", de l'écran) devant, par exemple, dans certains cas, se faire dans l'espace à trois dimensions de la scène.

Claude Puech, professeur à l'École normale supérieure, directeur du Laboratoire d'informatique de l'École normale supérieure (JENS), 45, rue d'Ulm, 75230 Paris Cedex 05.

Nous décrivons ci-dessous les différentes phases de la réalisation d'images de synthèse réalistes, essentiellement d'images fixes ; les problèmes liés à l'animation, eux aussi très intéressants et sujets de recherches actifs, seront à peine évoqués. Nous terminerons en indiquant les nouvelles tendances de la recherche dans le domaine*.

Modélisation des scènes

Le premier problème qui se pose lorsqu'on veut représenter une scène sur un écran graphique est de la décrire de telle sorte que les traitements qui seront effectués lors des différentes étapes de la visualisation puissent l'être de manière efficace. L'étape de description géométrique des objets, qui est appelée traditionnellement phase de modélisation de la scène (des programmes qui permettent de la réaliser étaient, eux, appelés des *modèleurs*) pose deux problèmes : comment créer les objets, et comment les représenter dans la machine.

Pour créer des objets, il est possible :

- de fournir des coordonnées soit sous forme de nombres, soit plutôt par l'intermédiaire d'outils de saisie du type souris optique, table à digitaliser... Ce travail est, dès que les scènes sont un tant soit peu complexes, extrêmement lourd et requiert des utilisateurs entraînés à relever des cotes sur des plans précis (tracés à la main) posés sur une table ; la photo 1 donne une idée de la complexité du travail de saisie. Souvent aussi lorsque la scène peut être conçue ou modifiée lors de sa saisie, celle-ci se fait à l'aide d'outils interactifs qui peuvent permettre, par exemple, de poser ("à vue", c'est-à-dire approximativement) un objet sur une table.
- de reconstruire les objets à partir de mesures ; pour représenter des objets "réels", on peut repérer des points sur la surface de l'objet à partir de mesures faites, par exemple, à l'aide d'un rayon laser dirigé vers un plateau qui tourne et sur lequel est posé l'objet ; l'objectif est alors de reconstruire une approximation en trois dimensions de la surface de l'objet ; diverses méthodes ont été étudiées et implantées**. La saisie des données correspondant à la photo du discobole (photo 2) a été faite par des mesures de ce type ; la surface "définie" par les points mesurés a ensuite été habillée par des morceaux de surfaces paramétriques ("patches" bi-cubiques).
- d'utiliser des méthodes procédurales ; il s'agit là

de méthodes potentiellement très riches qui permettent de "coder" des objets complexes à l'aide d'un nombre extrêmement réduit de paramètres ; ces méthodes sont d'autant plus utiles dans le contexte de la synthèse d'images qu'elles sont plus "contrôlables" par l'utilisateur, c'est-à-dire qu'il est facile de maîtriser l'impact que peut avoir la modification des paramètres sur la forme de l'objet construit. De telles méthodes ont été utilisées pour construire des modèles géométriques de montagnes, en partant (par exemple) d'un triangle de base que l'on divise en quatre sous-triangles en joignant les milieux de ses trois côtés, que l'on déforme dans l'espace en déplaçant de manière aléatoire sur une verticale les trois milieux et dans lequel on continue à appliquer, pendant un certain temps, de manière récursive, la procédure de découpage que l'on vient de définir ; ce type de construction conduit à des surfaces ayant des caractéristiques proches de celles des surfaces fractales (en particulier, propriété d'auto-similarité : à différentes échelles, on voit des surfaces "semblables")*. D'autres méthodes, appelées *grammaires*, à base de grammaires formelles, ont permis à A.R. Smith de modéliser des plantes (SIGGRAPH 83, page 1). Ces méthodes pechent toutefois par leur manque de fidélité botanique et par la difficulté pour l'utilisateur de prévoir l'effet des différents paramètres, au contraire des méthodes développées, en France, par l'AMAP, à la suite d'une collaboration entre botanistes, agronomes et informaticiens (voir l'article de Jean-François dans ce numéro). Enfin, les systèmes de particules, introduits par Reeves (SIGGRAPH 83, page 359) permettent de modéliser, de façon procédurale, des phénomènes tels que feu, fumée... à l'aide de trajectoires "probabilistes" de particules soumises à certaines lois de vie et de mort. Notons que les méthodes procédurales ne servent pas seulement à créer des objets complexes du point de vue de leur structure géométrique dans l'espace, mais aussi, par exemple, des textures. Là aussi il est important de pouvoir réduire l'information nécessaire à la reconstitution d'une texture, et aussi de pouvoir mesurer expérimentalement un certain nombre de paramètres statistiques pour synthétiser les textures observées. La photo 3, réalisée à partir de travaux menés à l'INRIA par A. Gagalowicz, montre, par exemple, comment la texture de bois photographiée dans le quadrant en haut à gauche a pu être synthétisée, chacun des trois autres quadrants donnant le résultat de la synthèse par trois méthodes de type stochastique différentes. Un autre élément important qui distingue les différents *modèleurs* est la façon dont sont approximées les surfaces des objets représentés. La méthode la plus utilisée est l'approximation des surfaces par des polyèdres (voir photo 1) qui, le plus

* Pour approfondir le sujet, le lecteur pourra consulter (Reeves 83) qui est, à ce jour, le seul livre sur l'algorithmique qui traite de manière détaillée, en tirant compte des progrès récents, le sujet de cet article. On consultera également avec profit les actes des SIGGRAPH 83 (SIGGRAPH 83), SIGGRAPH 84, SIGGRAPH 85, SIGGRAPH 86) congrès internationaux organisés par l'ACM qui, avec les manifestations associées : cours, exposition... rassemblent chaque été, aux États-Unis, entre 20 000 et 25 000 personnes.

** Par exemple en France par Jean-Luc Delvenne et Yves d'Inès (actuel de la recherche d'algorithmique et d'automatique (ENEA) ou par Francis Schmitt du Laboratoire de l'École normale supérieure des télécommunications (ENST).

* Ces surfaces ont été popularisées, dans le domaine de l'image de synthèse par B. Mandelbrot (voir aussi l'article de P. Oppenheim SIGGRAPH 86, p. 35) pour la modélisation de plantes.



Photo 1 : © Thomson Digital Image (TDI)

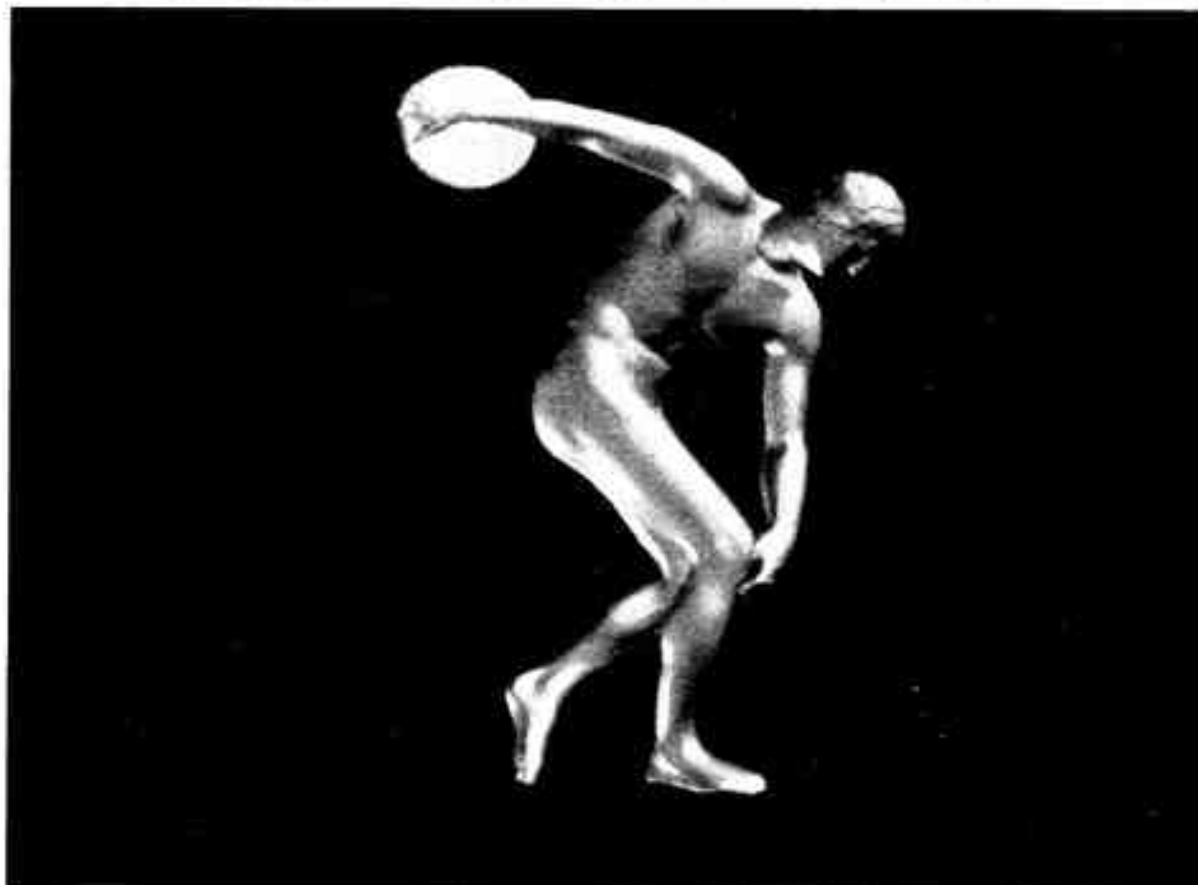


Photo 2 : © TFI

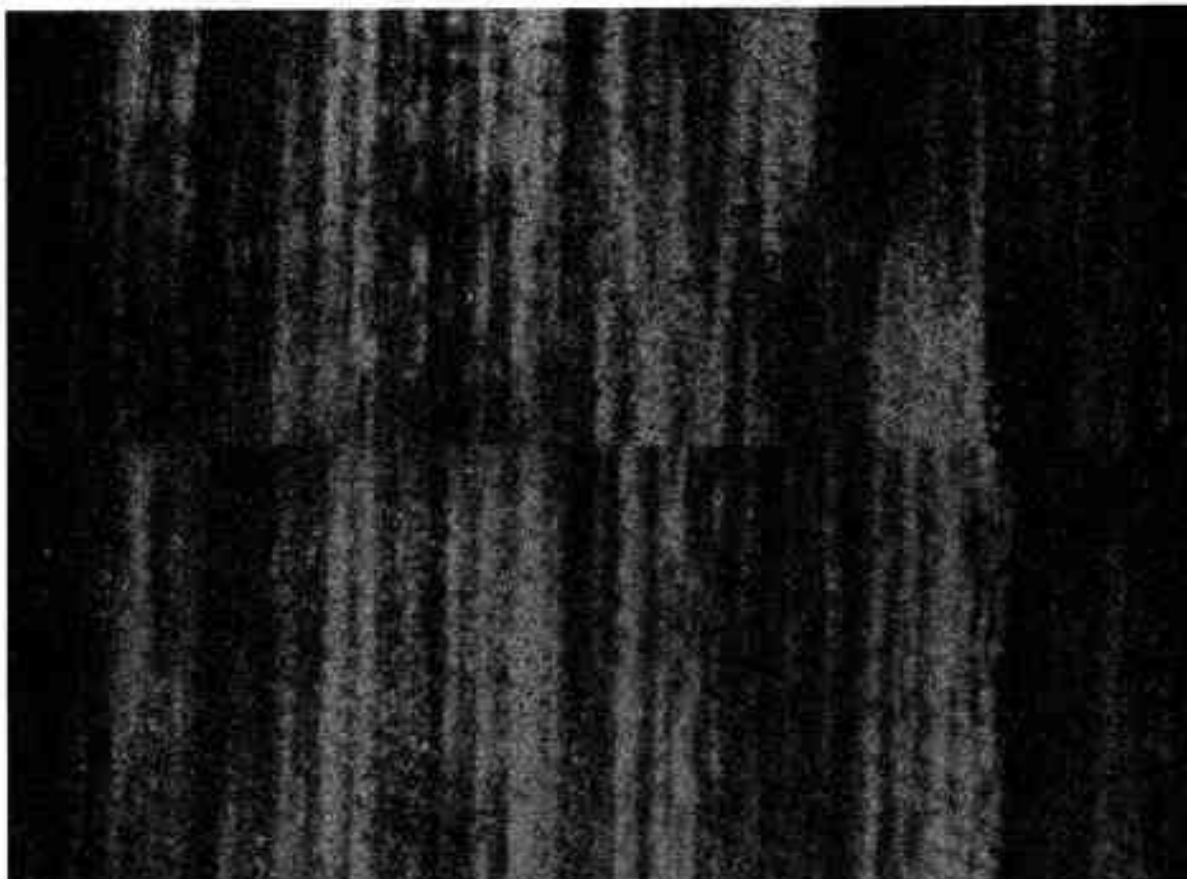


Photo 3 : © INRIA

souvent, sont stockés à l'aide de leurs faces polygonales (suites d'arêtes consécutives) et de relations de connexité entre faces. De nombreux algorithmes efficaces ont été développés qui utilisent de telles représentations mais, dans certains cas, l'approximation obtenue n'est pas très bonne lorsque le nombre de facettes reste raisonnable (les algorithmes de rendu utilisés couramment à l'heure actuelle savent traiter des scènes de plusieurs centaines, voire de quelques milliers de facettes mais pas beaucoup plus) ; il est facile de se convaincre, par exemple, qu'une sphère ne peut être correctement approchée par un polyèdre à facettes triangulaires que si ces facettes sont au nombre de plusieurs centaines.

Une "meilleure" approximation peut être obtenue en approchant la surface à modéliser par une surface dont on connait une paramétrisation "simple" par morceaux, ayant le degré de régularité souhaité (voir photo 2) : les "patches" ou carreaux de Bézier ou les B-splines, dont les représentations paramétriques sont des polynômes particuliers (que l'on prend, dans le cas des B-splines, le plus souvent de degré inférieur ou égal à 3, pour réaliser un compromis entre la richesse de la modélisation et la facilité de calcul) en sont les exemples les plus courants : un de leurs avantages importants est de pouvoir être définis "graphiquement" de manière interactive à partir de points de contrôle qui permettent, d'une part, la déformation (locale dans le cas des B-splines) de morceaux de surface et, d'autre part, une bonne prévision de la forme qu'aura le morceau associé à une famille de points de contrôle donnée. De telles modélisations ont surtout

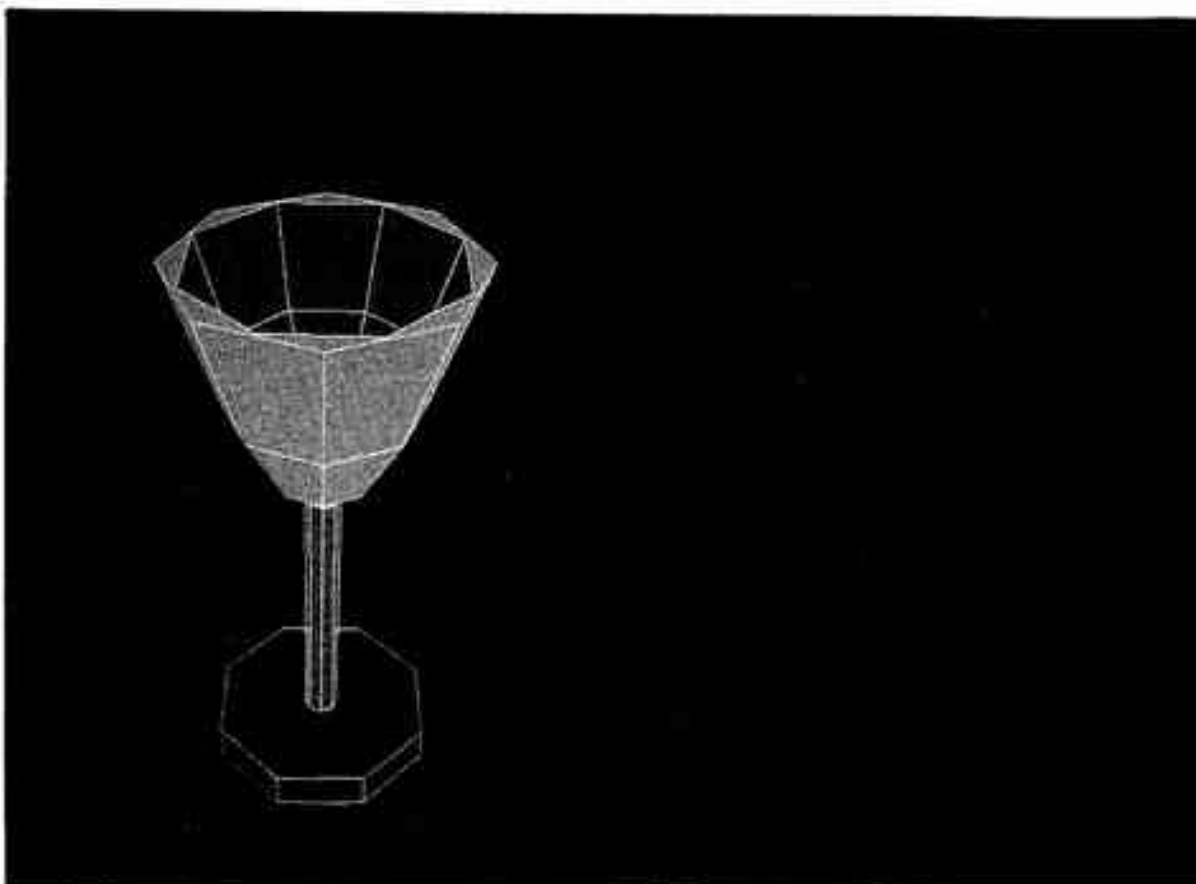
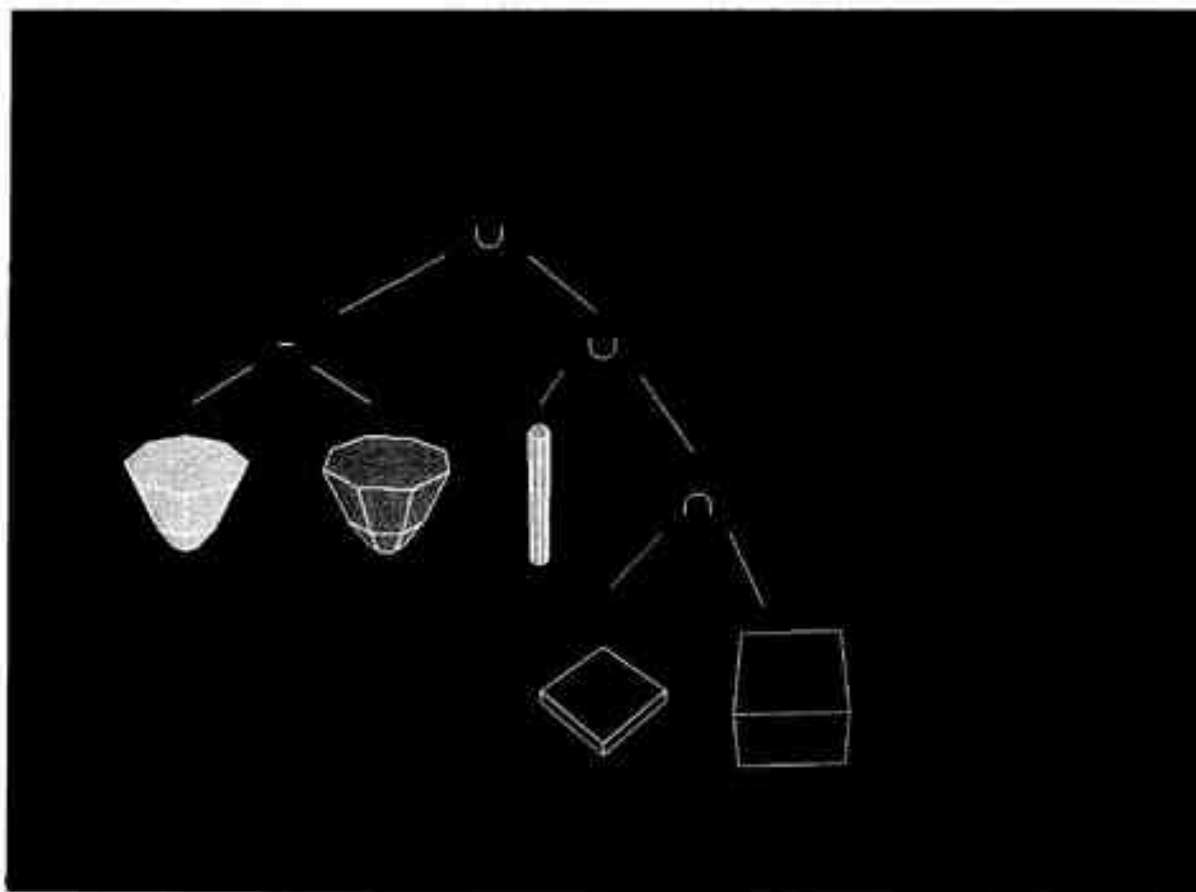
été utilisées jusqu'ici en CAO (conception assistée de carrosseries de voitures, par exemple) mais beaucoup moins en synthèse, car des algorithmes spécifiques de rendu sont ensuite nécessaires et pas toujours disponibles dans les logiciels généraux utilisés en production ; des projets se développent (à l'université d'Utah, États-Unis, par exemple), qui visent à réaliser des systèmes complets de synthèse travaillant sur des modélisations par surfaces splines. Enfin, une approche différente de la modélisation de scène illustrée sur les photos 4 et 5, est celle dite "Constructive Solid Geometry" (CSG). Dans cette modélisation, on dispose de formes primitives simples (cubes, sphères, cylindres...) que l'on peut dilater ou contracter et sur lesquels on peut faire des opérations ensemblistes (union, intersection, différence). Pour des objets complexes ce type de modélisation n'est pas toujours très naturel mais son intérêt d'un point de vue algorithmique est que l'on travaille le plus souvent sur des objets primitifs simples, même si l'objet résultant est complexe ; si, par exemple, on veut calculer l'intersection d'un rayon lumineux avec un polyèdre défini comme intersection de deux cubes, il n'est pas nécessaire de déterminer les faces de ce polyèdre ; il suffit (ce qui est très simple) de calculer l'intersection des segments communs au rayon et aux deux cubes ; on a, de la sorte, ramené le problème en dimension trois à un problème en dimension un. Certains algorithmes de rendu (celui du lancer de rayon qui sera décrit plus bas) se prêtent particulièrement bien à la modélisation CSG puisque les calculs les plus coûteux de cet algorithme peuvent s'effectuer à partir de calculs sur les objets primitifs lors d'un parcours de l'arbre.

Problèmes de nature géométrique rencontrés lors de la visualisation d'une scène

La scène modélisée dans l'espace à trois dimensions, à l'aide de méthodes exposées au paragraphe précédent doit ensuite être représentée en dimension deux sur l'écran de visualisation. Cela suppose que soient effectuées un certain nombre d'opérations géométriques. La position d'un repère lié à l'écran par rapport au repère "global" dans lequel sont données les coordonnées des éléments qui définissent la scène, la définition de la fenêtre écran dans le repère qui lui est lié, la position, enfin, de l'œil par rapport à cet écran, permettent à l'aide de transformations géométriques "classiques" (changement de coordonnées, perspective) de calculer la projection de la scène dans le plan de l'écran.

Il faut alors découper cette projection plane pour ne garder que ce qui est situé à l'intérieur de l'écran. Pour réaliser cette phase (appelée en anglais *clipping*), ce qui suppose que l'on sache déterminer rapidement si un point, un segment, un polygone est ou non dans le fenêtre que définit l'écran, un certain nombre d'algorithmes classiques sont connus dont certains, d'ailleurs, se prêtent bien à une implantation matérielle. Le problème qui se pose ici est un cas particulier du problème plus général du découpage d'un polygone par un autre (ici l'un des deux polygones, l'écran, est un rectangle aux côtés parallèles aux axes). Le cas d'une forme "générale" doit aussi être résolu efficacement, car il apparaît comme l'un des modules de certains algorithmes de faces cachées, par exemple.

La détermination des faces cachées est aussi l'une des phases importantes de nature géométrique, de



L'image : l'acquérir, la produire

la visualisation de scène. De nombreux algorithmes ont été développés, le choix dépendant de la nature et de la complexité de la scène (voir [Rogers 85]).

Rendu réaliste d'une image de synthèse

Pour obtenir des images que l'on puisse, de manière subjective, considérer comme réalistes, il convient d'"habiller" convenablement les objets, puis de faire jouer la lumière sur ces derniers.

L'habillage se fait par des textures qui sont soit mesurées puis plaquées sur l'objet, soit calculées à l'aide de modèles stochastiques (photo 3) que nous ne développerons pas ici. Les résultats les plus spectaculaires obtenus récemment l'ont été en utilisant des modèles stochastiques en dimension trois (textures 3D) dont on calcule la trace sur la surface de l'objet (photo 6) ; ces méthodes permettent de traiter de manière particulièrement élégante les problèmes de raccordement de textures de faces adjacentes.

Pour ce qui est de l'interaction entre la lumière et les objets d'une scène, les modèles couramment utilisés sont extrêmement simples : les caractéristiques physiques des sources lumineuses (et, bien sûr, leur position et leur "forme", le plus souvent ponctuelle) et des surfaces des objets étant connues, l'intensité lumineuse reçue par l'œil à partir d'un élément de surface se calcule comme la somme d'un terme ambiant, d'un terme correspondant à la réflexion diffuse et d'un terme correspondant à la réflexion spéculaire. Les lois de l'optique géométrique et des lois empiriques sont utilisées pour calculer ces différents termes pour chacune des couleurs de base : Rouge, Vert et Bleu. Les méthodes d'éclairage les plus élémentaires de ce type, méthode de Gouraud

et méthode de Phong (voir [Rogers 85]), donnent des résultats tout à fait satisfaisants dans les cas simples et sont d'un usage courant (les algorithmes correspondants sont même parfois codés).

La modélisation ci-dessus ne rend pas compte de phénomènes de réflexion sur des miroirs ou de réfraction. La méthode la plus connue qui simule ces phénomènes (voir photo 7) est la méthode du tracé de rayons ("ray-tracing"). Le principe de la méthode est simple et s'appuie sur le principe du retour inverse de la lumière : au lieu de suivre "tous" les rayons lumineux issus des sources de lumière, pour chacun des pixels de l'écran on construit le rayon défini par l'œil et ce pixel ; on détermine quel est le premier objet de la scène rencontré (il y en a) ; on détermine alors si le point d'intersection du rayon avec l'objet est directement éclairé par certaines des sources (ce qui permet de calculer la part correspondante de leurs contributions à l'éclairement du pixel) puis on suit, jusqu'à rencontrer un autre objet (ou une source de lumière), les rayons réfléchis et réfractés déterminés à l'aide des propriétés optiques de l'objet (il s'agit, en fait, des rayons dont le rayon initial est le rayon réfléchi ou réfracté) ; cette procédure récursive est appliquée aux rayons réfléchis et réfractés, et ainsi de suite jusqu'à une profondeur trois ou quatre le plus souvent. Les calculs (en particulier lors de la détermination des objets rencontrés par un rayon) sont considérables et le calcul d'images obtenues par la méthode du lancer de rayon demande le plus souvent plusieurs heures. De nombreuses variantes et diverses méthodes d'accélération ont été proposées (voir, par exemple : [SIGGRAPH 81] page 91, [SIG-

GRAPH 84] pages 119 et 137, [SIGGRAPH 85] page 269). La recherche dans le domaine est encore très active. Les méthodes précédentes ne modélisent pas les réflexions d'objet à objet entre surfaces diffuses et calculent donc de manière incorrecte l'éclairage global d'une scène. Une approche récente, celle de la méthode de radiance, due à D. Greenberg et à son équipe à Cornell, aux États-Unis (voir [SIGGRAPH 81] page 213, [SIGGRAPH 84] page 31, [SIGGRAPH 85] page 133) rend bien compte des effets dus à des sources de lumière diffuse de surface finie et des effets de couleurs "qui bavent" dus aux réflexions diffuses (voir photos 8 et 9). Cette méthode repose sur la loi fondamentale de conservation de l'énergie dans des systèmes fermés. Elle demande, pour être mise en œuvre, dans l'état actuel, une puissance de calcul très importante (plusieurs heures de calcul) mais on peut espérer que l'utilisation d'architectures matérielles adaptées réduira sensiblement les temps de calcul. Un de ses avantages (outre le réalisme de l'image) tient à ce que les calculs les plus coûteux sont liés à la géométrie globale de la scène et non au point de vue ou à l'éclairage : se déplacer dans la scène ou changer l'éclairage ne demande que des calculs très limités.

Evolution actuelle de la recherche en synthèse d'images

Au prix de temps de calcul parfois considérables, il est aujourd'hui possible de réaliser des images de synthèse tout à fait convaincantes. Il reste toutefois beaucoup à faire pour que l'image de synthèse soit un outil efficace de visualisation de phénomènes complexes ou de simulation au service des scientifiques ou des "graphistes".



Photo 6 : © TTX

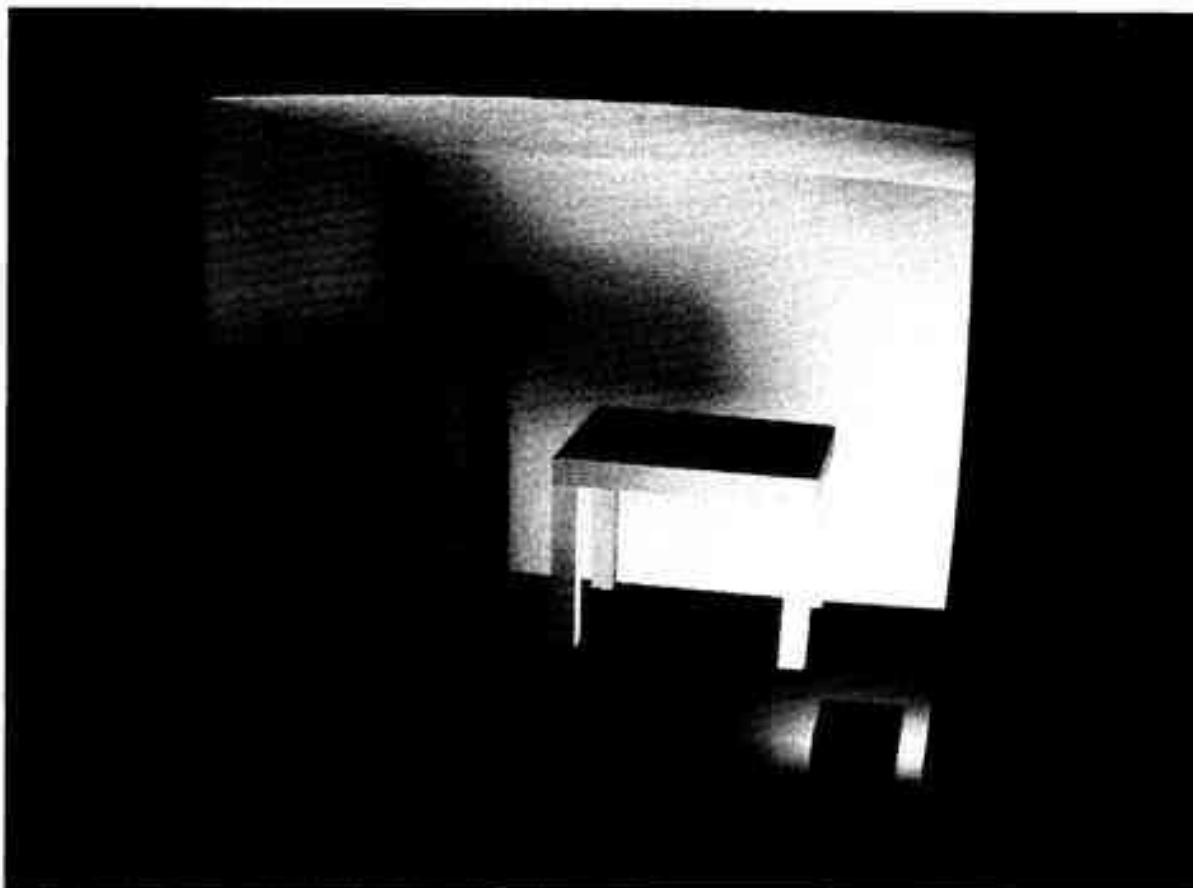


Photo 7 : © LEENS

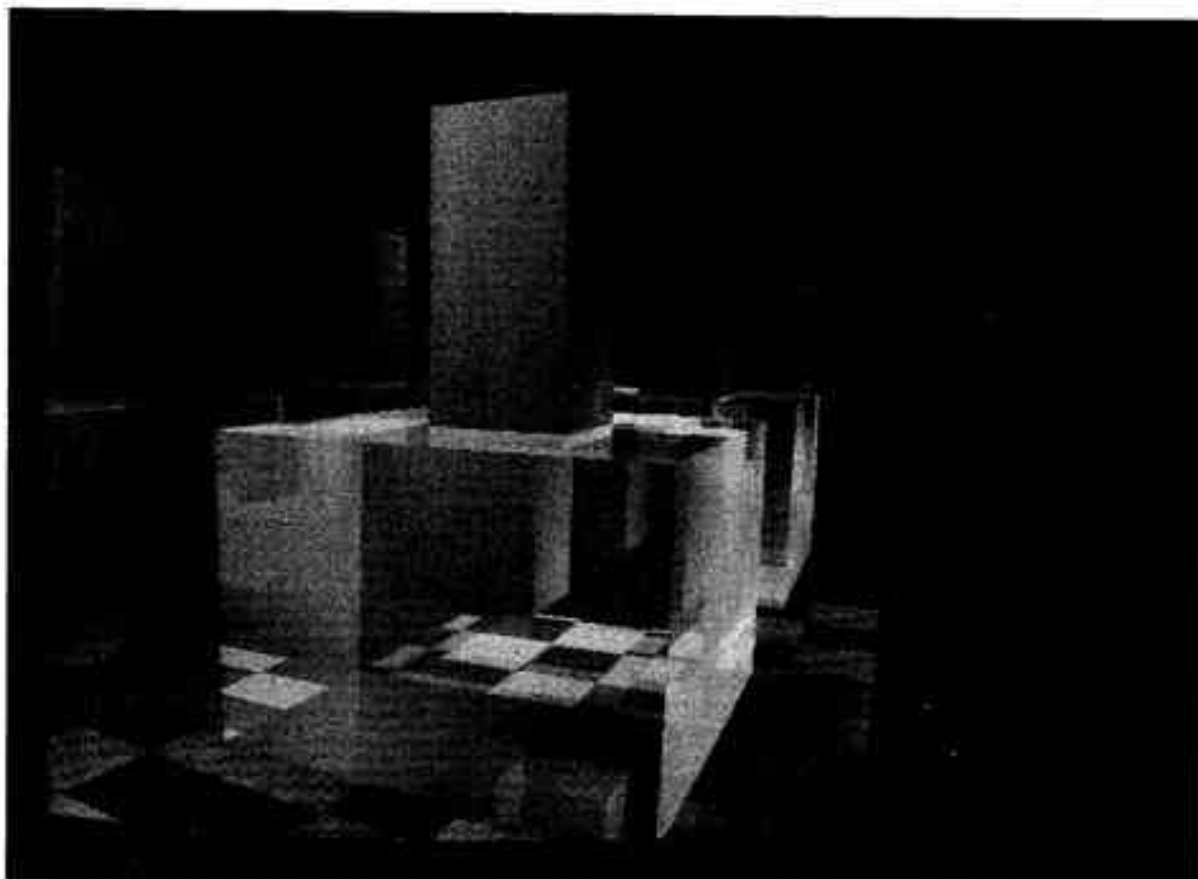


Photo 8 : © LEENS

L'image : l'acquérir, la produire

Un goulot d'étranglement important se situe au niveau de la puissance de calcul, puissance qui doit être sensiblement accrue pour permettre la représentation de scènes complexes avec un grand réalisme, ou "tout simplement" la réalisation d'une animation de plusieurs minutes (il faut calculer $25 \times 60 \times 10 = 15\,000$ images pour réaliser un film de dix minutes !) montrant un objet sous tous ses angles, en situation. L'évolution du matériel (voir l'article de Philippe Matherat, ci-dessous) se fait à la fois dans le sens de la conception de matériels spécifiques et de l'utilisation de processeurs vectoriels ou d'architectures parallèles relativement générales.

Sur le plan logiciel, une partie des efforts porte sur la création de modèles plus riches au niveau des modélisations acceptées et des propriétés modélisées (flamme ou contacts, par exemple), tels que la description puisse aussi contenir des informations sur les méthodes de rendu (ou même puisse permettre au système de choisir une méthode de rendu adaptée pour chaque élément d'une scène). Une

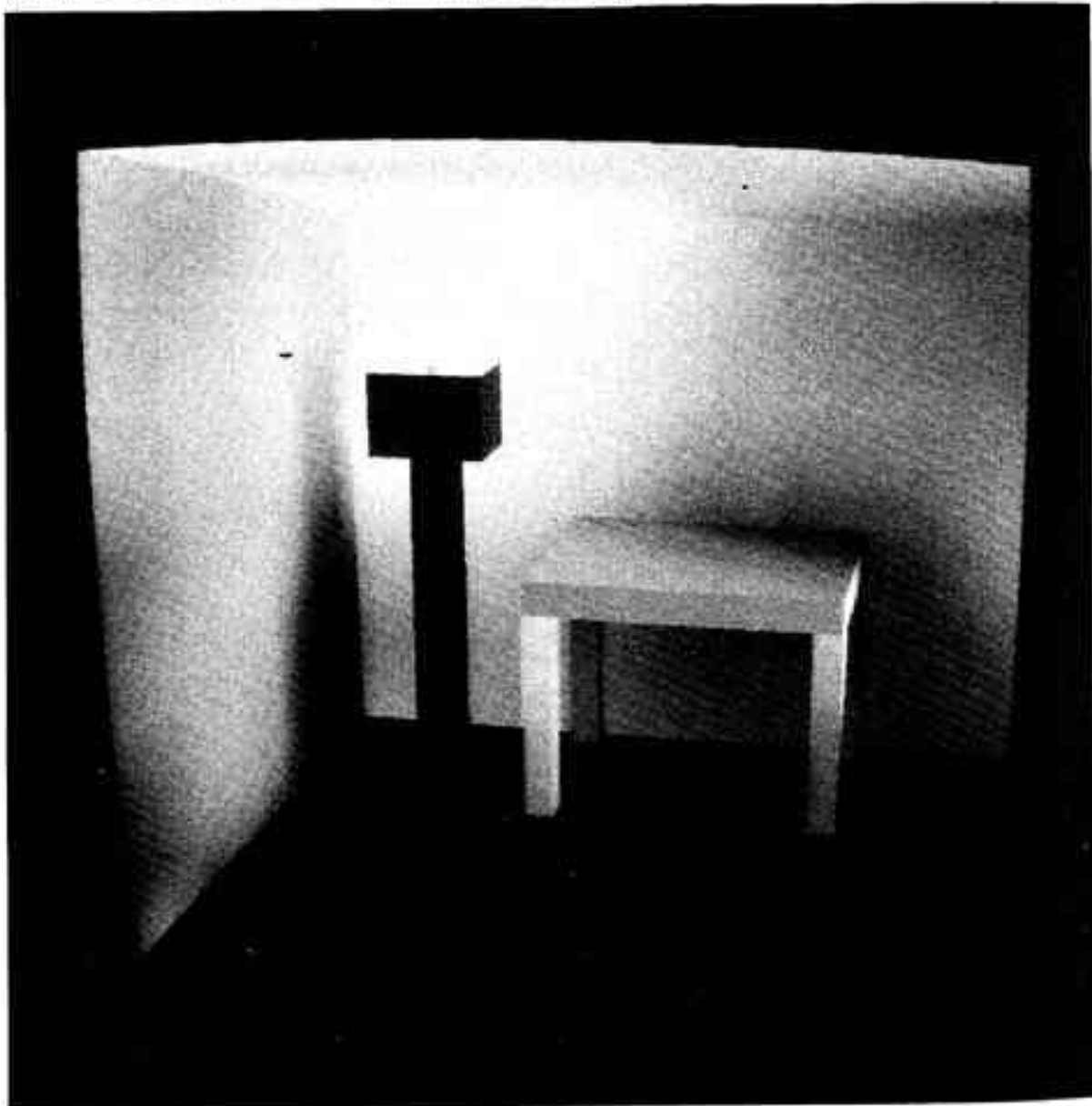
autre direction de recherches vis à utiliser des modèles plus riches en "contenu" physique, biologique, botanique... des objets ou phénomènes que l'on représente et à confronter ces modèles aux performances des algorithmes de visualisation associés. L'objectif n'est pas ici de choisir le modèle le plus riche mais de réaliser le meilleur compromis entre le réalisme du modèle visualisé et le temps de calcul de l'image.

L'industrie de l'image de synthèse est encore toute jeune. Sa demande en modèles nouveaux et en algorithmes puissants est énorme et stimule une recherche extrêmement vivante aux États-Unis, au Japon et en Europe depuis peu. L'évolution très rapide de ces dernières années laisse prévoir la disponibilité rapide de stations de travail peu coûteuses, d'usage facile, permettant de synthétiser des images de complexité visuelle moyenne. Pour que l'on puisse disposer de systèmes analogues pour des images beaucoup plus riches ou demandant de gros calculs liés au modèle (dans le cadre d'applications scientifiques, par exemple) des progrès importants

dans la conception d'architectures matérielles et de logiciels adaptés devront être faits.

Bibliographie

- [Rogers 85] Rogers (D.F.), *Procedural elements for computer graphics*, McGraw-Hill, 1985.
[SIGGRAPH 83] Proc. SIGGRAPH 83, *Computer Graphics*, Vol. 17, 1983.
[SIGGRAPH 84] Proc. SIGGRAPH 84, *Computer Graphics*, Vol. 18, 1984.
[SIGGRAPH 85] Proc. SIGGRAPH 85, *Computer Graphics*, Vol. 19, 1985.
[SIGGRAPH 86] Proc. SIGGRAPH 86, *Computer Graphics*, Vol. 20, 1986.



QUELLES MACHINES POUR LA SYNTHÈSE D'IMAGES ANIMÉES ?

Philippe Matherat

Des simulateurs de vol à la création artistique en passant par les films publicitaires, de nombreux domaines utilisent la synthèse d'images et font appel selon leurs besoins aux ordinateurs les plus divers.

Les ordinateurs utilisés sont très variés et couvrent à peu près tout le spectre des architectures possibles, depuis les machines très spécialisées où les algorithmes sont ciblés jusqu'aux machines à usage général, et dans ce cas on rencontre tout le spectre de puissance, depuis le micro-ordinateur jusqu'au supercalculateur. Les raisons des choix sont les suivantes. Un simulateur de vol doit suggérer le mieux possible à un pilote d'avion qu'il est aux commandes de l'avion réel. Dans ce cas, le coût de la machine de synthèse d'images est à mettre en rapport avec le coût de fonctionnement des avions copilotés par des entraîneurs qualifiés et les performances doivent impérativement permettre le temps réel, c'est-à-dire vingt-cinq images par seconde pour un balayage télévision. La qualité de finition des images passe au second plan et on réalisera une architecture ciblée très spécialisée (4) après avoir choisi les algorithmes, assurant le meilleur rendu final des images, compatible avec le temps réel et le budget alloué. Actuellement, les simulateurs de vol peuvent calculer en temps réel des images 512x512 pixels sur 24 bits décrites par quelques milliers de facettes polygonales.

La synthèse d'image pour la création artistique ou les films publicitaires doit pouvoir utiliser les effets spéciaux les plus innovateurs permis par les algorithmes à peine sortis des laboratoires de recherche. On a donc intérêt à utiliser l'architecture la plus souple possible, c'est-à-dire avec toutes les possibilités d'un environnement de programmation performant, sur une machine générale. Le coût de production des images doit être mis en rapport avec le coût de réalisation d'un film classique, avec une caméra, soit 10 à 20000 F en moyenne pour les spots publicitaires. Ce genre de séquence n'est pas actuellement synthétisable en temps réel et il n'est pas rare de dépenser une

demie-heure de calcul par image, ce qui ne peut donc pas être interactif. On doit découper la réalisation en deux parties :

- d'une part la mise au point des paramètres décrivant la scène, ce travail comprenant la constitution de la base de données des objets à synthétiser, des éclairages, de leurs mouvements et des mouvements de la caméra fictive.
- ensuite, la synthèse des images finales est réalisée en différé à partir de ces données, sans intervention humaine, les images étant assemblées l'une après l'autre sur un film classique ou sur une bande magnéto-scope.

On utilise pour cette deuxième phase les ordinateurs les plus puissants possibles compatibles avec le budget alloué. La tendance actuelle est d'utiliser les supercalculateurs vectoriels (quelques centaines de MFlops), ou des machines multiprocesseurs de quelques MFlops (les algorithmes de "Ray-Tracing" se prêtant bien à une structure où chaque processeur calcule l'état d'un pixel [1]), voire même des machines massivement parallèles comme la "Connection Machine" de TMC comportant 64K processeurs de 1 bit [3], concurrençant les supercalculateurs.

Reste la troisième catégorie (déjà signalée pour la première étape du paragraphe précédent), celle prise en charge par les stations de travail, qui regroupe tous les cas où l'on a besoin d'interactivité (temps de calcul d'une image d'une fraction de seconde) pour un prix de l'ordre de 50000 F. Il s'agit alors d'architectures classiques, avec un peu de circuiterie spécialisée :

- ressemblant parfois à celle des simulateurs de vol, tel que dans la machine IRIS de Silicon Graphics, qui à l'aide de 12 circuits VLSI peut effectuer les transformations géométriques pour la perspective et le clipping des polygones à la vitesse de 80 kpoints/s soit 4 MFlops [2].
- comportant quelquefois des circuits d'interpolation rapide de l'intérieur des polygones, permettant un lissage de Gouraud, à la vitesse de 12 Mpixels/s, soit en temps réel pour 500 polygones de 1000 pixels, dans un circuit développé par Hewlett-Packard,
- mais souvent limitée à l'adjonction de coprocesseurs de calcul numérique en virgule flottante, permettant actuellement d'effectuer les transformations géométriques jusqu'à 300 kpoints/s avec des circuits Weitek ou Texas TMS320.

Bibliographie

- [1] Bru 85] **Brusq (R.)**, « Synthèse d'images par traçage de rayon (Ray-tracing) : la machine CRISTAL - résultats et perspectives », Actes de la 2^e semaine de l'image électronique, organisée par le CESTA, pages 404-410, avril 1986.
- [2] [Cla82] **Clark (J.-J.)**, « The Geometry Engine : a VLSI Geometry system for Graphics », *Computer Graphics* 16 (3) : 127-133, Juillet 1982.
- [3] [H88S] **Daniel Hillis (W.)**, *The Connection Machine*, MIT Press, 1985.
- [4] [Sch81] **Schachter (B.-J.)**, « Computer image generation for flight simulation », *IEEE CYBER* 1 (4) : 29-68, Octobre 1981.

QUELLES ARCHITECTURES POUR LE TRAITEMENT ET LA SYNTHÈSE D'IMAGES

Pierre-Louis Wendel

Les architectures des systèmes de traitement et de synthèse d'images doivent être conçues en fonction de la complexité des traitements souhaités.

En traitement et en synthèse d'images, on doit effectuer un grand nombre d'opérations sur des images numériques constituées par de nombreux points (élémentaires (pels) portant chacun une information pouvant être assez importante. Cela nécessite l'utilisation de machines ayant une puissance de calcul élevée. L'évolution des performances du matériel informatique a contribué au développement des méthodes et des techniques du traitement graphique et du traitement d'images. Toutefois il est nécessaire de réaliser des machines dont l'architecture soit spécifique au traitement demandé.

Éléments intervenant dans la conception des systèmes

L'architecture des systèmes est le résultat d'un compromis faisant intervenir la nature des données liées aux dispositifs d'acquisition et de restitution des images, la nature des traitements et les temps d'exécution nécessaires.

Cela se traduit par la réalisation de processeurs ou d'ensembles de processeurs et de mémoires interconnectés de manière à minimiser aussi bien les temps de calcul que les temps de transfert des données.

Une image numérique se présente sous la forme d'un tableau de données dont la dimension peut varier considérablement suivant la nature de l'application : 64 x 64 pels codés sur 8 bits en scintigraphie, 512 x 512 pels de 8 bits chacun en robotique et en image de synthèse animée à raison de 25 images par seconde, 3000 x 3000 pels de 24 bits en télédétection (satellite SPOT) et 16000 x 16000 pels de 32 bits en images réalistes destinées à l'imprimerie.

Les données provenant des dispositifs de prise de vue ou transmises aux systèmes de visualisation sont transférées à des cadences allant d'une certaine de milliers de pels par seconde à plusieurs dizaines de millions de pels par seconde. Les images doivent donc être soit stockées temporairement dans des mémoires à temps d'accès très

Pierre-Louis Wendel, professeur à l'université Louis Pasteur, École nationale supérieure de physique de Strasbourg, directeur du Laboratoire des sciences de l'image et de la télédétection, 7, rue de l'université, 67000 Strasbourg.

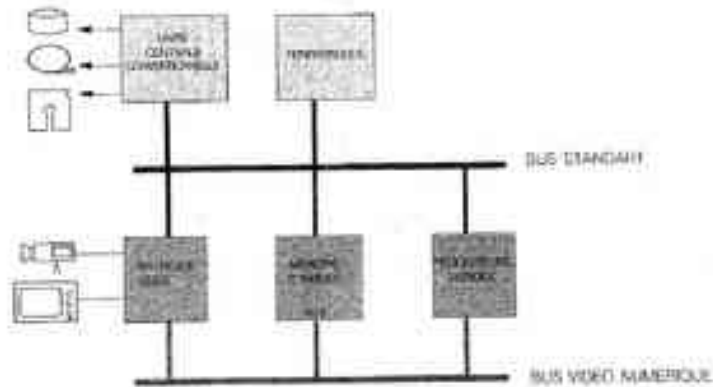


FIGURE 1. POSTE DE TRAVAIL

Fig. 1

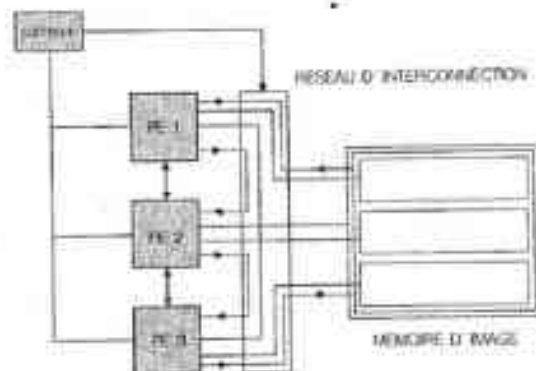


FIGURE 2. PARALLÉLISATION DE PROCESSEURS EN MODE SIMD. MIMO ET PISCINE

Fig. 2

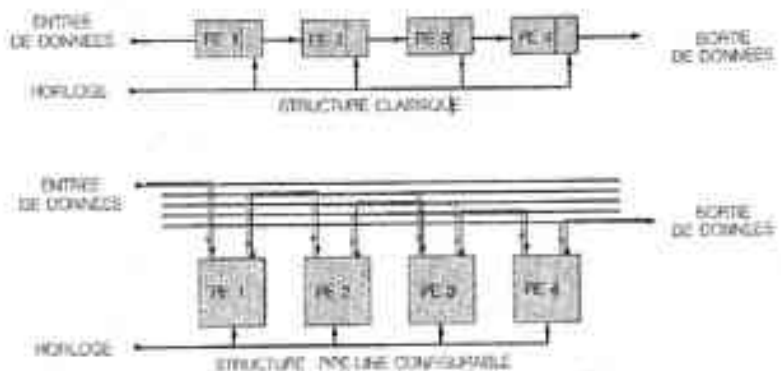


FIGURE 3. STRUCTURE PISCINE

Fig. 3

courts en vue d'un traitement exécuté en temps différé, soit traitées en temps réel par des processeurs rapides.

En traitement d'images, on est confronté selon l'application à des types de traitement très divers : corrections des conditions de prise de vue et des erreurs introduites par les dispositifs d'acquisition d'images, recherches de primitives représentatives d'objets, identification et localisation d'objets, de régions ou d'états, mesure géométriques ou radiométriques, analyse de scène, exploitation et mise en forme des informations. Les premiers types de traitement dits de "bas niveau" correspondent à des opérations sur des tableaux de données telles que des manipulations d'intensité, des traitements locaux, des traitements globaux, des traitements inter-images. Ces opérations font appel à un nombre très élevé d'opérations élémentaires identiques qui sont effectuées sur l'ensemble des données d'un tableau.

Pour les traitements de "haut niveau", le volume des opérations élémentaires peut être très différent.

Le temps d'exécution d'une application est l'intervalle de temps entre l'acquisition des données qui proviennent d'un capteur ou qui sont fournies par une graphiste et la restitution des informations ou des images recherchées en y incluant le dialogue opérateur-machine lorsque cela est nécessaire. Le temps maximum acceptable pour l'exécution d'une tâche dépend de la finalité de l'application. En milieu industriel par exemple, il est imposé par les cadences de production.

L'utilisation en laboratoires de recherche et de développement de méthodes de traitement et de synthèse d'images peut apporter des informations qu'il est difficile ou impossible d'obtenir par d'autres méthodes. Des temps d'exécution de longue durée sont alors tolérables.

Selon la nature des applications, la puissance de calcul est comprise entre un et cent millions d'opérations arithmétiques par seconde. Le développement de systèmes capables d'assurer de telles puissances de calcul est étroitement lié au développement des techniques. En micro-électronique, l'évolution de ces techniques due à l'augmentation de la densité d'intégration, de la vitesse de propagation et de commutation et à la réduction du coût de fabrication des circuits intégrés permet de réaliser des systèmes d'un coût acceptable.

Structure générale d'un système de traitement ou de synthèse d'images

Les investissements nécessaires au développement d'une nouvelle machine étant élevés, les concepteurs sont amenés à amortir les études en réalisant des systèmes ouverts capables de prendre en charge une gamme aussi large que possible d'applications. Ces systèmes sont en général autonomes, mono-utilisateurs et peuvent être connectés à la plupart des périphériques standards (disques, dérouleurs, imprimantes, etc.) et des dispositifs de prise de vue et restitution d'images. Par ailleurs, ils doivent être extensibles par adjonction de mémoires et de processeurs spécialisés.

Un point de travail comporte une unité centrale avec un co-processeur arithmétique rapide, une mémoire centrale, une mémoire de masse et une mémoire d'image pouvant être affichées séquentiellement sur un moniteur de télévision à résolu-

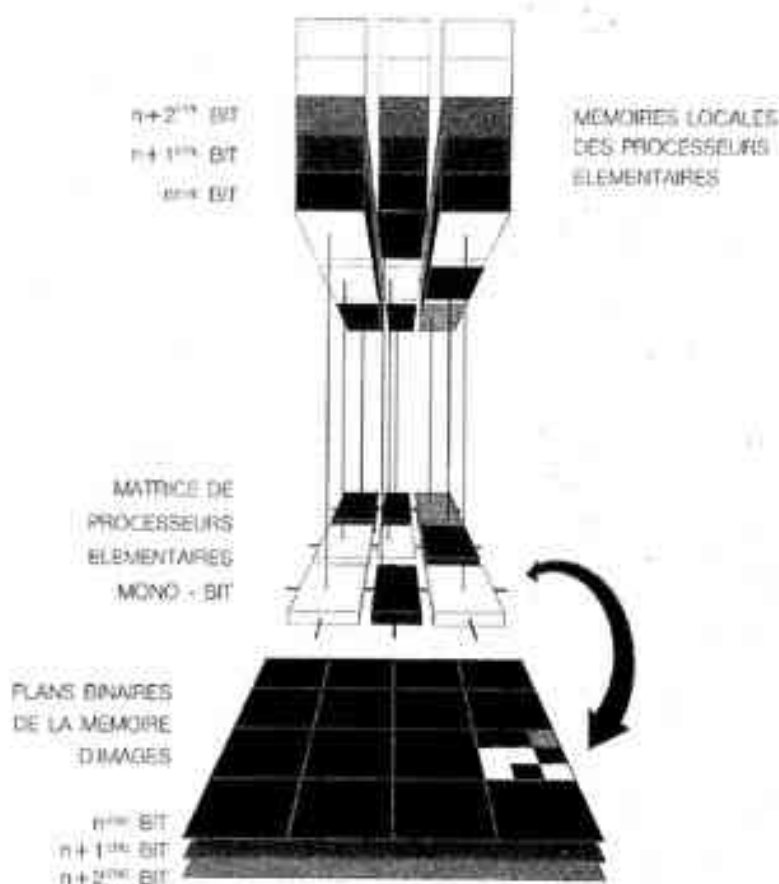


FIGURE 4. PROCESSEUR CELLULAIRE

tion plus ou moins élevée et un bus qui assure la communication de l'information entre les différents composants.

La puissance de calcul d'un tel système peut être augmentée à l'aide de processeurs plus spécialisés que l'unité centrale.

Un très grand nombre de types de processeurs ont été proposés ou réalisés. Ils peuvent comporter un seul processeur spécialisé ou plusieurs processeurs élémentaires qui fonctionnent en parallèle. Parmi les processeurs spécialisés, on peut citer des unités arithmétiques très rapides fonctionnant en virgule flottante à raison d'une opération toutes les 100 nanosecondes, des processeurs effectuant des opérations de morphologie mathématique, des processeurs destinés à la génération d'images numériques de synthèse, des processeurs chargés d'exécuter des effets de visualisation (zoom, scroll, etc.) et des calculs d'histogrammes sur les images. Le développement rapide de nouvelles méthodes en traitement et synthèse d'images et la demande croissante d'utilisateurs pour la mise en place d'applications de plus en plus évoluées se traduisent par un important effort de recherche sur les archi-

tectures des systèmes. Cet effort peut être poursuivi avec succès s'il est pris en charge par des équipes pluridisciplinaires regroupant des physiciens, des informaticiens et des électroniciens travaillant en liaison avec les thématiques concernées. Par ailleurs, en raison de la complexité de ces systèmes, l'évaluation d'une architecture donnée ne peut être faite correctement que lorsque la machine correspondante est réalisée, les outils de simulation ne prenant pas en compte l'ensemble des paramètres en cause.

Bibliographie

Il existe une abondante littérature concernant l'architecture des systèmes de traitement et de synthèse d'images. Parmi les ouvrages généraux, on peut citer : Duff (B.), et Levialdi (S.) (ed), *Languages and Architectures for Image Processing*, Academic Press, 1981. Preston (K.) et Uhr (J.) (ed), *Multicomputers and Image Processing*, Academic Press, 1982. Bresenham (J.E.), Eamshaw (R.A.), Pitteway (M.L.U.), *Fundamental Algorithms for Computers Graphics*, Springer-Verlag, Berlin, 1965. Castan (S.), "Architectures adaptées au traitement d'images", *T.S.I.*, vol. 4, n° 5, 1985.

Fig. 4

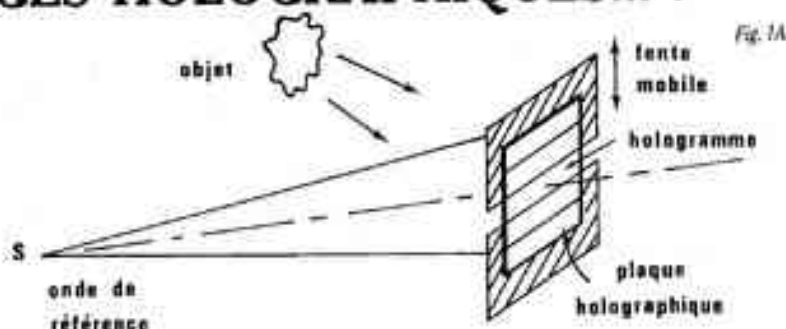
RELIEF, MOUVEMENT, COULEURS DANS LES IMAGES HOLOGRAPHIQUES... ?

Claudine Bainier, Gilbert Tribillon

Une certitude pour le relief, des réalisations pour le mouvement, une approche pour la couleur.

L'holographie est un processus photographique qui implique la compréhension de la nature ondulatoire de la lumière. En effet, l'onde électromagnétique — lumière — est entièrement définie par son amplitude et par sa phase. La fréquence de vibration (ou son inverse appelé "longueur d'onde") est implicitement contenue dans le terme de phase. L'émission photographique comme les autres récepteurs, tri, photodiode, photomultiplicateur n'est sensible qu'à l'intensité (carré de l'amplitude de l'onde électromagnétique) ce qui signifie qu'une partie de l'information, la phase, n'est pas prise en compte. C'est elle pourtant qui traduit la différence des trajets lumineux réfléchis par les différentes parties de l'objet. Aussi, pour enregistrer l'information complète sur un film photographique est-il nécessaire de mettre en mémoire à la fois l'amplitude et la phase.

L'idée originale développée par D. Gabor en 1948 est de créer un phénomène d'interférence entre une onde lumineuse caractérisant l'objet et une onde lumineuse auxiliaire, puis de l'enregistrer photographiquement. D. Gabor donne à cet enregistrement le nom d'hologramme. Toutefois, après développement, aucune image n'apparaît sur la plaque photographique. Une opération complémentaire est nécessaire pour observer l'image tridimensionnelle de l'objet initial, opération appelée restitution. Les images obtenues par Gabor étaient de mauvaise qualité par suite de l'absence de sources lumineuses adaptées et de la configuration du montage d'enregistrement utilisé. Le vrai départ se situe vers 1955 à l'université du Michigan où E.N. Leith et un groupe de chercheurs ont introduit le concept de fréquence de modulation, travaillant sur la visualisation optique d'échecs radars enregistrés sur un film photographique : les ondes lumineuses diffractées forment des répliques miniatures des ondes reçues par l'antenne. Ainsi, on peut dire qu'il y a eu co-servation de la phase et de l'amplitude puisque, après l'enregistrement photographique et la restitution, on retrouve l'information 3D initiale présente



sur les antennes. Cette technique devenue une routine dans le domaine des ondes radars a été appliquée aux ondes optiques, ce qui allait permettre à E.N. Leith et J. Upatnik de présenter en 1964 les premiers hologrammes d'objets tridimensionnels. Ce fut une réussite expérimentale car ils utilisèrent une nouvelle source lumineuse, mise au point quatre années auparavant, le laser, qui sera à l'origine du développement des techniques holographiques grâce à sa lumière cohérente, monochromatique et directive. Par ailleurs, en Union Soviétique dès 1963, le physicien Yu N. Denisyuk s'inspirant des travaux de G. Lipmann propose une autre méthode originale d'enregistrement holographique, basée également sur le principe de l'interférence de deux ondes lumineuses cohérentes.

Comment réaliser et voir l'hologramme

L'enregistrement du phénomène d'interférence créé par la superposition de la lumière diffractée ou réfléchie par l'objet — onde objet — et la lumière directe — onde référence — issues du même laser, constitue l'hologramme de l'objet. Après développement, l'observation de l'image tridimensionnelle fait appel à un procédé de décodage appelé restitution. L'hologramme replacé dans sa position initiale, éclairé par le seul faisceau de référence, donne par diffraction une image 3D, copie en vraie grandeur de l'objet. Sur cette image holographique le relief a la même réalité que sur l'objet lui-même : les effets de paralaxe et de profondeur de champ sont conservés. Les perspectives observées dans l'image holographique sont liées à la manière dont l'onde objet est "perçue" à l'enregistrement par la plaque photographique. Un point quelconque de la plaque reçoit de la lumière provenant de tout l'objet, donnant ainsi à la restitution en ce point, une vue globale de cet objet. Chaque portion de l'hologramme donne une image complète vue sous un angle différent.

Animation et cinéoholographie

En holographie, les sources lasers utilisées tant par les scientifiques que par les amateurs passionnés ont été pendant longtemps des lasers à émission continue comme les lasers à gaz (hélium, néon et argon). Compte tenu de la très grande stabilité nécessaire à l'enregistrement des franges d'interférence (de l'ordre du micron), ils ne permettent

pas la réalisation d'hologrammes d'objets mobiles ou d'êtres vivants.

Grâce à de nouveaux développements, les lasers à rubis générant des impulsions lumineuses très intenses et très brèves (de l'ordre de 10^{-9} seconde) se sont avérés bien adaptés à ce type d'holographie. Dès 1978 ont été réalisés, par N. Aetischer à Besançon, des portraits holographiques qu'elle a aussi-tôt cherché à animer. Une séquence périodique d'impulsions brèves permet d'enregistrer plusieurs instantanés successifs d'un visage avec des expressions différentes ou d'un objet vu sous différents angles. En modifiant l'inclinaison de l'onde porteuse par rapport à la plaque ou en déplaçant le support holographique, on obtient après développement des hologrammes, les images successives du sujet au cours de son mouvement.

Cette technique d'animation pouvant être réalisée sur plaque de grandes dimensions, a l'avantage de présenter des images réelles observables simultanément par plusieurs personnes. Cependant, elle est limitée à des séquences courtes à caractère répétitif. Quelques clichés illustrent ce procédé (fig. 1). Actuellement, des lasers à YAG sont capables de délivrer des impulsions à une fréquence de plusieurs dizaines de hertz. Doubles en fréquence, ils émettent dans le visible à 0,53 µm. Ainsi en France, P. Smigelski et le groupe de l'Institut franco-allemand de Saint Louis (ISL) ont développé une caméra holographique travaillant à 24 images/seconde sur films 35, 70 et 126 millimètres. Un extrait du film est reproduit à titre d'exemple (fig. 2). Ces différents travaux offrent la possibilité d'une prise de vue cinéoholographique d'objets mobiles mais restent sans réponse simple quant à une projection holographique observable pour un nombre important de spectateurs. En effet, si dans le cinéma classique l'observation se fait par projection sur un écran de l'image bidimensionnelle enregistrée sur le film, en cinéoholographie, l'observation se fait à travers le film holographique ce qui limite les possibilités d'observation à une seule personne. Komar a proposé la technique de projection du cinéma en utilisant un écran spécial (également holographique) qui conserve l'aspect tridimensionnel de l'image holographique projetée et qui permet l'observation à 5 ou 6 personnes simultanément pour un écran de 50 x 60 centimètres. A notre connaissance aucune autre tentative n'a dépassé le stade du laboratoire.

Claudine Bainier, ingénieur d'études au CNRS, Laboratoire d'optique Pierre Michel Duffieux, (UA 214 CNRS).

Gilbert Tribillon, ingénieur de recherche au CNRS, Laboratoire d'optique Pierre Michel Duffieux, faculté des sciences et des techniques, université de Franche-Comté, route de Gray, La Bouloie, 25030 Besançon Cedex.

Fig. 1b



Fig. 1. Dans l'exemple du portrait animé du mime "Tania", le sujet est éclairé par un laser à rubis (impulsions de 25ns). Chaque des phases du mouvement est enregistrée successivement en différentes régions de la plaque holographique (20 x 25 cm) constituant ainsi une série d'un douzaine d'hologrammes indépendants juxtaposés horizontalement, fig. 1a. L'ensemble des images réelles restituées jouent le rôle d'objets pour un second enregistrement. Ce deuxième hologramme contient l'ensemble des images correspondant à la totalité de la séquence enregistrée. L'observateur placé convenablement, retrouve, par un déplacement approprié de la source, les différentes phases du mouvement, ici les expressions successives du visage. Les photographies, fig. 1b, représentent une sélection des images 3D observées à partir du même hologramme. (Création artistique Paula Devoset, document du Laboratoire d'Optique de Besançon)



Voir des images en lumière naturelle

Si lors de l'enregistrement des hologrammes la lumière laser est pour le moment une nécessité, son utilisation n'est pas systématique à la restitution. Si on éclaire un hologramme en lumière naturelle, toutes les longueurs d'onde contenues dans la source restituent leur propre image, toutes légèrement décalées les unes par rapport aux autres, rendant impossible l'observation. La restitution en lumière naturelle ne peut donc être envisagée que si le procédé d'enregistrement contient un codage de la lumière ne laissant passer, à la restitution, qu'une seule longueur d'onde dans une direction donnée, générant ainsi une seule image. Dans ce but deux méthodes ont été développées.

La première méthode a été proposée par Yu N. Denisyuk en 1963, il s'est inspiré du procédé de sélection chromatique de la lumière développé par G. Lippman dans le cadre de ses travaux sur la photographie couleur. Les franges d'interférences créées entre l'onde de référence et l'onde objet sont alors des ondes stationnaires dans l'épaisseur de l'émulsion photosensible. Il en résulte la création de strates périodiques distantes d'une demi-longueur d'onde qui lors de la restitution vont jouer, sur la lumière incidente, le rôle de filtre chromatique permettant l'observation de l'image holographique en monochrome. Dans cette méthode, l'observateur et la source de restitution sont du même côté de l'hologramme, ce type d'hologramme est appelé "hologramme en réflexion".

La deuxième méthode proposée par S. Benton en 1969 consiste à enregistrer un premier hologramme de l'objet et à limiter cet hologramme à une fente de quelques millimètres de hauteur par un diaphragme rectangulaire horizontal très étroit. À partir de l'image 3D restituée, un deuxième hologramme est enregistré. Dans ce cas, en raison de la fente, la vue de l'objet est limitée à la seule parallaxe horizontale, en contre partie, la restitution peut se faire en lumière naturelle. Quand l'observateur se déplace de droite à gauche, la couleur de l'image reste constante tandis que la perspective change : quand l'observateur se déplace de haut en bas, en gardant la même perspective, l'image change de couleur, rouge vers le haut, bleu vers le bas. Cette irisation est provoquée par la dispersion de la lumière incidente. Cette caractéristique lui vaut le nom d'"hologramme arc-en-ciel". À la restitution, la lumière traversant la plaque, ce type d'hologramme est appelé "hologramme en transmission". Des variantes intéressantes ont été développées pour obtenir des images achromatiques ou pseudocouleurs (fig. 3).

Cependant, l'holographie en l'état actuel ne sait pas bien répondre au problème de la fidélité du rendu des couleurs. En effet, la taille de l'image holographique restituée dépend de la longueur d'onde utilisée à l'enregistrement, ce qui impose pour superposer dans l'espace plusieurs images 3D (une par couleurs primaires), une "gymnastique" que les physiciens ne maîtrisent pas encore.

Fig. 2 - Il s'agit d'images extraites du film holographique "Christine et les isolobes" (24 images/s, pellicule 135 mm) réalisé à l'ISL, Saint-Louis. (Document Institut franco-allemand de Saint-Louis)

Trois dimensions pour l'imagerie médicale, l'architecture...

La méthode développée par S. Benton a été utilisée dans l'holographie multiplexe. Une caméra enregistre plus d'un millier de clichés différents d'un objet placé au centre d'un plateau tournant. Chaque cliché est transformé en un hologramme vertical quasi-rectiligne. Tous les hologrammes sont juxtaposés sur un même support suivant la génératrice d'un cylindre. Leur restitution en lumière naturelle fournit une série d'images telles que l'observateur reçoit simultanément sur chaque œil une image différente, d'où une perception du relief par un effet semblable à la stéréoscopie. Cette méthode de multiplexage est attractive et présente un intérêt particulier dans le domaine médical, l'architecture, l'urbanisme...

La troisième dimension au quotidien

Il a fallu que les scientifiques obtiennent des images holographiques de grande taille, de grande brillance, d'une grande pureté, présentables dans un lieu public sans aménagement spécifique, pour que l'hologramme s'affirme comme moyen d'expression, de communication.

Le monde de la publicité et celui de l'art ont été les premiers conquies. Nombre d'hologrammes "spectacles", de copies d'œuvres d'art ont été présentés dans les salons, les galeries d'art. Mais depuis quelques années, l'holographie s'oriente vers la production de masse et cherche à s'implanter en utilisant des vecteurs traditionnels comme l'affichage, la presse. Elle a su fabriquer en grande série à coût réduit. Pour cela un hologramme primaire est enregistré sur une résine de type photorésist. L'information est alors codée sous forme de variation de relief (de l'ordre de $1/10^3$ de micron). Cet hologramme sert d'empreinte à une matrice en nickel qui elle-même va jouer le rôle d'outil de pressage. Les matériaux utilisés pour cette opération sont bon marché tels PVC ou PET que l'on métallise ensuite. Un seul outil crée plusieurs milliers d'hologrammes. Le prix de revient est de quelques francs pour des hologrammes d'un décimètre carré de surface. Ces hologrammes peuvent être ensuite déposés à même la couverture d'un magazine ou d'une carte de crédit.

Les images de demain

Les hologrammes acoustiques, les hologrammes calculés sont des domaines abordés par les physiciens. La base technique est constituée par les ordinateurs de plus en plus puissants et rapides. L'augmentation importante des mémoires nécessaires pour résoudre un calcul en trois dimensions n'est plus un obstacle dans les perspectives de recherche des scientifiques modernes. De plus, la valeur scientifique des données 3D est parfois inestimable, à tel point que l'on cherche la méthode la mieux adaptée pour visualiser ces données. L'holographie est la technologie la moins mûre dans ce domaine, mais elle est promise à un bel avenir. On pense naturellement aux hologrammes générés par ordinateur ou ce qui est plus probable, à des stéréogrammes holographiques, qui sont une synthèse de plusieurs images dessinées par ordinateur.

Et demain ? — "La plupart d'entre nous ne s'aperçoit que graduellement de la révolution qui se déroule dans le domaine de l'optique et de la communication visuelle..." — répond S. Benton.



Fig. 3 - Enregistré avec deux lasers de longueur d'onde différente (rouge et vert) suivant le procédé arc-en-ciel, cet hologramme (9x12 cm) éclairé en lumière naturelle fournit une image en pseudocouleurs. (Document Laboratoire d'optique de Bransbourg)

LES CRISTAUX LIQUIDES

Antoine Skoulios

Les cristaux liquides nématiques sont faciles à identifier et l'orientation commune des molécules permet leur utilisation à des fins technologiques.

Connu depuis longtemps (Reinitzer, 1888), les cristaux liquides thermotropes continuent à faire encore aujourd'hui l'objet de recherches soutenues tant en chimie qu'en physique. Qu'ils soient nématiques, cholestériques ou smectiques, ils sont obtenus, dans la vaste majorité des cas, avec des substances organiques dont les molécules sont allongées et relativement rigides. A l'heure actuelle, ils sont largement utilisés dans le domaine de l'opto-électronique, et plus spécifiquement dans la fabrication de dispositifs d'affichage.

Originellement, leur nom voulait suggérer leur caractère intermédiaire entre celui des solides cristallins et des liquides isotropes ; en effet, bon nombre des cristaux liquides présentent à la fois la fluidité des liquides et la biréfringence des cris-

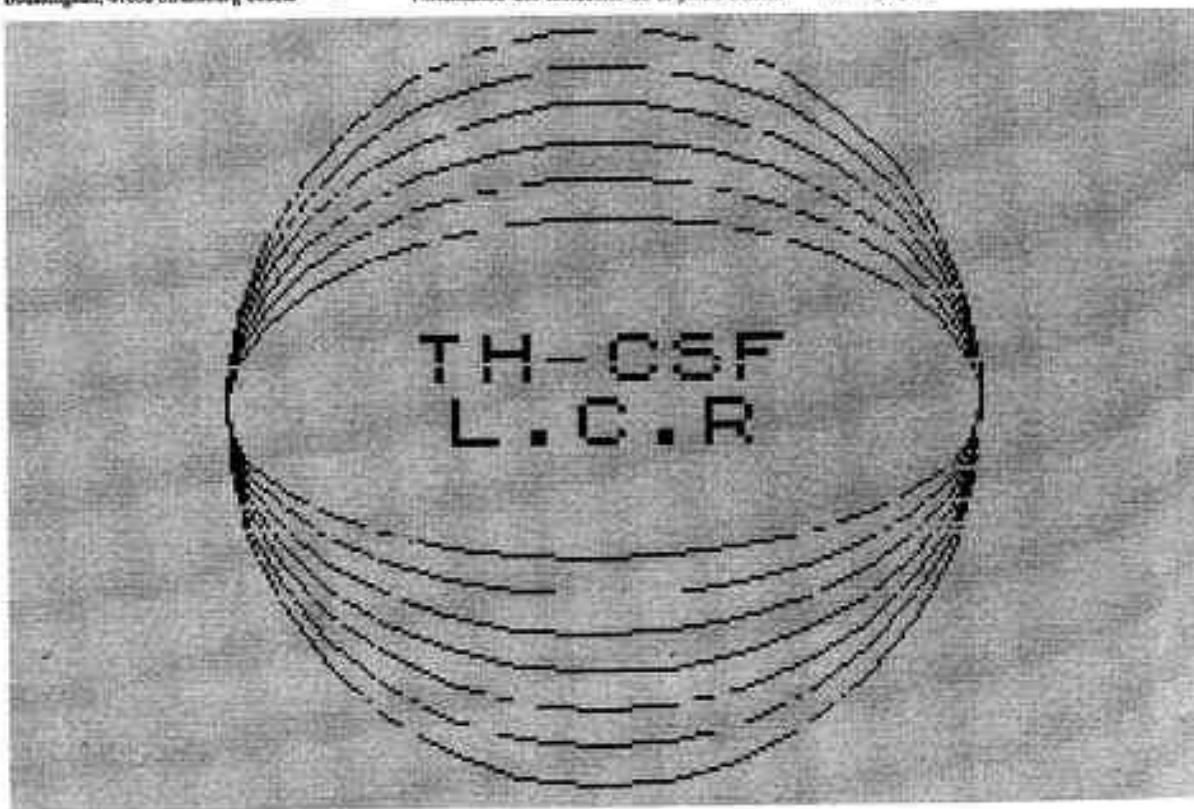
taux. L'anisotropie de leurs propriétés physiques est liée à la manière dont les molécules s'ordonnent spatialement. Ainsi, dans le cas des cristaux liquides nématiques, les molécules tendent à s'orienter toutes dans une direction commune, tout en conservant des corrélations en positions similaires à celles des liquides ordinaires. Dans le cas des cristaux liquides smectiques, les molécules tendent à la fois à s'orienter toutes dans une direction commune et à se disposer dans des couches parallèles et équidistantes, souvent libres de glisser les unes par rapport aux autres.

Par suite de leur fluidité, les cristaux liquides nématiques sont très sensibles aux perturbations extérieures : champs électriques ou magnétiques, forces d'ancrage sur des substrats... L'orientation commune des molécules peut de ce fait être modifiée ; généralement, elle varie alors lentement d'un point à l'autre du milieu. Cette propriété remarquable permet l'identification aisée des cristaux liquides nématiques par simple observation au microscope optique en lumière polarisée. Elle est surtout à la base de la plupart de leurs applications technologiques, et en tout cas de leur utilisation dans la fabrication de dispositifs d'affichage et de visualisation.

Cette photographie représente un écran plat fait de cristaux liquides nématiques, réalisé par les laboratoires de Thomson-CSF (J.P. Le Pesant). Elle montre comment on peut visualiser une information ou restituer une image numérisée. Le principe de fonctionnement de cet écran est fondé sur l'action de champs électriques sur l'orientation des molécules de la phase némati-

que, et partant, sur la texture de celle-ci. L'écran est formé d'un film mince de cristal liquide nématique, d'anisotropie diélectrique positive, placé entre deux lames de verre, entre polariseur et analyseur croisés, et entre deux électrodes transparentes. Les lames de verre sont préalablement traitées de manière que les molécules s'orientent parallèlement au plan du film et, en même temps, parallèlement à une direction donnée pour chacune de ses faces. Les directions d'orientation choisies sont celles du polariseur et de l'analyseur, respectivement. Par déformation élastique continue, l'orientation des molécules évolue hélicoïdalement d'une face à l'autre du film, le plan de polarisation subit une rotation de 90°, et l'écran, observé par transparence, paraît clair. Par application d'une faible tension électrique aux électrodes, les molécules tendent à s'orienter parallèlement au champ électrique, c'est-à-dire perpendiculairement au plan du film, le plan de polarisation n'est plus modifié lors de la traversée du film, l'analyseur arrête la lumière, et l'écran paraît noir. Du point de vue technologique, l'écran comporte en réalité, sur chacune de ses faces, une matrice rectangulaire d'électrodes, réparties en 256 lignes et 320 colonnes avec un pas de 0,25 millimètres. Chaque point d'image est commandé par un transistor en couche mince de silicium amorphe hydrogéné, suivant l'information numérisée. Du point de vue de la réalisation pratique de l'écran, on utilise des dépôts de métaux, d'isolants et de silicium amorphe, et on fait intervenir cinq niveaux de masquage de photolithographie.

Antoine Skoulios, directeur de recherche au CNRS, Institut Charles Sadron (LP 22 du CNRS), 4, rue Boussingault, 67083 Strasbourg Cedex.



LES ÉLECTROCHROMES

Odile Bohnké

Le récent développement de l'électronique et de la microélectronique, a touché le domaine de la visualisation où les systèmes électro-optiques sont de plus en plus utilisés. La diversité des besoins en visualisation, communication, transports, appareils scientifiques, rend nécessaire la mise au point de matériaux susceptibles de changer de couleur de façon rapide et nette. Dans cette optique, des travaux concernant les matériaux électrochromes ont été menés ces dernières années.

Le phénomène d'électrochromisme repose sur l'apparition d'une absorption optique, dans la partie visible du spectre d'un matériau, lorsque celui-ci est soumis à l'action d'un champ ou d'un courant électrique. Ainsi une réaction électrochimique au sein d'un matériau peut créer des espèces absorbantes par changement des degrés d'oxydation, modifier le spectre d'absorption de la lumière ambiante lors de son passage à travers le matériau, et provoquer l'apparition d'une coloration.

Comparés aux systèmes électro-optiques d'affichage actuellement sur le marché (cristaux liquides et diodes électroluminescentes), les systèmes électrochromes présentent un certain nombre d'avantages : grand angle de vue, possibilité de

présenter deux ou trois couleurs, très bon contraste, effet mémoire en circuit ouvert tant à l'état coloré qu'à l'état effacé, possibilité de se présenter à l'état solide, grande surface, temps de commutation très courts (< 500 ms).

Ces dispositifs ne concurrencent pas les cristaux liquides du fait de l'avance technologique et des très faibles temps de réponse (ms) de ces derniers. Cependant, leurs propriétés spécifiques leur permettent de trouver une application dans des créneaux laissés vacants par les cristaux liquides tel que l'affichage de grande surface demandant un angle de vue important, un bon contraste ainsi que la couleur.

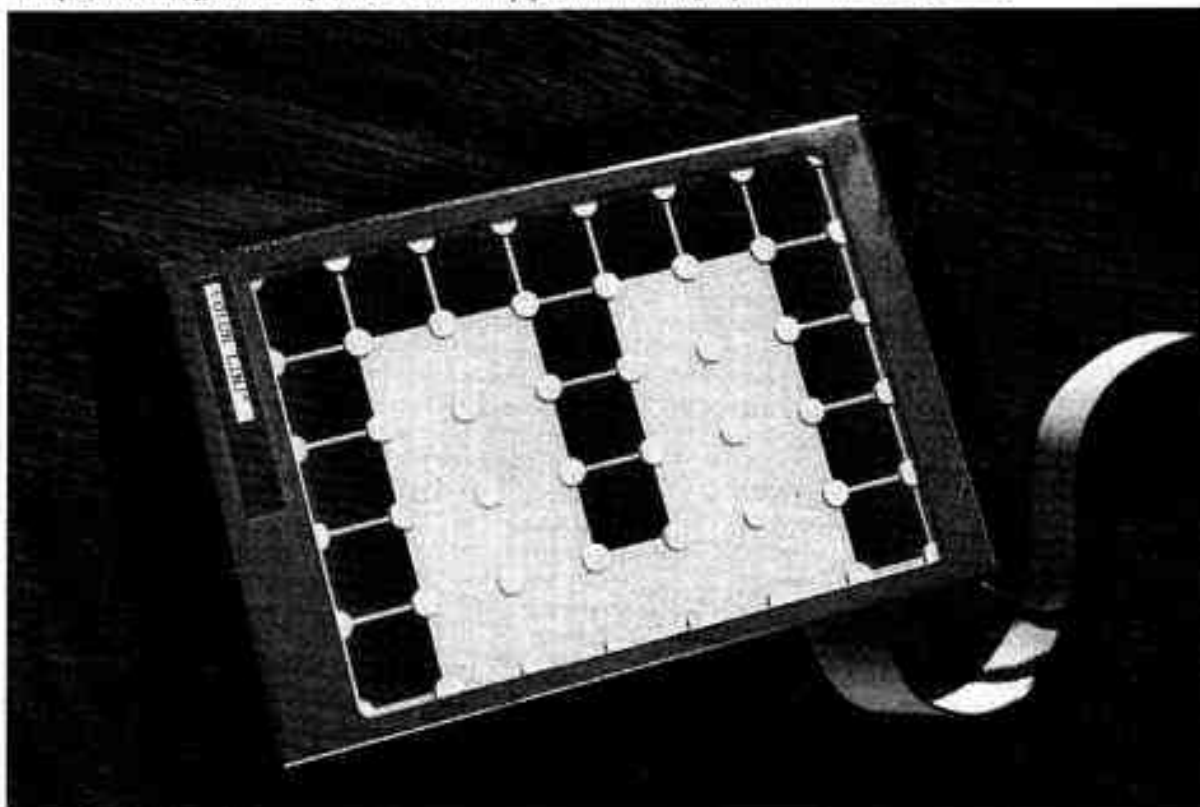
Il existe un grand nombre de matériaux électrochromes inorganiques ou organiques. Parmi les premiers, on peut citer les matériaux qui se colorent lors d'une réduction électrochimique, par exemple l'oxyde de tungstène (WO_3) et ceux qui se colorent lors d'une oxydation comme l'oxyde d'iridium Ir_2O_7 . Les matériaux organiques les

plus étudiés sont les viologènes, les diphtalocyanines de terres rares (voir encadré), les phénothiazines dont le bleu de méthylène et les polymères conducteurs.

Il y a quelques années, des essais de commercialisation de dispositifs électrochromes d'affichage pour montres et pendulettes ont été tentés par Seiko et par Matsushita et n'ont pas abouti. La société française AZM commercialise depuis plus d'un an un dispositif fabriqué par la société japonaise Asahi Glass. Ce système, constitué d'oxyde de tungstène et d'un électrolyte liquide, se présente en bleu sur fond blanc (voir photo). Il vise le marché de l'affichage public. Cependant, le prix des dispositifs trop lié à la fluctuation du cours des monnaies, gêne leur compétitivité face aux systèmes électromécaniques, malgré l'avantage de leur fiabilité, reconnu par les utilisateurs.

Plusieurs laboratoires de recherche universitaires et du CNRS travaillent actuellement sur les possibilités de multiplexage (adressage par lignes et colonnes) de dispositifs totalement solides en vue d'augmenter le nombre d'informations visualisées et de diminuer la dimension des caractères. Une autre application potentielle des matériaux électrochromes est l'obscurcissement des vitrages pour contrôler le transfert de l'énergie solaire (« volets » électrochromes) ou pour contrôler le transfert thermique afin de diminuer les charges de chauffage dans les bâtiments.

Dispositif d'affichage électrochrome fabriqué par Asahi Glass (Japon) et actuellement commercialisé par la société AZM (Le Chesnay).



LES DIPHTALOCYANINES DES LANTHANIDES

Maurice L'Her

Parmi les matériaux susceptibles d'application dans le domaine de l'affichage électrochimique, les colorants organiques et les complexes de coordination (édifices moléculaires constitués d'un ion métallique central lié à des ions ou à des molécules généralement organiques) tiennent une place importante. Ces produits offrent en effet une gamme de couleurs étendue et des contrastes importants. Mais pour être utilisables, ils doivent être stables dans leurs différents états d'oxydation et pouvoir effectuer un minimum de 10^7 cycles « affichage-effacement ».

Les diphtalocyanines, dérivés organiques stables des lanthanides (métaux de terres rares) et, plus particulièrement, celle de lutétium (terre rare de numéro atomique 71) forment des complexes de

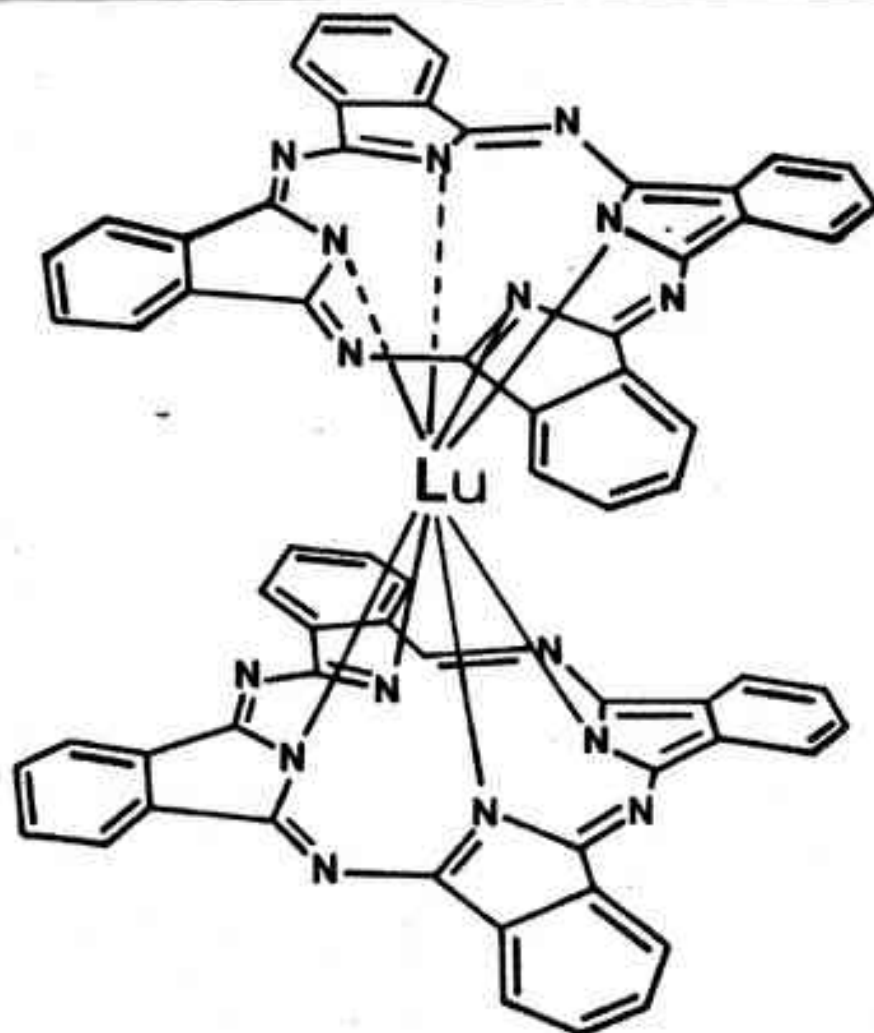
coordination présentant des propriétés électrochromes.

Leur forme moléculaire vert émeraude peut être oxydée en dérivés brun et rouge. La réduction fait passer par des stades bleu turquoise, bleu nuit et violet. Cette polychromie constitue une grande qualité qui fait défaut à la plupart des systèmes d'affichage actuels.

La réversibilité des premières étapes de réduction et d'oxydation rend possible l'utilisation des diphtalocyanines de terres rares dans le domaine de l'affichage. De plus, ces matériaux sont sublimes : on peut donc déposer à la surface d'électrodes métalliques ou transparentes des couches colorées d'épaisseur contrôlée. Ce film de colorant peut subir des changements de coloration,

avec des contrastes élevés et une bonne stabilité des formes oxydées. Comme toute cellule électrochimique, un dispositif d'affichage électrochimique comporte au moins une seconde électrode et nécessite la présence d'un électrolyte. Les échanges d'ions entre la solution électrolytique et la couche du matériau électrochrome conditionnent la rapidité des échanges électroniques et donc les performances du système d'affichage. Ce phénomène est actuellement en cours d'étude.

Maurice L'Her, directeur de recherche au CNRS, responsable de l'unité associée « Photochimie, électrochimie et chimie moléculaires » (UA 322 CNRS), université de Brest, faculté des sciences et techniques, 6, avenue Le Gorgeu, 29267 Brest Cedex.



CHOIX DES PALETTES DE COULEUR

Marie Farge

En améliorant la compréhension des images grâce à la normalisation des palettes de couleur utilisées, on cherche à mieux analyser les résultats issus d'expérimentations numériques, à faciliter la communication de ceux-ci, ainsi que leur comparaison avec des données provenant d'expériences effectuées en laboratoire.

Le problème du choix des palettes de couleur se pose quand on fait appel aux techniques de type « raster », c'est-à-dire pour lesquelles une image est définie comme un ensemble de pavés élémentaires, appelés « pixels », chacun ayant une couleur choisie à l'intérieur d'un espace très riche. Cette technique s'utilise dans des domaines très variés, allant de l'imagerie médicale aux visualisations en mathématiques, en passant par l'imagerie satellitaire ou aérienne, sans oublier la numérisation d'images obtenues en laboratoire.

Nous n'aborderons ici que le problème du choix des couleurs et ne discuterons pas celui des modes de représentation traités dans d'autres articles (1, 2). L'approche adoptée est résolument pragmatique et doit permettre de programmer la sélection des couleurs à partir de principes fixés a priori, afin de s'abstraire de la subjectivité individuelle, si variable en ce domaine. Ceci nous conduit à proposer une organisation de l'espace des couleurs, caractérisée par une terminologie complète d'une numérotation, et à définir des règles de sélection telles que les couleurs utilisées soient en harmonie les unes avec les autres.

Choix de la synthèse soustractive

Nous avons adopté la synthèse soustractive des couleurs, basée sur l'addition de pigments colorés, rouge, jaune et bleu leur somme en quantité égale donnant du noir et leur absence laissant la feuille blanche, au lieu de la synthèse additive des couleurs, basée sur la composition de faisceaux colorés, rouge, vert et bleu (leur superposition en quantité égale donnant cette fois-ci du blanc et leur absence laissant l'écran noir). La synthèse additive est utilisée pour générer les couleurs sur un écran cathodique, mais elle n'est pas assez parlante du point de vue intuitif, car nous avons appris à manipuler les couleurs avec des peintures ou des encres, c'est-à-dire suivant les principes de la synthèse soustractive.

Choix de la représentation luminance-chrominance-saturation

Thomas Young a proposé dans sa théorie de la vision des couleurs le principe de trivariance visuelle, selon lequel la rétine de l'œil contient

Marie Farge, chargée de recherche au CNRS, Laboratoire de météorologie dynamique du CNRS (LP 1211 du CNRS), Ecole normale supérieure, 24, rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 05.

trois types de pigments différents, sensibles respectivement au rouge, au vert et au bleu, ce qui permet de décomposer n'importe quelle couleur selon cette base. James Clerk Maxwell confirma cette hypothèse et établit les formules physiologiques qui permettent de passer de la représentation sous la forme d'un cube (figure 1a), de composantes rouge-vert-bleu en synthèse additive et rouge-jaune-bleu en synthèse soustractive, à celle sous la forme d'un cône (figure 1b), dont les composantes sont la luminance, qui correspond à l'intensité lumineuse perçue, la chrominance (raie spectrale la plus excitée) qui se rapporte à la couleur et la saturation (largeur de la bande spectrale) qui indique si la couleur est plus ou moins pâle ou foncée.

Réduction de la dimensionnalité de l'espace des couleurs

Pour simplifier la représentation de l'espace des couleurs nous avons décidé de n'employer que des couleurs vives, c'est-à-dire de saturation maximale. En effet, sur un écran cathodique il est souvent très difficile de distinguer une couleur désaturée, mélangée à du blanc par exemple, d'une couleur éclaircie en augmentant sa luminance. Ce choix réduit la dimensionnalité de l'espace des couleurs de trois à deux dimensions et l'on obtient alors un plan des couleurs (figure 1c), où la luminance varie selon l'axe vertical et la chrominance selon l'axe horizontal. Il faut ici remarquer que chaque couleur saturée possède une dynamique en luminance qui lui est propre : le jaune vif, par exemple, est beaucoup plus lumineux que le bleu vif tandis que le violet se laisse facilement éclaircir sans être dénaturé, alors que le rouge tend à devenir rose dès qu'on l'éclaircit ou marron dès qu'on l'assombrit. On peut également séparer les chrominances saturées en deux classes : les tons chauds, allant du rouge au jaune et les tons froids allant du vert au violet. Nous utiliserons ce contraste chaud-froid pour distinguer plus aisément les valeurs négatives, toujours représentées par des couleurs froides, des valeurs positives, toujours représentées par des couleurs chaudes.

Discretisation de la chrominance

Pour coder les variations des champs à visualiser, nous avons choisi le paramètre luminance. Par exemple, les structures négatives ont un centre plus foncé que leur périphérie, tandis que les

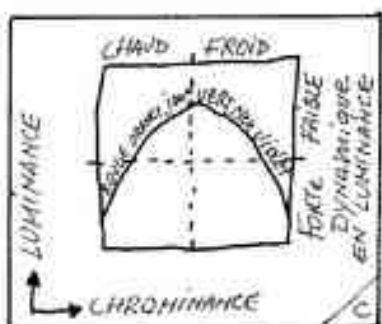
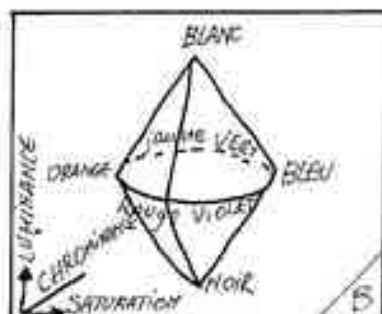
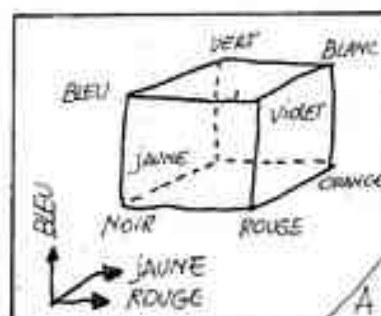


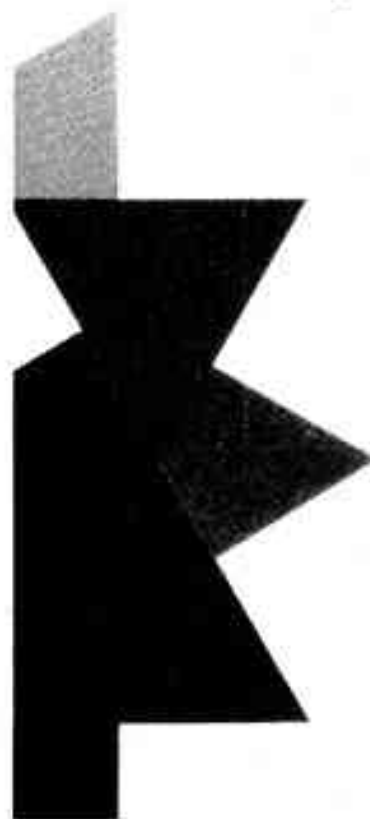
Fig. 1 - L'espace des couleurs a une structure tridimensionnelle et peut être représenté, soit sous la forme d'un cube (a) de composantes rouge-vert-bleu en synthèse additive ou rouge-jaune-bleu en synthèse soustractive, soit sous la forme d'un cône (b), dont les composantes sont la luminance, la chrominance et la saturation. En décidant de n'employer que des couleurs saturées, on réduit l'espace des couleurs à deux dimensions ici qui sont la luminance et la chrominance.

structures positives ont un centre plus clair, ce qui permet de les distinguer indépendamment de leur chrominance. Ainsi toute l'information est-elle déjà présente dans l'image noir et blanc. Nous réservons le paramètre chrominance pour faire mieux ressortir les structures positives des structures négatives, à l'aide du contraste chaud-froid, et pour aisément identifier différents champs, chacun étant caractérisé par une association de plusieurs chrominances qui lui est propre. Pour simplifier le problème de la sélection des couleurs, nous avons discrétisé l'échelle de

chrominance selon douze valeurs de base qui nous servent de référence et par rapport auxquelles on peut ensuite positionner n'importe quelle autre chrominance. Nous avons choisi de nous limiter à douze car chaque chrominance doit être facilement identifiable et mémorisable par tout un chacun. Les douze chrominances de base sont organisées suivant un cercle (figure 2), de telle sorte que deux couleurs diamétralement opposées soient complémentaires l'une de l'autre, c'est-à-dire telles que leur mélange donnerait du gris.

Normalisation des douze chrominances élémentaires

Pour garantir, autant que faire se peut, l'objectivité des douze chrominances de base, nous les avons définies en nous référant au nuancier Pantone (*), catalogue de 593 couleurs échantonnées, universellement utilisées dans les domaines des arts graphiques et de l'imprimerie. Ensuite, nous avons attribué à chacune d'elles, à la fois un nom, aussi simple et précis que possible, et une numérotation (figure 2). Celle-ci va de 0 à 6 en suivant l'ordre naturel du spectre de la lumière visible, c'est-à-dire du rouge au violet, et fonctionne de façon circulaire, de sorte que le numéro 6 est équivalent au numéro 0. Seules les couleurs primaires, rouge-jaune-bleu, et les couleurs secondaires, orange-vert-violet, correspondent à des nombres entiers, tandis que toutes les autres chrominances sont chacune identifiées par un nombre décimal caractérisant leur position par rapport à ces chrominances élémentaires. Ainsi une chrominance définie par le chiffre 4,5 sera-t-elle un bleu-vert, tandis que celle numérotée 2,9 correspondra à un jaune très légèrement orangé.



68.67.68. Le Courrier du CNRS

Règles de choix des couleurs

La numérotation attachée à la normalisation que nous proposons nous permet de programmer le choix des couleurs. En effet, grâce à l'organisation sous-jacente du cercle des chrominances dont elle rend compte, on peut dégager différentes relations permettant de sélectionner plusieurs chrominances harmonieuses entre elles. Nous appliquons les règles d'harmonie des couleurs établies par Johannes Itten (3), d'après lesquelles une combinaison de plusieurs couleurs est harmonieuse à condition que celles-ci soient en équilibre complémentaire, c'est-à-dire telle que si on les mélangeait on obtiendrait la couleur grise. De plus, chaque plage de couleur est séparée des autres par un fond gris, ceci afin d'éviter le phénomène de contraste simultané, car une couleur vue sur un fond coloré est perçue différemment suivant la couleur de celui-ci (3); cette illusion chromatique ne se produit pas par contre si le fond est gris.

Exemple de visualisation

Si, par exemple, on veut colorier plusieurs champs de façon aussi différente que possible, afin de pouvoir les identifier au premier coup d'œil grâce à une palette de couleur propre à chacun — et tout en respectant la convention que les valeurs négatives sont associées à des couleurs froides et les valeurs positives à des couleurs chaudes — la sélection des chrominances devient alors un problème purement algorithmique et peut donc être effectuée automatiquement par un programme, évitant ainsi de faire appel au goût ou à la subjectivité de l'utilisateur. C'est ce qui est illustré par la visualisation de six champs différents, donnant l'état d'un écoulement turbulent bidimensionnel compressible à un instant donné, chaque champ étant caractérisé par une combinaison de trois couleurs, associée à une variation continue de luminance, qui permet de révéler de façon détaillée la structure du champ et ses variations, même les plus faibles (figure 3). L'adoption d'une normalisation pour le choix des palettes de couleur utilisées pour caractériser différents champs, au moins à l'intérieur d'une même discipline, a pour but de faciliter l'interprétation, la comparaison et la diffusion des résultats. Si tout un chacun lit aujourd'hui facilement une carte routière, c'est uniquement par accoutumance à un certain codage des signes et des couleurs employés. Imaginez la difficulté qu'il y aurait à changer de codage à chaque fois que l'on ouvre une nouvelle carte, voire le non-sens qui consisterait à proposer des cartes où l'on ne précisait même pas celui-ci ! C'est la raison pour laquelle il est indispensable de représenter sur chaque image la palette de couleur employée, sinon la visualisation obtenue serait tout bonnement vide de sens car on ne pourrait plus alors l'interpréter. Face au développement des techniques de visualisation de type « raster », une réflexion préalable nous semble essentielle. En effet, si le choix des palettes de couleur est laissé au hasard d'impressions subjectives et changeantes, on court le risque de se laisser abuser par un esthétisme séduisant, mais dénué de contenu informatif et inutile du point de vue scientifique.



Fig. 2 - Cercle des douze chrominances de base normalisées. Les douze chrominances de base sont disposées selon un cercle, de sorte que deux couleurs diamétralement opposées soient complémentaires. La numérotation indiquée permet de programmer la sélection automatique des couleurs, à partir de principes définis a priori. (La Recherche n° 187 avril 1987)

Bibliographie

- (1) Basdevant (CJ) et Farge (M), « Visualisation et animation en calcul scientifique », Séminaire international de l'image électronique, CESTA-SIGGRAPH, Nect, 1986.
- (2) Farge (M), « Normalization of high-resolution raster display applied to turbulent fields », IUTAM European Turbulence Conference, Progress in Physics, Springer-Verlag, 1986.
- (3) Itten (J), Art de la couleur, Denain et Tolra, 1984.

Les expérimentations numériques ont été effectuées grâce au Cray 1 du Centre de calcul vectoriel pour la recherche de Palaiseau, en utilisant le calculateur frontal du Centre inter-régional de calcul électronique du CNRS (CIRCE) à Orsay. Les visualisations ont été réalisées au LACTAMME, école polytechnique et Centre national d'étude des télécommunications en collaboration avec Jean-François Colonna, ingénieur responsable du GSV LACTAMME (Centre de mathématiques appliquées de l'École polytechnique (UA 756 du CNRS) et Centre national d'étude des télécommunications).

(*) Pantone est une marque déposée de Pantone Inc., 55 Knickerbocker Road, Mocoachie, New Jersey, 07074 États-Unis.

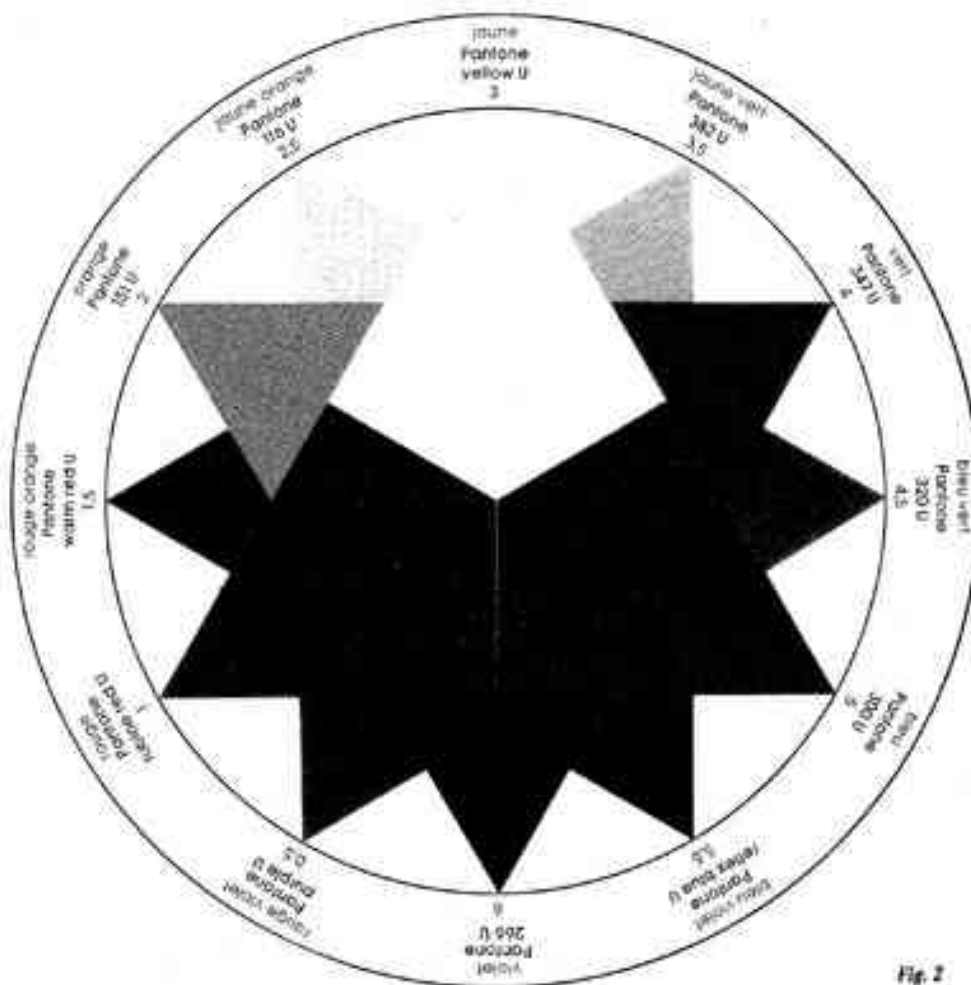
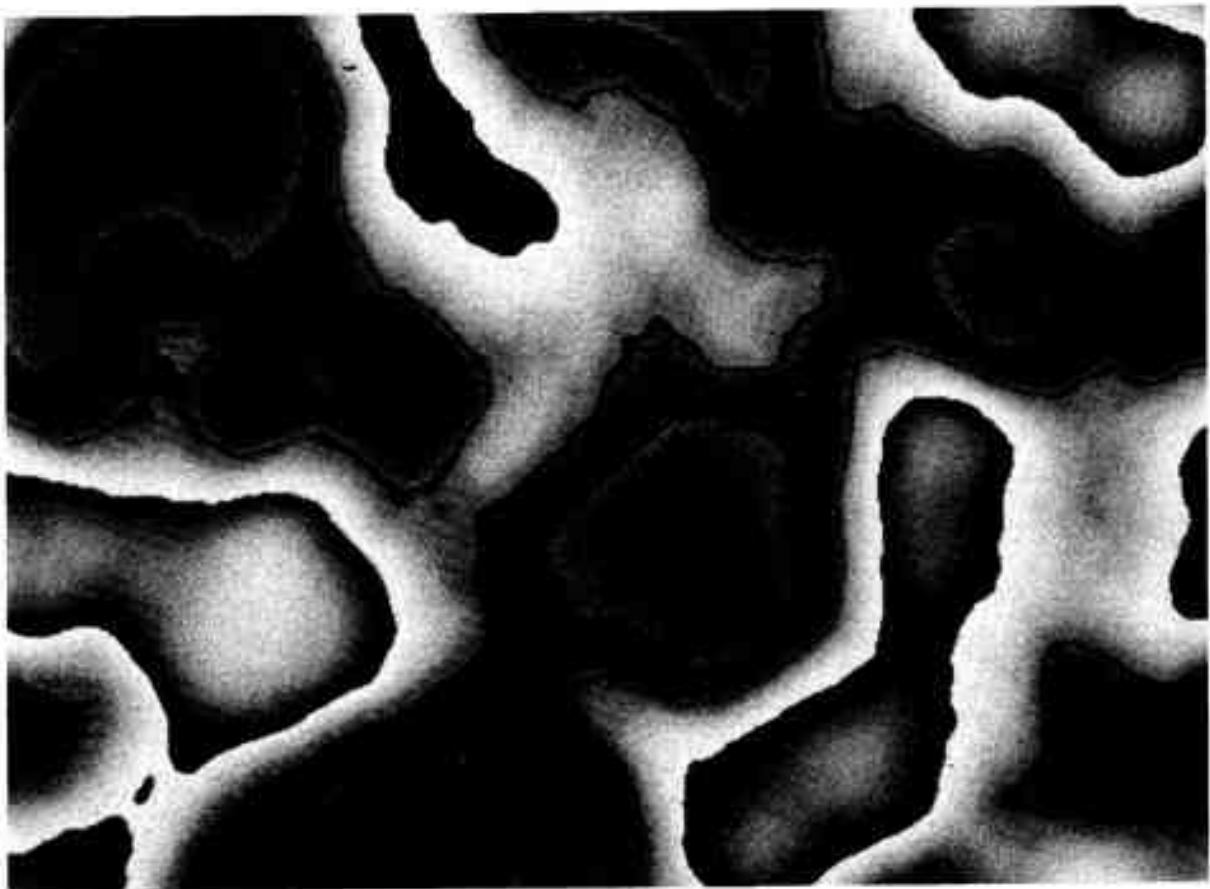
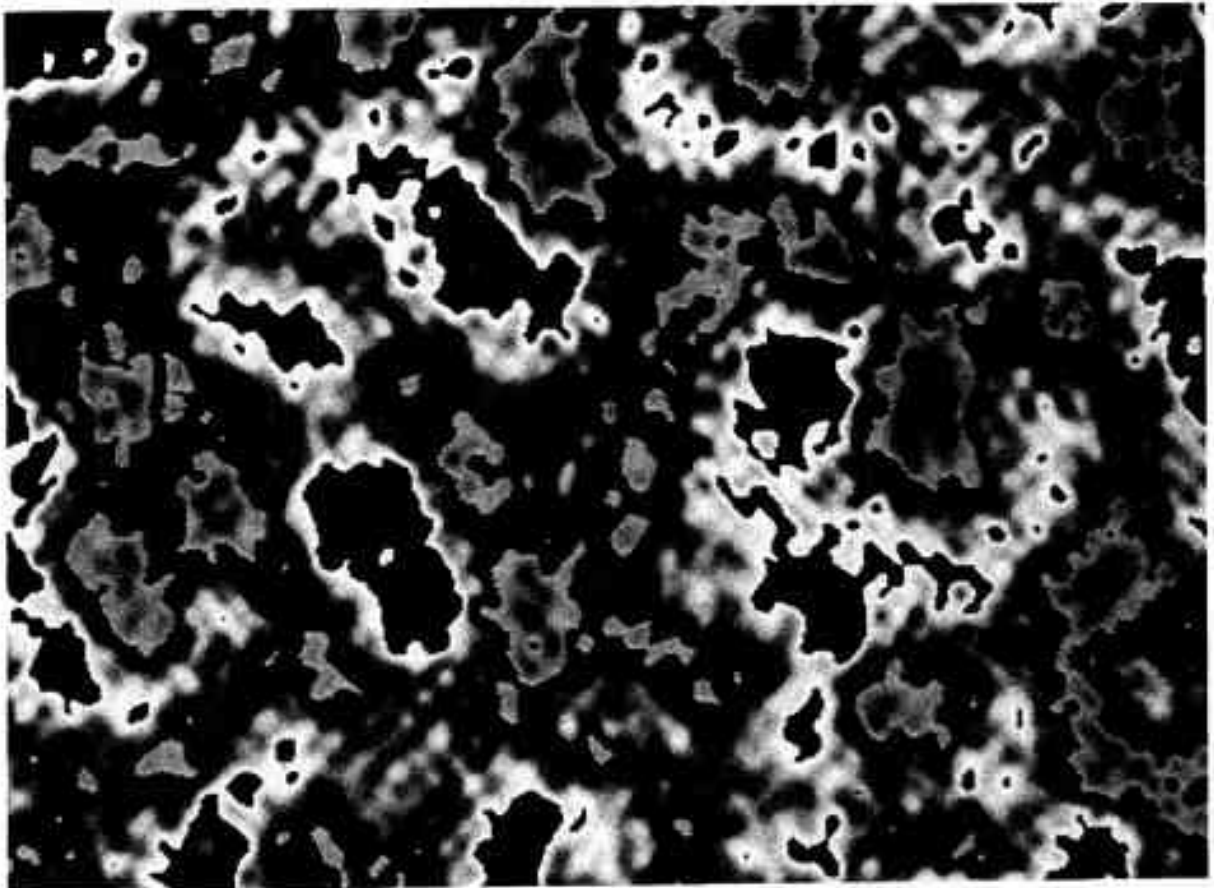


Fig. 2





RÉFLEXION SUR LE TRANSPORT DES IMAGES

Alain Giraud

Transmettre l'image par le biais d'une simple ligne téléphonique numérique est possible aujourd'hui. Mais les perspectives d'images de "haute définition" sont dans la fibre optique.

La fibre optique pour la télévision, je vois bien que c'est commode pour l'image, mais comment faites-vous pour le son ? Eh bien non, vous avez tout faux. L'image n'est jamais transmise telle quelle, c'est-à-dire en deux dimensions ou plus, que par la poste. Avant de la transporter par des procédés de télécommunication, quel que soit le support, câbles ou faisceaux hertziens, on la transforme d'abord en un signal linéaire, un son si vous voulez. Et ça, le son, vous savez comment on le transmet ; enfin, faisons comme si vous le saviez.

Dans l'invention d'Edouard Belin (1912) qui permettait de transmettre des images par radio, il y a déjà tout : le téléphone, la radio transmettent un discours, il faut donc « lire » l'image comme un texte, la concevoir comme une sorte de paragraphe, la diviser en lignes, qu'on « épèle » en modulant le signal par la variation lumineuse lorsqu'on les parcourt.



Fig. 2

Dès lors interviennent des choix plus ou moins arbitraires (nombre de lignes, vitesse de balayage, codage de la luminance, de la chrominance) où se disputent depuis toujours les normes des systèmes (819 lignes, 625 lignes ; PAL, SECAM ; C-MAC* D2 MAC*, etc.). Car il s'agit de produits dont la normalisation conditionne toute une chaîne industrielle et commerciale (production, stockage, transmission, restitution, etc.) et toute une économie, « la guerre des images ».

Alain Giraud, ingénieur en chef au Centre national d'études des télécommunications (CNET), ancien administrateur de TDF (Télédiffusion de France), 38-40, rue du Général-Leclerc, 92131 Issy-les-Moulineaux.



Fig. 1

Une seule image, si l'on veut la reproduire avec une définition convenable, cela fait beaucoup de lignes, beaucoup de signes. Il faut pour la transmettre beaucoup de temps ; et si l'on accélère, une plus grande « bande passante », c'est-à-dire une grande capacité de transmission.

Sur une ligne son comme une liaison phonique, radio ou téléphone, il faut de l'ordre d'une minute pour transmettre une photo (comme en télécopie). Lorsque la ligne est très mauvaise, ce qui est le cas par exemple des liaisons avec les engins interplanétaires, il faut bien davantage.

A l'inverse, si l'on doit aller vite, 24 images par seconde par exemple pour reproduire le mouvement comme à la télévision, alors il faut mobiliser un canal de transmission très rapide, très « large », l'équivalent de toute la bande FM, ou de quelques 500 voies téléphoniques.

Les techniques de traitement numérique permettent de « tricher » avec ces principes. On économise sur la transmission en analysant le contenu de chaque ligne, en éliminant toute information redondante, en ne « signalant » que « ce qui change » par exemple. On arrive ainsi à l'heure actuelle à « comprimer » la télévision jusqu'à la faire transiter sur une simple ligne téléphonique numérisée au prix de quelques dégradations.

On peut aussi s'évader des contraintes actuelles en mettant à profit des supports de plus en plus performants, des fréquences portées de plus en

plus élevées comme les ondes millimétriques par satellite ou infrarouges sur fibres optiques. C'est la perspective de la « haute définition » et sa nouvelle bataille des normes pour le contrôle industriel de l'avenir du cinéma et de la télévision. Une chose est certaine : on consomme de plus en plus d'images, on en transporte donc de plus en plus. La « vidéocommunication », qui bénéficie d'une manière continue de l'incorporation du progrès des techniques, ne fait que naître.

Fig. 1 - De nos jours encore, les images sont transportées principalement par radio. La tour hertzienne de Rouenville, près de Paris, est un centre nodal de transmission du réseau national de Télédiffusion de France, et le siège d'émetteurs locaux. On peut l'imaginer comme une sorte de satellite géostationnaire de télévision à très basse altitude, desservant la région parisienne et relayant les émissions vers ou en provenance d'autres régions.

Fig. 2 - Terminal interactif du réseau de vidéocommunication en fibres optiques de Biarritz. Ce réseau innovateur moine dans le transport, c'est toujours l'image de télévision, que dans l'architecture des liaisons. Contrairement aux réseaux de diffusion, chaque abonné a sa ligne, ce qui permet de faire pour l'image ce que le réseau téléphonique fait pour le son : de ce terminal on peut émettre des images, et « appeler » n'importe quelle source d'image, les programmes de télévision disponibles en tête de réseau, mais aussi des « serveurs » d'image (vidéothèques), voire n'importe quel autre terminal (vidéopostes). Des réseaux de ce type sont en cours d'installation dans plusieurs villes de France : Montpellier, Rennes, Saint-Cloud-Sèvres-Suresnes, Toulon, etc. CNET/CNET.

* Source d'images.

DES IMAGES : POUR QUI ? POUR QUOI ?

Dans chaque discipline scientifique un type d'image spécifique sera interprété par les experts. C'est ce que traitent les premiers textes de ce chapitre.

Les articles de Jean Mermet, Yvon Bressy, Robert Jeansoulin et René Ginouvès donnent des indications sur l'aide qu'apporte l'ordinateur à l'utilisation des images. La représentation d'un objet ou d'un phénomène par une image fournit des informations directement exploitables par la personne regardant cette image. Parfois, ce but n'est pas ou est mal réalisé. On est alors confronté au problème de déterminer l'apport de l'image. Les textes qui suivent concernent ce problème :

- soit de manière directe : l'étude des « images » que fournissent l'écriture (Textes de Daniel Charraut, Jacques Duvernoy, Louis Hay) ; reconnaissance de formes dans l'Univers (Albert Bijaoui) ; image que perçoit un robot (Pierre André, Sylvie Jacqmart).

- soit en élaborant des techniques générales qui considèrent l'image comme un objet d'étude : systèmes experts pour les images (Robert Jeansoulin).



REPRÉSENTATIONS ET SIMULATIONS MOLÉCULAIRES

Jean-Pierre Doucet, Jacques-Emile Dubois, Jacques Weber

Les progrès de l'imagerie moléculaire en chimie et en biologie ouvrent la voie à de nouveaux processus d'interprétation de la connaissance.

Dès sa naissance, l'infographie (création, manipulation et stockage de modèles d'objets et de leurs images à l'aide de l'ordinateur) a trouvé en chimie un champ d'application privilégié. Cet impact n'est pas surprenant. Dans le monde invisible des atomes et des molécules, on étudie et prévoit les comportements moléculaires à partir de représentations symboliques (considérées comme des modèles réels). La chimie s'est dotée dès le 19^e siècle d'un langage symbolique et formel, celui des formules structurales, pour véhiculer l'information moléculaire.

L'engagement orienté à l'origine vers la représentation des données cristallographiques (en particulier pour les macromolécules biologiques) source des distances et des formes géométriques modélisées, le domaine des images de synthèse s'est ouvert à des applications variées. La construction de formes structurales complexes est abordée par l'assemblage de fragments. Ces représentations des squelettes moléculaires sont complétées par la visualisation complémentaire des distributions électroniques, souvent responsables de l'aptitude réactionnelle vis-à-vis d'un site actif. Au modèle « mécanique » des molécules faites d'atomes représentés par des boules de taille et de couleurs variées se sont ainsi ajoutées les représentations en volume des orbitales, atomiques et moléculaires. Ces modèles sont animés d'oscillations locales et de rotations autour de certains axes ou liaisons et les volumes des molécules isolées correspondent alors à des formes transitoires nombreuses.

Au-delà des individus moléculaires, la modélisation dynamique prend aussi en compte l'évolution temporelle des systèmes à l'échelle microscopique (réarrangement, interconversion) et permet d'animer en ligne de véritables scénarios.

Jean-Pierre Doucet, professeur à ITODYS, Jacques-Emile Dubois, professeur à l'université de Paris VII, responsable de l'Institut de topologie et de dynamique des systèmes - ITODYS (UA 34 CNRS), université de Paris VII, 1, rue Gay-de-Lussac, 75005 Paris.
Jacques Weber, professeur à l'université de Genève.

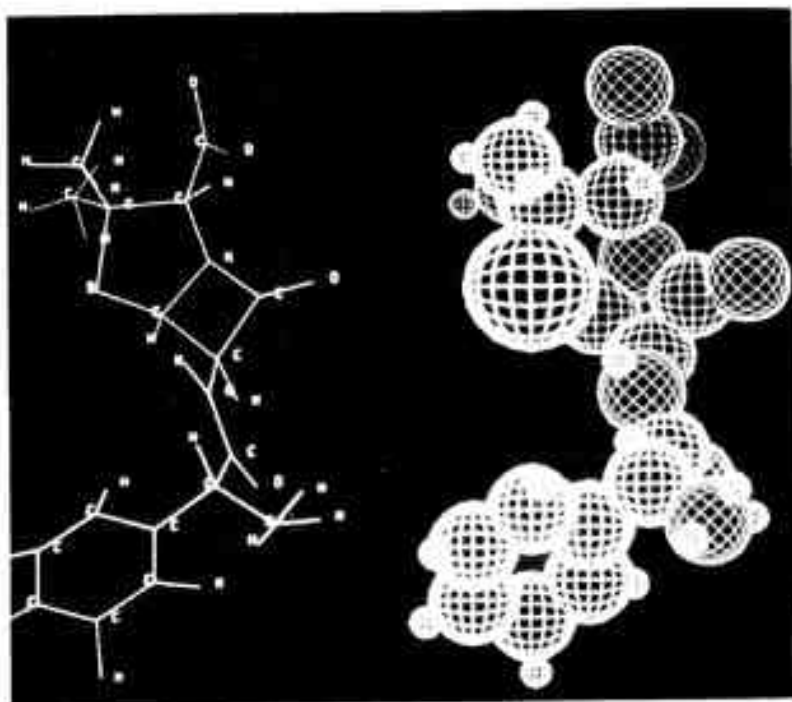


Fig. 1

par exemple d'interaction entre une drogue et un récepteur biologique.

Pour ces descriptions symboliques des entités chimiques, de leurs fragments et de leurs relations d'organisation, réelle ou formelle, de nouveaux langages structuraux ont été créés, étendant et adaptant à la puissance de l'ordinateur la logique et le langage de la chimie structurale.

Dans toutes ces applications, de représentation et de simulation, l'apport du graphique est déterminant. L'image condense sous une forme privilégiée pour notre perception une masse importante d'information, sélectionnant et mettant en valeur les données pertinentes, souvent entouées dans de volumineux listings. L'aptitude à colorier ou à rendre transparentes certaines parties du modèle, à générer celui-ci progressivement ou à le simplifier à la demande, la possibilité de passer rapidement d'un type de représentation à un autre, sont essentielles en raison de la complexité et de la pluralité des aspects de la structure moléculaire (électronique, stérique, dynamique). A la différence des applications graphiques usuelles, représentant les objets réels, les images de synthèse concernent ici des formes conceptuelles structurées, soit à l'aide de primitives soit par algorithmes (génération topologique des formes filaires et colorations fonctionnelles — dites chromatiques — des autres informations moléculaires et électroniques). Il existe un graphique moléculaire interactif nécessaire pour manipuler des objets plus symboliques, plus exprimés par voie théorique que les objets usuels régis par la con-

Fig. 1 - Représentation de type « fil de fer » ou « modèles compacts » de l'aspirine.

ception assistée (pièces mécaniques par exemple). Ces fonctions des formes moléculaires peuvent être utilisées pour exprimer la dynamique moléculaire structurale (ex : inversion de la molécule d'ammoniac ralentie pour être visualisable).

Les formes chimiques et leurs représentations : formes structurales

Les modélisations les plus simples figurent la molécule à partir de l'organisation des atomes constitutifs. Les images fil de fer ou boule-bâton fournissent une perception rapide en 2 ou 3 dimensions (2D, 3D) ou même 2,5 D des relations spatiales entre atomes, alors que les modèles compacts donnent une vision plus réaliste du volume moléculaire (souvent approché par l'union des sphères de Van der Waals). Ces représentations (fig. 1), de caractère géométrique, sont étroitement liées aux recherches de conformations favorisées, en liaison avec l'exploitation de données expérimentales (RX) ou calculées (minimisations d'énergie par mécanique quantique ou moléculaire). Pour les macromolécules trop complexes pour individualiser les atomes, des primitives descriptives (amino-acides symbolisés par leurs initiales) ou picturales (cylindre, ruban...) sont utilisées pour condenser l'essentiel de l'information structurale ou morphologique.

Formes de propriétés

Mais dans le graphique moléculaire, les formes

Des images : pour qui ? pour quoi ?

structurales servent aussi de référentiels géométriques pour localiser les caractéristiques électroniques. Les populations électroniques (totales, ou frontalière) renseignent sur la localisation spatiale des électrons les plus réactifs. Les densités de déformation (entre une molécule et ses atomes constituants) directement comparables aux données rayons X, précisent les structures électrostatiques à partir des transferts d'électrons lors de la formation des liaisons.

Les distributions de charge créent au voisinage de la molécule un potentiel électrostatique. C'est ce que ressent en premier lieu un réactif arrivant. Ce potentiel fournit de la molécule une image électrique plus globale que celles obtenues à partir des populations électroniques.

Pour ces formes, des représentations tridimensionnelles sont accessibles à partir des contours isométriques associés à une valeur donnée de la propriété. Selon le type de système graphique, les domaines de localisation sont limités par une surface enveloppe (fig. 2), à la manière d'une peau (système calligraphique) ou figurés comme des solides compacts à partir de facettes colorées (système à balayage). Des réductions de l'espace de représentation conduisent à des visions simplifiées : carte de type Van der Waals figurant le volume moléculaire, projections sur un plan extérieur à la molécule, etc... Des images composites associent divers types de ces représentations pour visualiser certains aspects complémentaires de la réalité moléculaire. On peut aussi localiser, en première approximation, certaines propriétés liées aux interactions avec l'environnement externe (affinités, solvatophobie, hydrophilie...).

Animation graphique et modélisation dynamique

L'interactivité fournie par certains systèmes graphiques (calligraphiques), assistés en amont par des programmes de simulation, est précieuse pour expliciter l'évolution spatiotemporelle de systèmes chimiques. Pour des processus complexes (vibrations moléculaires, interconversions ou fluctuations autour d'une position moyenne, réarrangements) on peut visualiser en vision ralentie les modifications géométriques mais aussi leurs implications énergétiques. On donne à l'évolution spatiotemporelle les moyens de la vision graphique dynamique dans le but de pouvoir perturber de façon interactive le système pour évaluer ses réactions visualisées en direct.

Un autre champ important d'applications concerne l'étude des interactions moléculaires, par exemple dans un système « drogue récepteur ». On assimile ces problèmes à ceux de la reconnaissance de formes, base des transferts d'informations. La recherche d'une adéquation des surfaces moléculaires fournit une première voie d'interprétation structurale par la détermination d'indices quantitatifs (volume, surface, surface accessible) dont la vision graphique peut être conduite localement. Les propriétés électroniques constituent également des éléments essentiels. Ainsi, le potentiel électrostatique donne de la molécule l'image d'un « volume électrique » non directement lié à sa forme géométrique, et précise les zones privilégiées d'attaque. Il est essentiel de pouvoir comparer de façon très flexible les diverses formes moléculaires afin de déceler les similarités pré-existantes et leurs réponses

à des modifications internes ou externes. L'accès à des procédures de transformations géométriques, d'analyse de formes par opération booléennes sur des représentations graphiques conceptuelles permet la mise en œuvre de véritables stratégies de simulation associant des approches (corrélation, modélisation, visualisation) se confortant mutuellement.

Objets chimiques et langages structuraux (Code DARC)

La chimie peut être abordée par les traitements de l'informatique classique, mais elle peut aussi conduire à une informatique bâtie sur certaines représentations vectorielles chimiques. L'informatique chimique a eu, parmi ses champs d'application, celui de la documentation. À partir des formules graphiques et des noms systématiques (Chemical Abstracts), la gestion de la taxonomie de la chimie et de ses énormes fichiers est effectuée à l'aide d'un langage complexe (BASIC, CAS). Les composés sont codés en descripteurs matriciels à l'aide d'un dictionnaire de fragments usuels. Avec le système DARC (1966-19...) le langage naturel d'interaction chimiste-ordinateur est celui de la formule : tous les dialogues sont centrés sur l'imagerie moléculaire. Dans ce système,

Fig. 2 - Représentation tridimensionnelle du potentiel électrostatique moléculaire pour la monovalente (halocimène). En orange, enveloppe repulsive figurant les contours atomiques ; en bleu, zones de potentiel attractif (pour un proton) localisées au voisinage des atomes d'oxygène et d'azote. Des assistants graphiques locaux, écrantage (éclouage) partiellement le squelette moléculaire, illusion de profondeur, accentuent la sensation de relief.

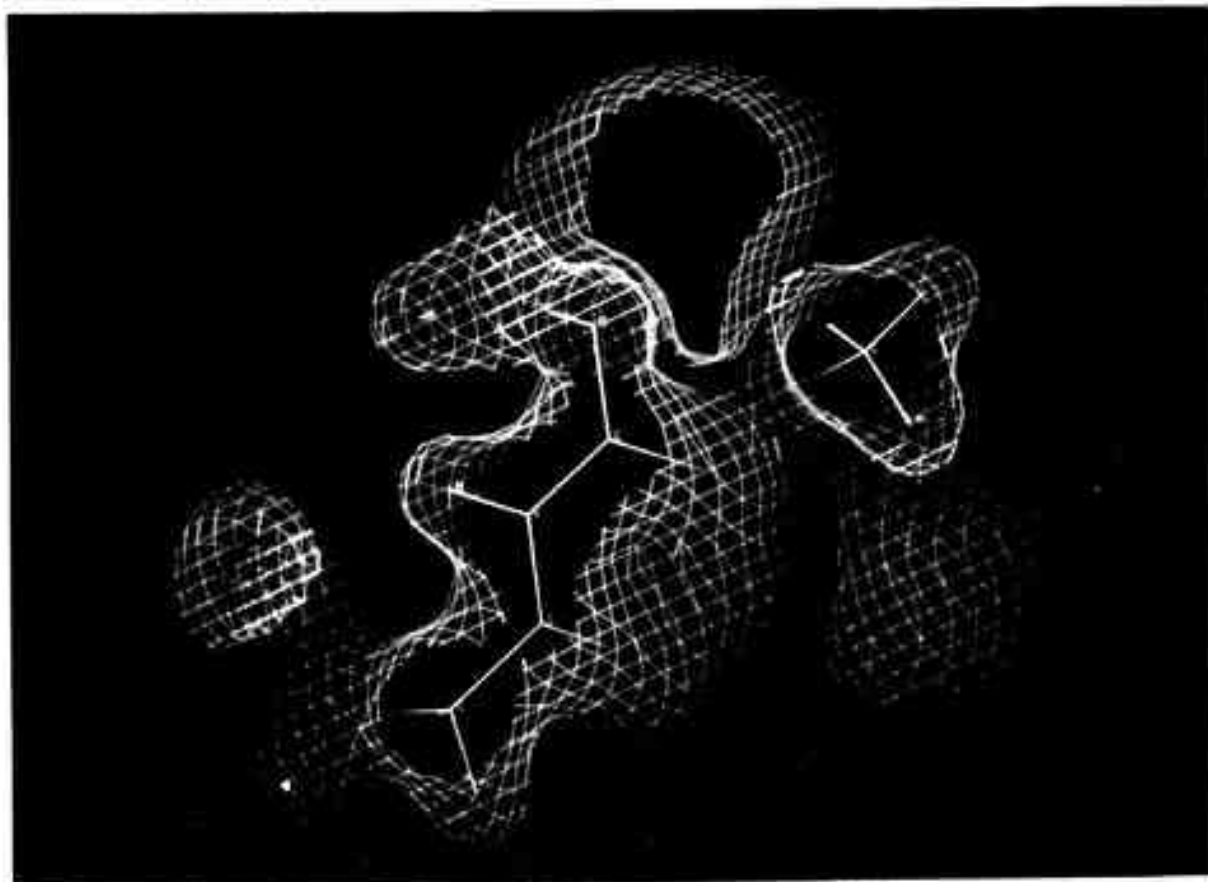
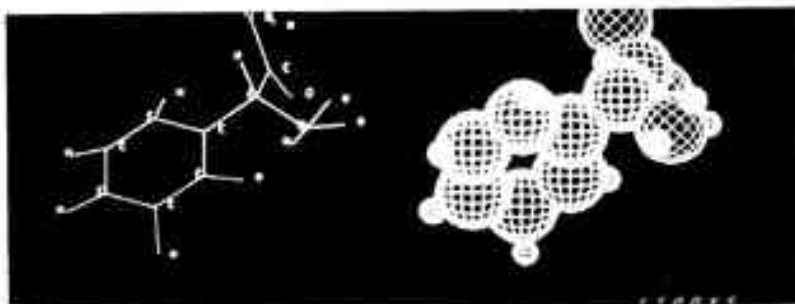


Fig. 2

Des images pour qui ? pour quoi ?



la structuration des espaces sémantiques (molécules et populations) est fondée sur une organisation géométrique en sous-espaces concentriques et sur une hiérarchie interne des modules définis. Ainsi sont bien établies des relations claires au niveau local (sous-structure, SS), à celui des entités (ordre des sites, S) ainsi qu'à celui des populations (hiérarchie externe des entités, HS).

Tous ces concepts sont concrétisés à l'aide de graphes plus ou moins colorés et de leurs matrices connexes (fig. 3). Par ces graphes on associe tous les éléments essentiels des grandes représentations de la chimie : celle, topologique, de la chimie structurale, et celles de la mécanique quantique et de la mécanique moléculaire.



Les simulations visuelles retrouvent leurs points d'application à l'échelle moléculaire. Le graphique moléculaire interactif en devient l'outil central de commande et de contrôle. Il est le traducteur des résultats les plus théoriques, parfois hermétiques dans leurs expressions chiffrées. Il réalise le lien entre l'approche formelle et l'intuition des faits chimiques, biochimiques ou biomédicaux.

L'imagerie est un des éléments dont on prophétise l'intérêt et le développement dans la prochaine révolution de l'informatique (3^e génération). En chimie et en biologie, les progrès de l'imagerie moléculaire conduiront à des représentations interactives mais de plus, ces images et graphiques ouvriront la voie à de nouveaux processus d'interprétations cognitives de la connaissance.

Fig. 3 - Hyperstructure de génération des alcanes du méthane à $C_{10}H_{22}$, chaque nœud de ce graphe correspond à un composé. Une telle hyperstructure espace de classification et de représentation localise chaque composé à l'intérieur d'une population et permet de gérer aisément les relations de proximité ou d'antériorité.

« Les molécules attendaient l'ordinateur depuis la nuit des temps. »

(film 35 mm de 16 mm, durée 24 minutes)

Ce film illustre l'intérêt des concepts électroniques et moléculaires dans les théories chimiques. Une attention particulière est portée aux représentations graphiques et aux modèles de simulation. Parmi les thèmes traités :

— Une molécule, qu'est-ce que c'est ?

(mouvements internes des molécules, représentations atomiques et orbitales, potentiels électrostatiques).

— Communication entre chimiste et molécules :

- construction d'une protéine (isozyme)

- langage DARC et concepts de structure, sous-structure, hyperstructure.

— Conception assistée par ordinateur et intelligence artificielle.

- Analyse spectrale et élucidation structurale.

— Phénomènes de la vie et hypothèses moléculaires :

- reconnaissance de formes adaptation et adéquation des formes. Similarités structurales ou électroniques. (Ex. mescaline, LSD, méthotrexate...).

Ce film a permis de produire une bande courte La vie intime et sociale des molécules qui a reçu le Fisa d'or au Festival international du scoop d'Angers.

Réalisateurs :

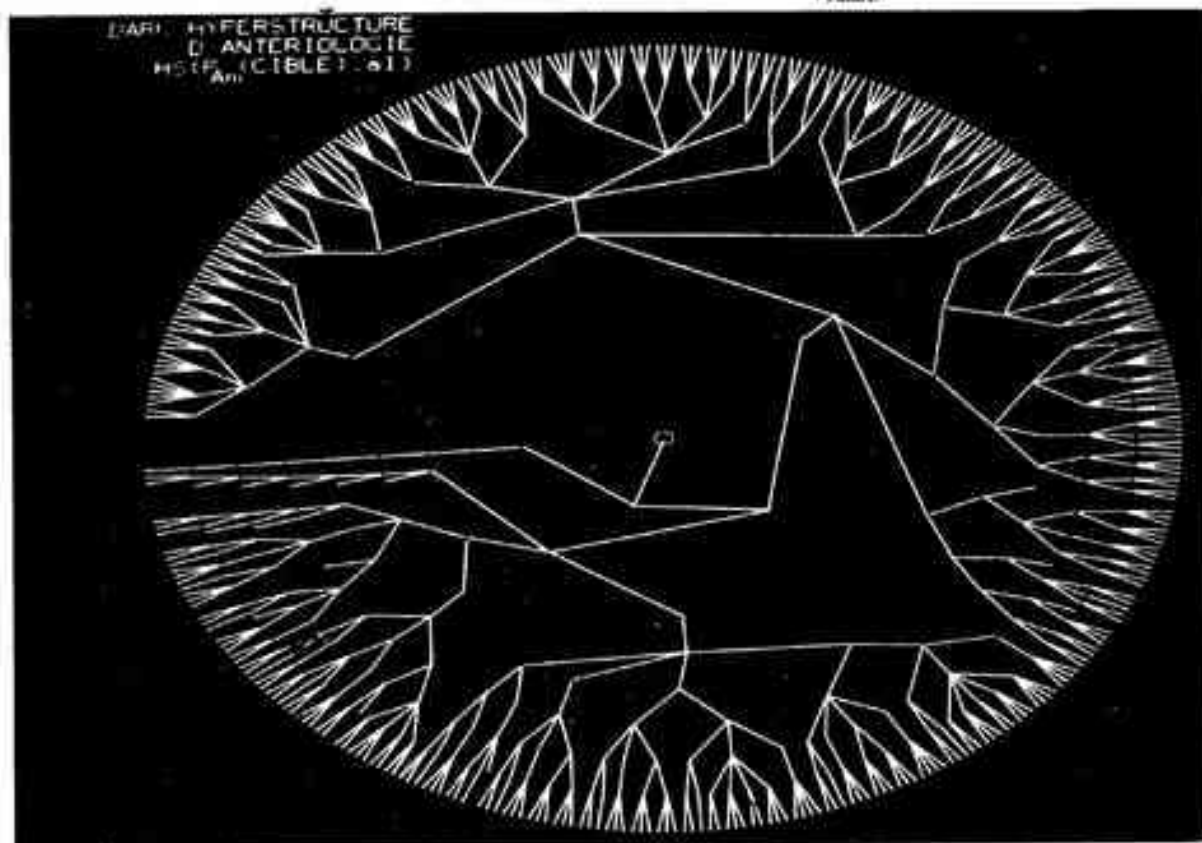
Jacques-Emile Dubois et Stanislas Stanojevic

Conseillers scientifiques :

Jean-Pierre Doucet, Annick Panaye, Sissi Yvé.

Assistants en graphique :

Thierry Comeston, David Nebeker, Anne-Marie Pinart.



Des images pour qui ? pour quoi ?

LES IMAGES DU CHIMISTE

FAUSSES « CLÉS » POUR DES SITES RÉCEPTEURS DE COMPOSÉS BIOACTIFS

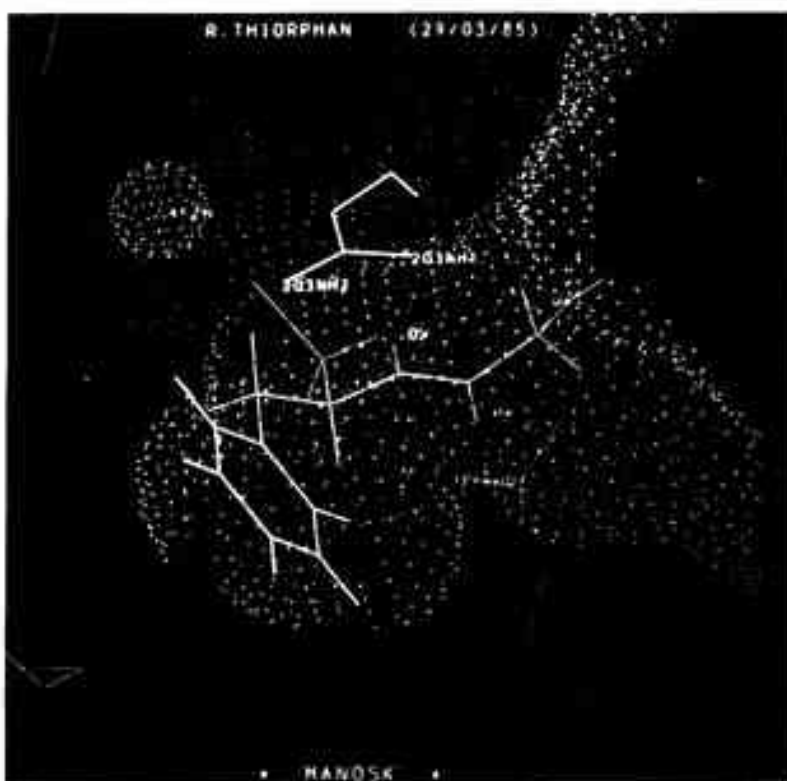
Bernard - P. Roques

Les méthodes physiques et le graphisme moléculaire sont désormais couramment utilisés pour améliorer l'accès à des molécules biologiquement actives.

Le fonctionnement de la cellule et les communications intercellulaires impliquent des processus de reconnaissance précise entre messagers chimiques (neurotransmetteurs, hormones, etc.) et cibles macromoléculaires (récepteurs, enzymes, DNA...). L'étude de ces mécanismes d'interaction et de leur spécificité nécessite l'utilisation de méthodes physico-chimiques d'analyse structurale telles que la RMN, les rayons X, associées le plus souvent à des calculs d'énergie conformationnelle ou de dynamique moléculaire.

La visualisation graphique, sur écran d'ordinateur, de la structure tridimensionnelle des sites actifs des macromolécules et des conformations biologiquement actives d'effecteurs naturels ou synthétiques, conduit désormais à une conception logique des molécules capables d'activer ou d'inhiber un processus biochimique défini. Cette démarche a été suivie lors de la mise au point d'inhibiteurs puissants et sélectifs de l'enzyme endopeptidase EC 24.11), une métallo-enzyme à zinc qui contrôle l'action physiologique des enképhalines en clivant ces peptides opioïdes cérébraux en deux fragments inactifs Tyr-Gly-Gly et Phe-Met (ou Phe-Leu).

La mise au point d'inhibiteurs de l'enzyme endopeptidase représentait une voie nouvelle pour étudier le rôle physiologique des enképhalines endogènes et accéder éventuellement à un nouveau type d'analgésie « naturelle ». De tels inhibiteurs ont été conçus en utilisant comme modèle le site actif de la thermolysine, une métallopeptide également capable de dégrader les enképhalines et dont la structure tridimensionnelle (seule ou complexée avec divers inhibiteurs) est connue à l'échelle atomique grâce à des travaux de cristallographie aux rayons X. L'enzyme endopeptidase vient d'être clonée et sa séquence peptidique déterminée. Bien que constituée de 750 acides aminés contre 316 à la thermolysine, il existe de nom-



breuses analogies au niveau du site actif de ces deux métallopeptidases. Par conséquent, même en l'absence de données cristallographiques sur l'enzyme endopeptidase, on peut reconstituer son site actif en s'appuyant sur la structure de la thermolysine et visualiser sur écran graphique les interactions entre un inhibiteur et l'enzyme.

Dans le cas des inhibiteurs à fonction thiol tels que Thiorphan $\text{HS-CH}_2\text{-CH}(\text{CH}_2\text{-})\text{CONH-CH}_2\text{-COOH}$, les deux stéréoisomères sont équiactifs alors que dans le cas de l'isomère rétro-inverso rétrothiorphan $\text{HS-CH}_2\text{-CH}(\text{CH}_2\text{-})\text{NHCO-CH}_2\text{-COOH}$, l'isomère R est 200 fois plus actif que le S. La figure montre que toutes les interactions stabilisatrices (liaison hydrogène, Van der Waals, hydrophobes...) entre l'enzyme et le Thiorphan R sont assurées.

Dans le cas du rétrothiorphan S, toutes les

Visualisation sur écran graphique de l'inhibiteur d'enzyme endopeptidase Thiorphan R dans le site actif de la thermolysine (d'après les coordonnées aux rayons X). En bleu, l'atome de zinc vers lequel pointe le groupement thiol, en rouge. En dépit de leur taille différente, les deux métallopeptidases enképhalinase (750 acides aminés) et thermolysine (316 acides aminés) présentent de nombreuses analogies structurales au niveau du site actif.

interactions stabilisatrices ne peuvent être assurées sur ce modèle de site actif. Ces molécules ont largement contribué à la détermination du rôle physiologique des enképhalines montrant comme espéré une action analgésique. Cette approche moléculaire de la pharmacologie appuyée sur les méthodes d'analyse structurale et de graphisme moléculaire va transformer profondément la recherche pharmaceutique dans les prochaines années.

Bernard-P. Roques, professeur à l'université de Paris V, responsable de l'unité associée « Synthèse et étude des conformations et interactions de modèles biologiques et pharmacologiques » (UA 398 CNRS, INSERM U 266), université de Paris V, UER des sciences pharmaceutiques et biologiques, 4, avenue de l'Observatoire, 75270 Paris Cedex 06.

Des images : pour qui ? pour quoi ?

L'IMAGERIE MÉDICALE : UN MÊME ORGANE, PLUSIEURS TECHNIQUES D'IMAGES

Michel H. Bourguignon, Héric Valette, Dominique Leguludec

Les nouvelles techniques d'imagerie médicale, souvent complémentaires, transforment le diagnostic et la pratique médicale.

Les techniques d'imagerie médicale usuelles sont au nombre de quatre. Elles utilisent les rayons X (radiologie), les rayons gamma (médecine nucléaire), les ultrasons (échographie) et les champs magnétiques (imagerie par résonance magnétique nucléaire). Toutes ces techniques permettent la visualisation des organes mais les qualités intrinsèques et le sens médical des images obtenues dépendent fondamentalement du principe physique utilisé. Aucune technique n'est universelle : celle qui est performante pour un organe ou une fonction de cet organe le sera moins pour un autre et inversement. Parce que les maladies cardiovasculaires représentent l'une des causes les plus importantes de mortalité dans notre pays, le cœur est un organe particulièrement étudié par imagerie médicale. Il présente également une double fonction métabolique et hémodynamique permettant d'illustrer au mieux ce chapitre.

La radiologie

C'est la plus ancienne des techniques, encore et toujours en évolution. Dans un premier temps, elle a permis de visualiser par projection simple sur un film photographique les différences de densité au sein d'un tissu ou de différents organes entre eux après atténuation d'un faisceau calibré de rayons X. Dès ce stade, la performance sans équivalent de la radiologie lui est venue de sa résolution spatiale inférieure au millimètre permettant la mise en évidence de petites anomalies parenchymateuses ou osseuses. En revanche, cette radiologie conventionnelle n'a pas permis de distinguer de faibles différences de densité, du myocarde et du sang par exemple.

L'utilisation de produits de contraste iodés a permis l'opacification vasculaire et cavitaire ventriculaire. Lorsque le produit de contraste est injecté dans le secteur vasculaire, des clichés sont pris à cadence cinématographique de son dépla-

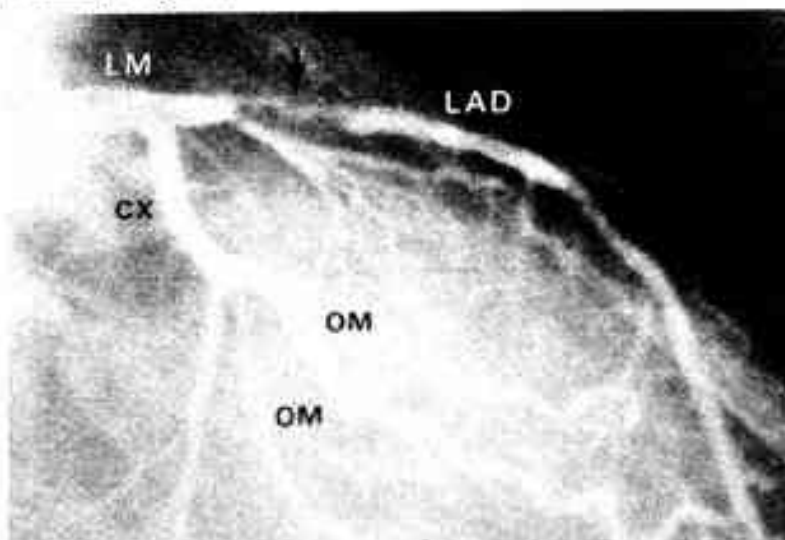


Fig. 1 - Opacification de la couronne gauche en oblique antérieure droite. Longue sténose (rétrécissement) irrégulière de l'artère interventriculaire antérieure (LAD). L'artère circumflexe (CX) et ses branches marginales (OM) sont normales (D. SIFT).

cement sanguin. L'angiocardigraphie et l'angiographie des artères coronaires sont des techniques très performantes servant toujours de référence en cardiologie. Elles permettent la visualisation avec précision du mouvement des parois ventriculaires, de l'état anatomique des artères coronaires (fig. 1) et le calcul approché du volume ventriculaire. Elles ne permettent pas d'évaluer une quelconque fonction métabolique du cœur. Parce qu'elles nécessitent un cathétérisme cardiaque, ces techniques sont dites « invasives » ; elles sont pratiquées chez des malades hospitalisés et ne sont pas facilement répétables.

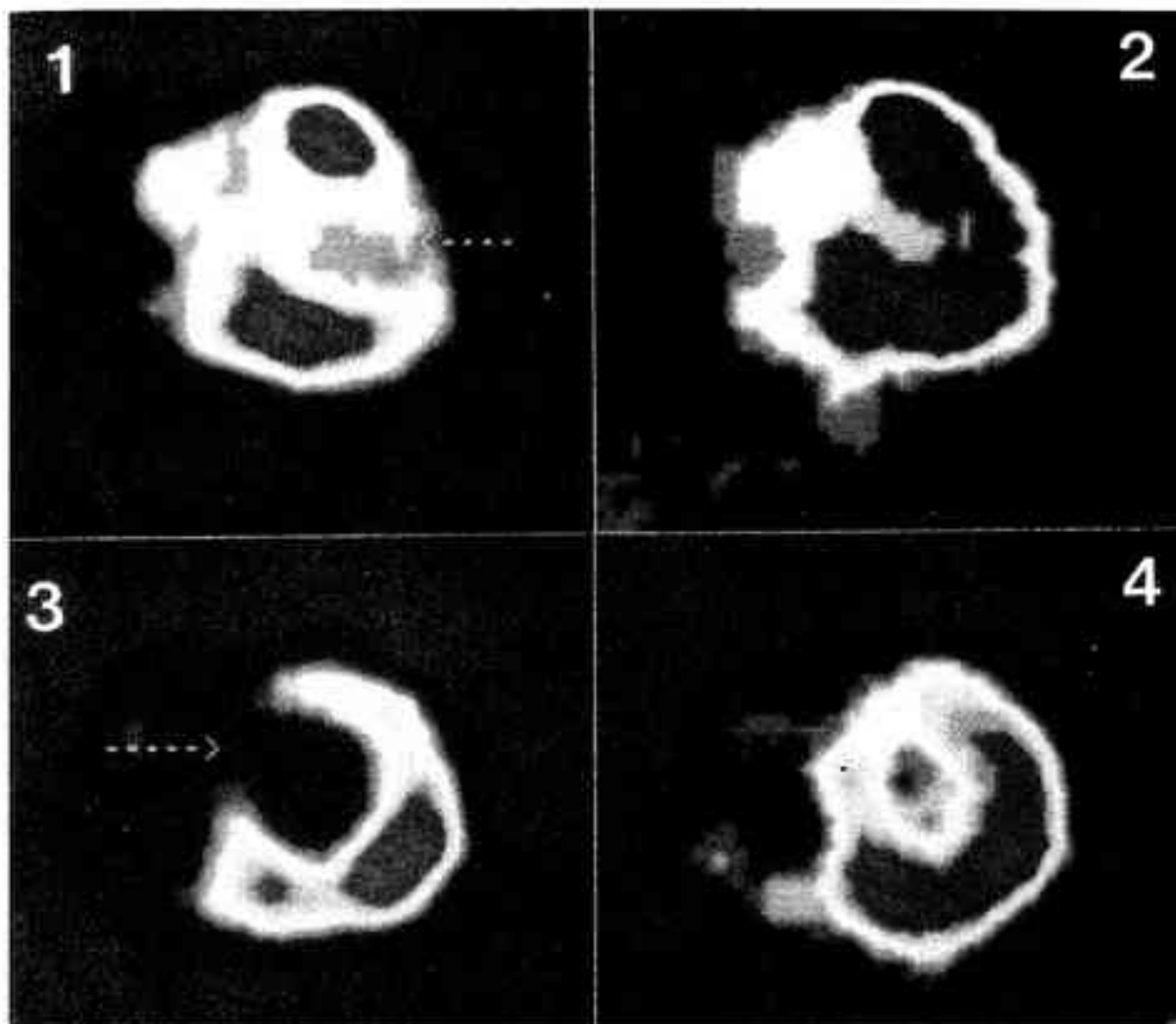
L'apport de l'informatique en radiologie est récent mais déjà considérable. Tout le monde a entendu parler du « scanner » ou tomodesitométr. Cet appareillage numérise les images radiologiques et reconstruit des images en coupes tomographiques à partir de l'ensemble des images obtenues sous toutes les incidences autour du corps. Ces images sont nouvelles et plus précises car libres des superpositions présentes au sein des images classiques. En cardiologie, l'apport de la numérisation se concrétise actuellement de deux façons différentes. En angiographie numérique simple, les images doivent être obtenues à une cadence suffisamment rapide pour démontrer le passage fugitif de produit de contraste en migration. La cadence optimale de 50 à 80 images par seconde, la durée de chaque image n'étant que de 3 millisecondes (msec), n'est pas encore atteinte pour des raisons techniques et financières. La tomodesitométrie cardiovasculaire à cadence rapide est en voie d'émergence. En l'absence de produit de contraste, les coupes tomographiques cardiaques sont floues car chaque projection dure 30 msec environ, temps pendant lequel le cœur a bougé. En présence de produit de contraste, on peut diminuer le temps de pose de chaque projection tout en gardant un

bon rapport signal sur bruit ; en revanche, on ne sait visualiser qu'une petite portion de l'espace, tel un segment d'artère. Nul ne peut encore dire ce que sera la radiologie de demain. Avec des images numérisées de bonne qualité, obtenues aux cadences voulues, les algorithmes de traitement de signal permettront de créer des images fonctionnelles très utiles en cardiologie. La radiologie cardiovasculaire restera certainement en pointe dans le secteur de l'hémodynamique.

Michel H. Bourguignon, médecin ingénieur, Service hospitalier Frédéric Joliot, Département de biologie du Commissariat à l'énergie atomique, 4, place du Général-Leclerc, 91406 Orsay.

Héric Valette, cardiologue, Laboratoire d'explorations cardio-vasculaires, Hôpital de Bicêtre, 94270 Le Kremlin-Bicêtre.

Mme Dominique Leguludec, cardiologue, chef de clinique-assistant, service de cardiologie, Hôpital Antoine Béchère, 92141 Clamart Cedex.



La médecine nucléaire

Les images obtenues par les techniques isotopiques mises en œuvre dans le domaine de la médecine nucléaire sont des images de la distribution spatiale au sein d'un organe d'un isotope radioactif injecté dans l'organisme. Cette distribution a un sens car d'une part le vecteur sur lequel est fixé l'isotope ou la molécule marquée par l'isotope ont un devenir physiopathologique clair ; d'autre part, le traceur étant injecté à dose infra-toxicité, s'insère dans le métabolisme sans toxicité et sans perturbation des équilibres métaboliques. Ce type d'imagerie est particulièrement original et unique car il permet l'investigation d'une fonction biochimique ou biophysique des organes. En effet un même organe peut être étudié par plusieurs traceurs différents permettant de réaliser autant d'images différentes et de mesurer des fonctions différentes. Les deux problèmes clés sont : d'ordre chimique avec la sélection de traceurs appropriés pour l'étude d'une fonction et d'ordre physique avec la quantification très difficile de l'activité en trois dimensions et en fonction du temps au sein de l'organe.

• Le défi d'ordre chimique est lié au fait que tous les isotopes radioactifs ne sont pas utilisables chez l'homme. Les isotopes utilisés doivent émettre un rayonnement γ ou X et être de période

courte (quelques heures) pour ne pas irradier l'organisme de façon conséquente. En pratique cardiologique, on utilisera le Tc^{99m} (technétium) de période 6 h et le Tl^{201} (thallium) de période 72 h. Le Tl est un corps simple qui a la propriété extraordinaire sous la forme Tl^+ d'être extrait à plus de 95% par le myocarde lors de la première traversée du produit dans les artères coronaires. Son taux de fixation est donc proportionnel au débit coronaire et les images obtenues représentent en quelque sorte une vue instantanée de ce débit. L'application de cette technique à l'étude de la maladie coronarienne est très répandue car très performante et non effrayante (fig. 2).

Le Tc^{99m} est solidement fixé sur un échantillon de globules rouges du patient permettant la visualisation des cavités cardiaques ventriculaires (fig. 3). La radioactivité étant proportionnelle au volume, c'est la fonction ventriculaire qui est ainsi simplement visualisée.

Les constituants fondamentaux des organismes vivants étant ceux de la chimie organique (carbone, oxygène, hydrogène, azote), il semblerait qu'une façon simple de fabriquer des indicateurs nucléaires serait de substituer un noyau quelconque par un isotope radioactif du même élément. En pratique, cela a été et est encore difficile à

Fig. 2 - Scintigraphies du muscle cardiaque au thallium 201

1. Image obtenue en face antérieure. La flèche indique une anomalie de vascularisation du myocarde antérieur à l'effort.
2. Cette anomalie disparaît à la 4^e heure.
3. Image obtenue en oblique antérieure gauche à 40° à l'effort. Il existe une anomalie de vascularisation septale indiquant une anomalie de l'artère coronaire.
4. À la 4^e heure on observe une minimisation des anomalies de perfusion (cf. SHF).

réaliser car les éléments radioactifs de la chimie organique utilisables *in vivo* nécessitent des moyens de production de très haute technicité (cyclotron...), ont une période très courte et une énergie de rayonnement élevée. Néanmoins les résultats obtenus en recherche par cette technique très récente de « tomographie par émission de positons » démontrent la possibilité d'une investigation très fine et sans égale du métabolisme physiologique et physiopathologique des organes humains *in vivo*.

• Le défi d'ordre physique est tout aussi important. En effet, la résolution des systèmes détecteurs utilisés est de l'ordre du centimètre, et le gain de quelques millimètres de résolution est

Des images : pour qui ? pour quoi ?

techniquement difficile. La distribution isotopique démontrant une fonction métabolique, seule une bonne quantification de l'activité spatiale permet de mesurer une fonction. Dès l'avènement de l'informatique, les images de médecine nucléaire ont été numérisées et traitées, aboutissant à la création d'images fonctionnelles. Par exemple en cardiologie, une analyse temporelle de Fourier des images des cavités cardiaques a permis de quantifier à la fois amplitude et synchronisme de la contraction ventriculaire de façon très simple et sans égale (fig. 3). C'est surtout en tomographie qu'une quantification relative de la distribution d'activité d'une image ne suffit plus. La quantification absolue impose une correction parfaite de l'atténuation que subissent les photons lors de leur traversée du corps à partir du lieu d'émission. Cela nécessite en fait qu'une tomodensitométrie soit réalisée, compliquant singulièrement la méthode. La médecine nucléaire a devant elle un bel avenir car elle est la seule qui soit capable actuellement d'atteindre une fonction métabolique *in vivo* de façon non effractive.

L'échographie

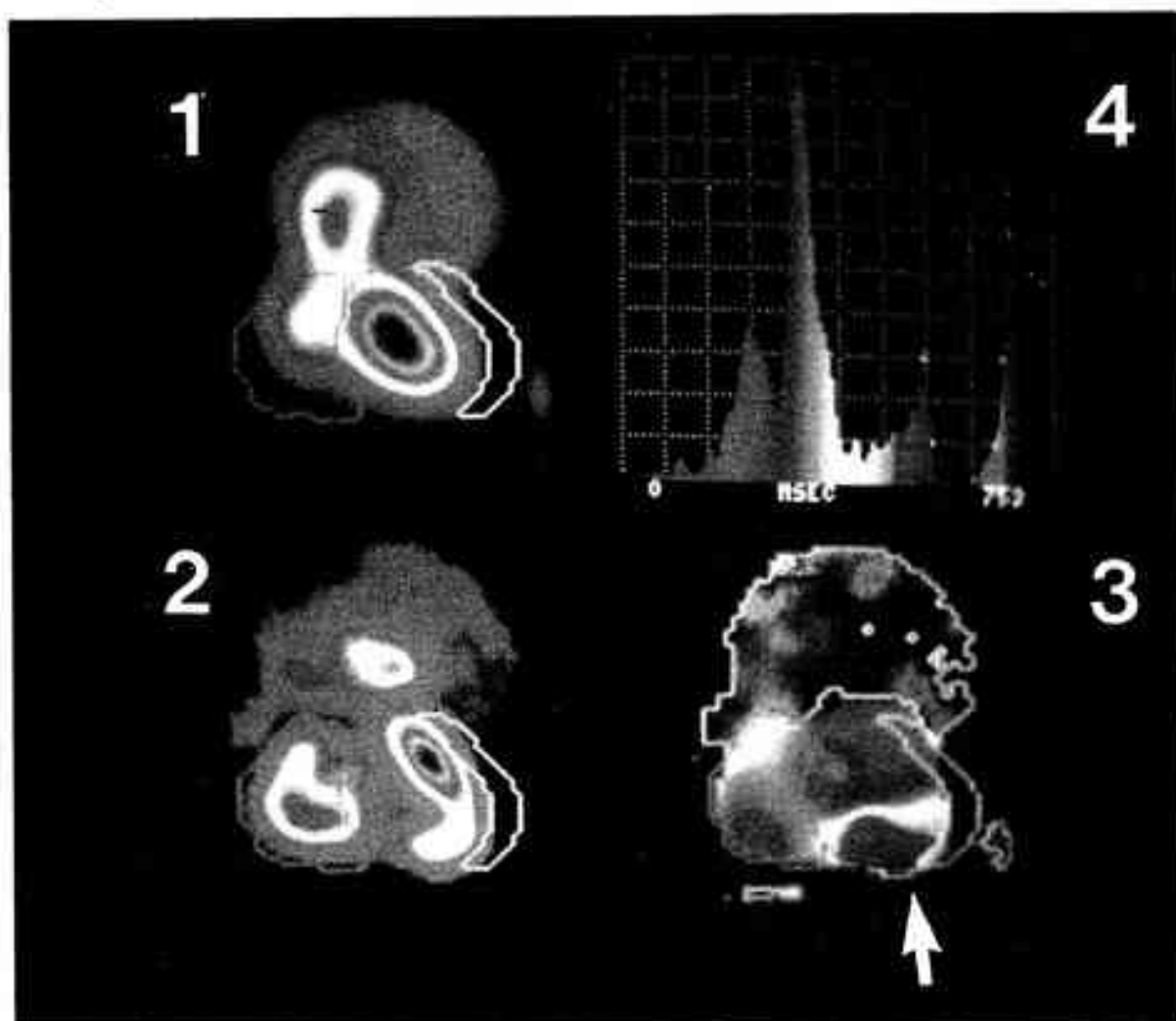
Les dix dernières années ont vu un développement fantastique de la technologie et de l'application de l'imagerie médicale à l'aide des ultrasons.

L'onde ultrasonore est une onde mécanique qui se propage dans les tissus parenchymateux humains où elle subit une réflexion partielle (écho) à chaque interface acoustique. Cette technique d'imagerie non effractive bénéficie d'une série de coïncidences fortuites favorables en ce qui concerne les propriétés acoustiques des tissus biologiques. Tout d'abord, la vitesse de propagation des ondes acoustiques longitudinales est à peu près la même, quel que soit le tissu mou humain et elle ne dépend que très légèrement de la fréquence (1 à 20 MHz). La distance parcourue par l'onde acoustique peut donc être calculée précisément. La résolution est au mieux d'une longueur d'onde pour les ondes habituelles. En second, les changements brusques des propriétés acoustiques des tissus aux frontières des organes et de toute autre interface sont la source des échos utilisés pour la construction des images.

L'impédance acoustique, produit de la densité du tissu par sa vitesse de propagation du son, permet de séparer les différents tissus. Comme les différences d'impédance acoustique des différents tissus mous humains sont petites, les échos à leurs frontières sont faibles mais néanmoins détectables. Une grande partie de l'énergie ultrasonore est transmise au milieu suivant et ainsi de suite. Les systèmes d'imagerie ultrasonographi-

ques construisent les images des différentes discontinuités acoustiques dans un plan de coupe mais les signaux recueillis sont d'autant meilleurs que l'interface acoustique a été observée perpendiculairement à sa surface. En cardiologie, les interfaces entre muscle ou valves cardiaques et sang sont favorables. En revanche, du fait de la grande différence entre tissus mous et air ou tissus mous et os, une grande partie de l'énergie ultrasonore est réfléchie par ces interfaces, ne permettant pas d'obtenir d'information concernant des structures plus profondes. Par exemple, l'évaluation cardiaque d'un patient au passé pulmonaire chronique avec une distension aérienne thoracique importante, peut être difficile voire impossible. La technique est difficile à mettre en œuvre en cardiologie du fait de la présence des côtes dans la paroi thoracique, limitant les voies

Fig. 3. Scintigraphies des cavités cardiaques aux ^{99m}Tc (globules rouges) marquées au technétium ^{99m}Tc .
1. Image statique en oblique antérieure gauche à 30° montrant une dilatation ventriculaire gauche.
2. Amplitudes de la contraction ventriculaire (1^{re} harmonique de Fourier temporelle).
3. Synchronisation de la contraction ventriculaire (phases de la 1^{re} harmonique de Fourier) : la flèche indique une zone d'opposition de phase correspondant à un anévrysme (dilatation) ventriculaire.
4. Histogramme des phases (0-360°).



Des images : pour qui ? pour quoi ?

de pénétration possible des ultrasons. De plus, l'imagerie ultrasonore est éminemment dépendante de l'opérateur qui utilise l'instrument. Il doit interpréter en temps réel la modification que l'onde ultrasonore subit lors de sa transmission et optimiser l'information par un positionnement correct de la sonde et de touches de contrôle. Ce type d'examen ne peut être effectué que par un spécialiste entraîné. Malgré ses limites, il n'en reste pas moins que l'imagerie ultrasonore est une méthode de choix en cardiologie. Elle permet au cardiologue de visualiser rapidement dans son cabinet le mouvement des parois ventriculaires, et surtout des valves cardiaques (fig. 4). C'est là une application unique pour cette technique d'imagerie. Il faut encore noter que la meilleure représentation des images ultrasonores en cardiologie est une visualisation cinématique et non statique.

Le futur de cette technique se développe dans les directions suivantes :

- La numérisation qui permettra une analyse mathématique des images. Celle-ci est actuellement difficile du fait d'une certaine discontinuité des signaux décrivant les limites d'interface, liée à la technique même. C'est là que l'on s'aperçoit que l'œil et le cerveau de l'opérateur constituent une part importante et souvent oubliée des processus d'imagerie. La visualisation en 3-dimensions est bien entendue en cours d'étude.
- L'adjonction de la mesure des vitesses sanguines par effet Doppler permet d'ores et déjà de faciliter l'interprétation des images, de calculer les gradients de pression transvalvulaires et d'apprécier d'éventuelles régurgitations. La mise en image des flux intracavitaires que réalise le Doppler couleur est une technique nouvelle très prometteuse.
- Enfin, malgré les efforts de nombreux chercheurs, une caractérisation de type biochimique des tissus mous à partir de la quantification de leurs impédances acoustiques n'a pas encore été possible. L'information apportée par les ultrasons est sans doute encore pour longtemps de type descriptif anatomique et non point métabolique.

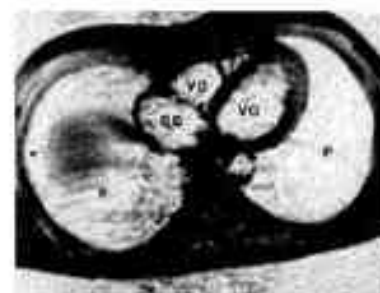
L'imagerie par résonance magnétique nucléaire

C'est la plus récente de toutes les techniques d'imagerie médicale. Elle est basée sur les propriétés magnétiques de la matière, à savoir l'existence du spin des nucléons. Tout noyau d'atome excepté celui qui a à la fois un nombre pair de neutrons et un nombre pair de protons, présente un moment magnétique résultant non nul. Notons en particulier l'hydrogène de l'eau très abondant dans le corps humain et le phosphore 31 naturel présent dans les composés énergétiques cellulaires, phosphocréatine, ATP... En présence d'un champ magnétique permanent intense B_0 imposé extérieurement, les moments magnétiques nucléaires qui étaient orientés dans des directions quelconques s'alignent, créant une aimantation minime. Celle-ci peut être mise en évidence en imposant un second champ magnétique, perpendiculaire au précédent sous la forme d'impulsions. Pour chaque noyau, il existe une fréquence particulière pour laquelle se produit un phénomène de résonance avec bascule de



Fig. 4 - Coupe échographique du cœur en incidence « 4 cavités ». VG=ventricule gauche ; VD=ventricule droit ; OG=oreillette gauche ; OD=oreillette droite. Patient atteint d'une hypertrophie anormale du muscle cardiaque. Notez l'épaule de la cloison interventriculaire et le mouvement de la valve mitrale pendant la contraction ventriculaire (SAM) (©SHF).

Fig. 5 - Coupe transversale du thorax par RMN. VG=ventricule gauche ; VD=ventricule droit ; OD=oreillette droite ; P=poumons (©SHF).



l'aimantation et mouvement de précession autour de la direction B_0 . À l'arrêt de l'impulsion, on observe alors un retour à l'équilibre de l'aimantation, créant dans une bobine électrique spécialement disposée, un courant oscillant d'amplitude proportionnelle à l'aimantation, de durée T2 caractéristique des interactions entre noyaux voisins. Un autre paramètre T1 caractérise les interactions avec l'ensemble de l'organisme. Afin de réaliser une image, on établit un champ magnétique variable dans l'espace, codant d'une certaine façon l'espace en fréquence. L'analyse fréquentielle des signaux recueillis permet de restituer l'intensité du signal pour chaque fréquence et donc pour chaque position spatiale.

Les applications médicales concernent principalement l'hydrogène de l'eau. Les images du cerveau obtenues en routine sont d'une stupéfiante qualité. La mise en œuvre de ces techniques en cardiologie se heurte à de sérieuses difficultés, et

n'est encore qu'à l'état de recherches. Le cœur est en mouvement et une synchronisation à l'électrocardiogramme est nécessaire, allongeant d'autant la durée de l'examen. Une méthodologie spéciale est en cours de développement qui permettra d'obtenir plus rapidement les images tomographiques, dans des plans choisis d'avance. Pour l'instant les images cardiaques couramment obtenues permettent de différencier nettement le muscle cardiaque du sang présent dans les cavités (fig. 5). La technique apparaît prometteuse en ce qui concerne la visualisation des mouvements sanguins, et la caractérisation tissulaire par les temps T1 et T2. En revanche, l'imagerie phosphore, ou la mise en évidence par images des concentrations locales des composés énergétiques cellulaires apparaît extrêmement difficile. Son intérêt médical serait considérable. Quant à l'imagerie d'isotopes tels le carbone 13 après marquage de molécules d'intérêt biologique, elle apparaît pour de nombreux auteurs comme illusoire.

Les quatre grandes techniques d'imagerie médicale que nous avons passées en revue ont toutes un potentiel extraordinaire. Elles réalisent le plus souvent des images fort différentes, plus souvent complémentaires qu'en opposition en cardiologie. Elles ont transformé et elles transforment encore la pratique médicale permettant d'atteindre de nouveaux paramètres et ce, directement *in vivo* dans les conditions normales de fonctionnement des organes.



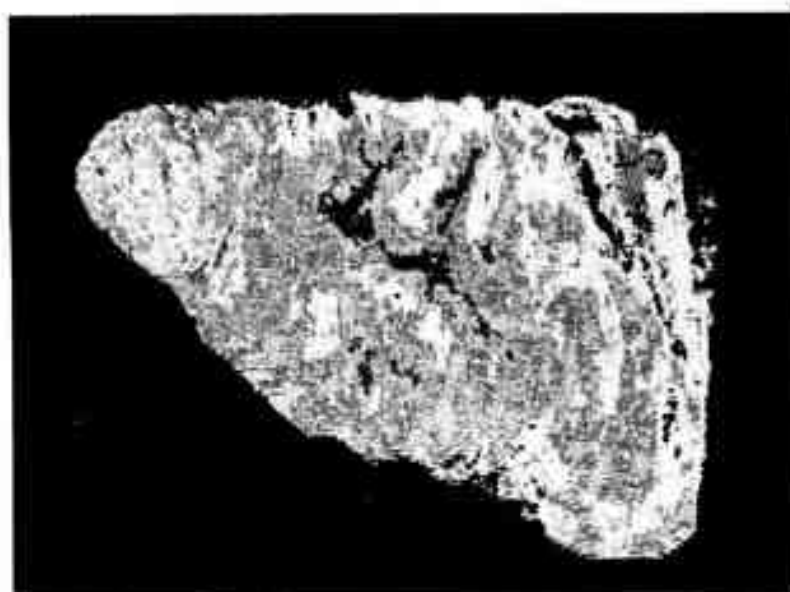
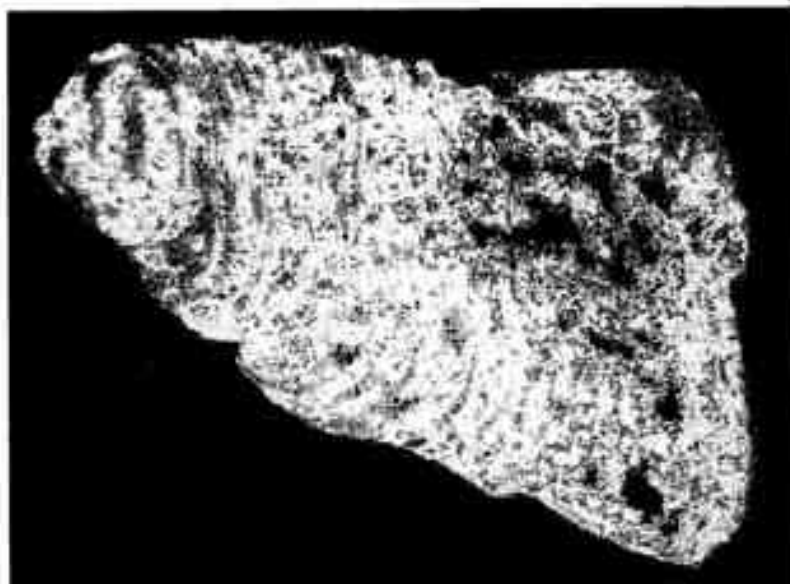
L'IMAGE DES ODEURS

François Jourdan

Le système olfactif opère efficacement la discrimination et l'identification des odeurs malgré leur immense variété ; un marqueur, le désoxyglucose, permet de visualiser et d'analyser l'image correspondant à chacune d'entre elles.

Le système olfactif a pour rôle de détecter et de discriminer des substances chimiques volatiles présentes dans le flux aérien inspiratoire, éventuellement à très faible concentration. Le contact entre les molécules-stimulus et les neurorécepteurs adaptés à leur détection a lieu à la surface de l'épithélium olfactif, au fond des fosses nasales. Les axones issus de chacun de ces neurorécepteurs se rassemblent en faisceaux constituant le nerf olfactif et se projettent à la périphérie du bulbe olfactif où ils se terminent au sein des glomérules olfactifs. Un glomérule est un élément sphérique, de 100 µm de diamètre environ, qui constitue le lieu de convergence de quelques dizaines de milliers d'axones primaires sur les dendrites de quelques dizaines de deutoneurones olfactifs (cellules mitrales ou à panache). Comment le système olfactif opère-t-il la discrimination d'une immense variété de stimulus odorants, sachant que la sélectivité individuelle des neurorécepteurs est généralement faible ? Un grand nombre de données expérimentales a conduit progressivement à la théorie du "codage spatial de l'information olfactive" selon laquelle chaque stimulus, spécifié par les caractéristiques chimiques de la molécule-signal, génère un motif ("pattern") constitué par l'ensemble des récepteurs activés. Le code supportant la nature du signal olfactif est contenu dans les caractéristiques topologiques de l'image ainsi créée. L'image olfactive formée dans l'épithélium sensoriel est transférée à la surface du bulbe olfactif grâce à l'organisation topographique des projections axonales. Sa "définition" y est améliorée grâce à des processus interneuronaux locaux.

François Jourdan, maître de conférence à l'université Claude Bernard, "Physiologie neurosensorielle" (UA 180 CNRS), université de Lyon I, Laboratoire de psychophysologie, 43, boulevard du 11 novembre 1918, 69622 Villeurbanne.



Ces images représentent les reconstructions tridimensionnelles des bulbes olfactifs droits de deux rats, vus par leur face médiane. Chacun des animaux avait reçu une dose de (11C)-2-Désoxyglucose avant d'être soumis pendant 45 minutes à une stimulation olfactive : a ; stimulation par la Cyclohexanone ; b ; stimulation par l'air non filtré du laboratoire (mélange odorant hétérogène).

Les autoradiogrammes obtenus à partir des coupes frontales sériées des bulbes olfactifs ont été utilisés pour réaliser les montages tridimensionnels. La quantité de radioactivité accumulée par chacun des glomérules est relative à son niveau d'activité pendant la stimulation et se traduit par un niveau de densité optique. Les valeurs de densité optique ont été transformées en "fausses couleurs" selon l'ordre d'inten-

sité décroissante suivant : rouge, rose, jaune, bleu, gris, blanc.

Les glomérules sélectivement activés par la cyclohexanone (a) sont groupés dans la moitié postérieure du bulbe. Il a été vérifié que leur distribution est spécifique et reproductible. Le mélange odorant complexe que représente l'air non filtré du laboratoire (b) évoque une image olfactive plus étendue (différente par sa forme et sa localisation [partie antérieure du bulbe]). Chaque signal olfactif induit de la sorte un motif spécifique. La variabilité quasi illimitée des motifs possibles peut suffire à expliquer la capacité du système à discriminer une immense variété de signaux olfactifs, simples ou complexes. (Clichés François Jourdan (Physiologie neurosensorielle, UA 180, CNRS Villeurbanne) et Michel Magnin (Neuropsychologie expérimentale, INSERM U94, Bron).)

Des images : pour qui ? pour quoi ?

C'est au niveau des glomérules que l'image olfactive a pu être visualisée grâce à la méthode de marquage métabolique du tissu nerveux par le 2-Désoxyglucose (2DG) (1). Le 2DG, fourni à un rat par injection intra-péritonéale, est métabolisé et stocké par les neurones au prorata de leur activité fonctionnelle. L'estimation locale, par autoradiographie quantitative, de la quantité de $[14^C]$ 2DG (carbone 14) métabolisé, permet une cartographie de l'activité du tissu nerveux pendant l'intervalle de temps séparant l'injection du sacrifice. Lorsque l'animal a été soumis à une stimulation olfactive, les glomérules qui ont été sélectivement activés par le stimulus peuvent être localisés grâce à la forte accumulation de radioactivité à leur niveau (2). L'image olfactive bulbairre objectivée par le 2DG est constituée d'un ensemble de glomérules activés. Les contours de cette

image, mis en évidence sur des reconstructions tridimensionnelles du bulbe (3) (voir figure a et b) sont d'autant plus faciles à définir que la distribution spatiale des glomérules recrutés n'est pas aléatoire, mais constitue un motif codant. L'analyse de ces motifs démontre leur symétrie (bulbe droit-bulbe gauche), leur spécificité, leur reproductibilité interindividuelle (4).

L'analyse comparative des images olfactives par les méthodes modernes d'analyse d'image permet de mieux comprendre le type de problèmes auxquels les centres olfactifs supérieurs se trouvent confrontés (reconnaissance et/ou discrimination de motifs d'activation polynéuronale). De fait, les techniques d'imagerie assistée par ordinateur font maintenant partie intégrante des outils dont nous disposons pour étudier le système olfactif.

Bibliographie

- (1) Kennedy (C.), Des Rosiers (M.H.), Jehle (M.M.), Reivich (M.), Sharp (F.R.) and Sokoloff (L.) "Mapping of functional neural pathways by autoradiographic survey of local metabolic rate with $[14^C]$ deoxyglucose". *Science*, 1975, 187, 850-853.
- (2) Jourdan (F.), Duveau (A.), Astic (L.) and Holley (A.), "Spatial distribution of $[14^C]$ 2-deoxyglucose uptake in the olfactory bulbs of rats stimulated with two different odours". *Brain Res.*, 1980, 188, 139-154.
- (3) Jourdan (F.), "Spatial dimension in olfactory coding: a representation of the 2-Deoxyglucose patterns of glomerular labeling in the olfactory bulb". *Brain Res.*, 1982, 240, 341-344.
- (4) Royet (J.P.), Sicard (G.), Souchier (C.) and Jourdan (F.), "Specificity of spatial patterns of glomerular activation in the mouse olfactory bulb: computer-assisted image analysis of 2DG autoradiograms". *Brain Res.*, 1987, (à paraître).

CARTOGRAPHIE ÉLÉMENTAIRE À HAUTE RÉOLUTION SPATIALE

Christian Jeanguillaume, Claude Lechène, Marcel Tencé, Pierre Trebbia

La localisation de la phosphatase alcaline dans une coupe mince de leucocyte de cobaye : un exemple.

Le rôle de l'enzyme phosphatase alcaline dans l'ensemble complexe des réactions chimiques intra-cellulaires a depuis longtemps intéressé les biologistes. La visualisation de cette enzyme et sa localisation, doivent permettre en effet de mieux cerner un certain nombre d'hypothèses quant au fonctionnement de la cellule. Sans préparation préalable, l'observation conventionnelle en microscopie optique ou électronique ne permet pas, en raison de la faiblesse des contrastes et des quantités de matière en présence, la visualisation directe de ces enzymes. Depuis les travaux de Gomori (1952), l'utilisation de sels de plomb comme agent précipitant permet d'obtenir des images montrant un fort contraste entre les zones de la cellule supposées contenir l'enzyme cherchée et le reste. De nombreux auteurs ont cependant mis en évidence la présence de dépôts non spécifiques, c'est-à-dire de zones révélant la présence de plomb et ne contenant à l'évidence aucune trace d'enzyme.

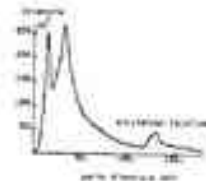
Christian Jeanguillaume, maître de conférence à l'université de Paris XII Créteil.
Marcel Tencé, ingénieur d'études au CNRS.
Pierre Trebbia, chargé de recherche au CNRS, unité de service : "Microscopie électronique analytique et quantitative", (US 41 du CNRS) université de Paris XI, bâtiment 510, 91405 Orsay Cedex.
Claude Lechène, professeur Harvard Medical School, Boston, Massachusetts, États-Unis.

Pour pallier à cette non-spécificité des sels de plomb, Robinson et Karnovsky (1963) ont suggéré l'utilisation d'un autre substrat : le cérium. Selon ces auteurs, l'accumulation du produit de réaction (phosphate de cérium) est proportionnelle à la quantité d'enzymes présentes dans la cellule. Sur des coupes fines cellulaires ainsi traitées, non colorées et faiblement fixées à l'osmium, les dépôts de cérium sont en général visibles dans l'image par un contraste local assez net. Certaines ambiguïtés demeurent cependant : certains organites cellulaires peuvent, en raison de leur densité masquée ou de fluctuations d'épaisseur, présenter un contraste analogue à celui du cérium. Seule une analyse "chimique" spécifique telle qu'une cartographie du cérium peut lever définitivement l'ambiguïté. C'est précisément l'expérience que nous avons réalisée et dont nous décrivons maintenant la méthode.

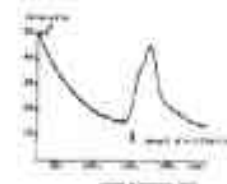
Méthode physique expérimentale

L'échantillon, d'une épaisseur de l'ordre de 30 nanomètres, a été préparé aux États-Unis par l'équipe du Professeur Lechène. L'observation et l'analyse ont été faites à Orsay avec un microscope électronique à balayage en transmission (STEM) équipé d'un spectromètre de pertes d'énergie. Le principe de la méthode expérimentale est simple : une sonde d'électrons de haute énergie cinétique (100 kiloelectronvolts), de faible dimen-

sion (diamètre de l'ordre de 2,5 nanomètres transportant un courant élevé 0,72 nanoampère) est focalisée sur l'échantillon. Ces électrons interagissent avec l'objet en y créant des excitations électroniques qui peuvent être localisées dans l'environnement immédiat d'un atome (ionisation d'un niveau électronique donné). L'énergie cédée à l'objet au cours de cette interaction inélastique est exactement égale à la perte d'énergie de l'électron incident après traversée de l'objet. La spectroscopie de ces pertes d'énergie des électrons



spectre EELS du cérium Fig. 1



Excitation des électrons 4d du cérium Fig. 2

Des images : pour qui ? pour quoi ?

transmis (EELS) se fait avec un secteur magnétique à champ uniforme.

L'enregistrement d'un spectre EELS, comme celui montré sur la figure 1, révèle des structures spécifiques d'une espèce atomique donnée (ici le cérium). La présence ou l'absence de ces structures, la mesure de leur intensité permet de réaliser une analyse, au sens de l'identification d'un élément du tableau périodique.

Pour cela, il faut soustraire au signal brut mesuré une contribution non caractéristique qui existerait même en l'absence de l'élément cherché. Par exemple (voir figure 2) l'intensité mesurée à la perte d'énergie 130 électrons-volts contient une information "chimique" utile (présence du cérium) superposée à un fond continu non caractéristique qu'il convient de soustraire (décroissance monotone de 75 à 120 électrons-volts et se prolongeant au-delà).

Pour connaître précisément ce fond continu, plusieurs points de mesure, espacés en énergie, sont nécessaires. Dans notre cas, nous avons fait des mesures à respectivement 81, 96, 111 et 126 électrons-volts, cette dernière étant la seule à posséder l'information utile (présence du cérium). Ces quatre mesures d'intensité sont répétées successivement pour chaque position de la sonde sur l'échantillon. Celui-ci est ainsi "sondé" suivant une trame 256x256, ce qui fournit quatre images "filtrées en énergie" contenant chacune 65 536 mesures d'intensité. Ces images sont stockées dans la mémoire d'un mini-ordinateur chargé du calcul et de la présentation des résultats.

Résultats

Par un traitement mathématique approprié des images montrées sur les figures 3 à 6, nous savons extraire la seule information utile (présence et abondance du cérium). Le résultat est lui-même présenté sous forme d'une image (figure 7). On y observe que le cérium est nettement localisé sur la membrane du leucocyte et sur les parois des vacuoles. On note également que l'on ne distingue plus le contraste parasite (information inutile) qui était visible sur les figures 3 à 5, et qui permettait de reconnaître l'intérieur et l'extérieur du leucocyte et des vacuoles.

Perspectives

Si l'utilisation du cérium a permis la localisation de la phosphatase alcaline avec une résolution spatiale de l'ordre de la dizaine de nanomètres, de nouveaux substrats sont en cours d'étude : l'utilisation d'atomes de faible numéro atomique devrait permettre un degré de localisation encore accru. Pour de tels éléments, la méthode EELS est la seule à pouvoir établir sans ambiguïté une cartographie élémentaire.

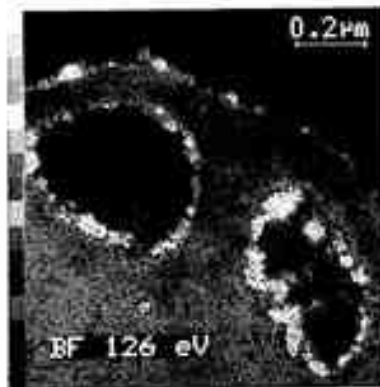
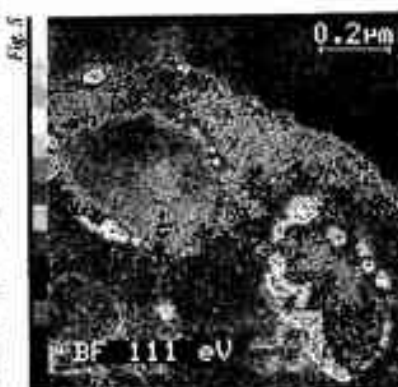


Fig. 6 - Image d'une coupe mince de leucocyte de cobaye prise au microscope électronique à balayage en transmission. Cette image contient à la fois une information chimique utile pour le problème étudié (présence d'atomes de cérium marqueurs d'une enzyme que l'on cherche à localiser) et une information inutile (contraste d'épaisseur) manquant la précédente.

Fig. 7 - Par traitement mathématique d'un ensemble d'images du même type que celle montrée sur la figure 6, on peut extraire avec une bonne sensibilité la seule information chimique : localisation et abondance des atomes de cérium. Cet exemple de cartographie élémentaire à haute résolution spatiale a été réalisé en utilisant la technique de spectroscopie de pertes d'énergie.



Des images : pour qui ? pour quoi ?

LA TÉLÉDÉTECTION : POUR UNE IMAGERIE DE LA SURFACE DE LA TERRE

Michel Desbois

Depuis le début de l'ère spatiale, la Terre se prête à une observation globale de l'extérieur, comme les autres planètes.

La météorologie a été la première discipline à utiliser les images de satellites. Bien d'autres domaines ont maintenant recours aux données spatiales, comme l'océanographie, la climatologie, l'étude des sols, l'étude de la végétation.

L'image a toujours joué un rôle important en astronomie et en astrophysique, puisqu'aux instruments utilisés étaient essentiellement des instruments optiques ; on pourrait donc dire que pour l'étude des planètes et des astres, la télé-détection était l'unique moyen jusqu'à la période récente d'exploration spatiale. À l'inverse, il a fallu attendre l'époque des satellites artificiels pour que la géophysique, utilisant uniquement jusqu'alors des mesures effectuées ponctuellement *in situ*, bénéficie d'une observation globale à distance de notre planète. La télé-détection terrestre allait prendre son essor, imposant l'utilisation de l'image non seulement comme moyen d'observation des phénomènes, mais comme outil de mesure. En effet, la plupart des instruments de télé-détection sur satellite sont des instruments "passifs" qui mesurent, par l'intermédiaire d'un dispositif optique (téléscope) le rayonnement reçu d'éléments de surface de la planète à des longueurs d'onde choisies en fonction du paramètre physique qu'on cherche à mesurer.

Les mesures sont répétées sur des éléments de surface juxtaposés au moyen de dispositifs de balayage (scanneurs) utilisant le mouvement du satellite et des systèmes mécaniques ou électroniques. Les informations, transmises au sol par télémesure, peuvent être visualisées en formant des images constituées par la juxtaposition des

mesures considérées comme des éléments d'image (pixels ou pel). Les images ainsi reconstituées sont caractérisées par les longueurs d'ondes utilisées pour la mesure et la résolution spatiale (dimension sol de l'élément de mesure). Une troisième caractéristique est l'intervalle de temps entre deux images successives d'une même région (résolution temporelle), qui dépend essentiellement de l'orbite du satellite.

La météorologie

La première, et encore actuellement la plus courante des applications de l'imagerie satellitaire concerne la météorologie. C'est en 1960 qu'a été lancé le premier satellite météorologique ; depuis, les lancements se sont multipliés et on dispose

aujourd'hui d'un système opérationnel comprenant des satellites à orbite basse (généralement polaires et héliosynchrones) et des satellites géostationnaires. Pour ne parler que de l'instrumentation "imagerie" de ces satellites, elle se caractérise, pour les satellites à orbite basse (fig. 1), par une résolution au sol meilleure que le kilomètre et plusieurs canaux dans le visible et l'infrarouge, tandis qu'actuellement pour les géostationnaires (fig. 2), la résolution n'est généralement que de



Fig. 1

Fig. 1 - Image prise par un satellite météorologique héliosynchrone NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Agency) au-dessus de la côte Est des États-Unis. Un traitement a été effectué de façon à composer les canaux visible et infrarouge du satellite : le visible module la luminosité de l'image, et l'infrarouge sa couleur. Les couleurs orange-jaune correspondent aux températures apparentes les plus élevées, les bleues aux plus froides. On remarque particulièrement la formation de petits sauges chauds (douce) au-dessus des eaux chaudes du Gulf Stream. © CNRS/LMD/NOAA. Photo M. Desbois.

Fig. 2 - Image Meteosat "pluie diurne". On emploie ici le même type de composition colorée entre les canaux visible et infrarouge que pour la figure 1. Cependant, la gamme de couleurs choisie est légèrement différente, allant du vert pour les sols les plus chauds au rose pour les nuages les plus froids. Les satellites géostationnaires produisent des images de la même face du globe toutes les demi-heures et permettent de suivre l'évolution de la couverture nuageuse de l'échelle de quelques kilomètres (correspondant à leur résolution au sol) à l'échelle globale. © CNRS/LMD/Meteosat/ESA. Photo M. Desbois.



Fig. 2

Michel Desbois, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de météorologie dynamique (LP 1211 du CNRS), Centre national de la recherche scientifique, Ecole polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex.

Des images: pour qui? pour quoi?

quelques kilomètres et le nombre de canaux est réduit à deux, un canal "visible" qui permet de mesurer la lumière solaire réfléchi par la terre, et un canal infrarouge "lénètre" qui permet de mesurer l'émission thermique de la surface de la planète et des nuages. En revanche, les géostationnaires ont une résolution temporelle bien meilleure (généralement quarante-huit images par jour) que les satellites héliosynchrones (deux images par jour, à heure locale fixe).

L'utilisation de l'imagerie produite par ces satellites est opérationnelle pour la détermination en temps réel de certains paramètres météorologiques, comme les caractéristiques de la couverture nuageuse, ou les vents déduits des mouvements des nuages mesurés sur des images successives de géostationnaires. Les traitements nécessaires, qui faisaient souvent appel à la photointerprétation ou à des mesures optiques, sont maintenant de plus en plus automatisés grâce à diverses techniques de traitement d'images: classifications automatiques multi-paramètres pour la mesure des caractéristiques de la couverture nuageuse, corrélations d'images pour la mesure des déplacements nuageux.

Par ailleurs, dans le domaine de la recherche, de nombreux autres travaux sont réalisés à partir de ces images: élaboration et utilisation de méthodes pour la détermination de paramètres supplémentaires comme les termes du bilan radiatif, les propriétés optiques des nuages, les aérosols atmosphériques, les précipitations...

La climatologie satellitaire se développe également, puisqu'on dispose maintenant dans des banques de données de séries d'images portant sur un nombre d'années suffisant. Elle nécessite le traitement d'images multiples dont nous donnons un exemple de résultat en figure 3.

L'imagerie des satellites météorologiques est aussi très utilisée dans des disciplines différentes, d'intérêt à l'interface sol-atmosphère ou mer-atmosphère: production de cartes de température de surface de la mer, étude de l'énergie solaire parvenant à la surface de la planète, études sur les propriétés optiques et thermiques du sol (par exemple albedo*, inertie thermique), cartes d'indices de végétation... (figure 4).

Les ressources terrestres et l'océanographie

Cependant, l'étude des ressources terrestres et l'océanographie requièrent souvent des instruments différents en fonction de leurs besoins particuliers.

Pour les ressources terrestres, par exemple, c'est la résolution spatiale qui sera privilégiée au détriment de la répétitivité temporelle des mesures, puisqu'on s'intéresse à des cartographies à plus petite échelle sur des phénomènes moins variables temporellement. Ainsi, les satellites Landsat et Spot ont des résolutions spatiales allant de quelques dizaines de mètres à dix mètres mais la largeur de la trace au sol du balayage ne permet pas une prise d'image quotidienne systématique comme pour les satellites météorologiques à orbite basse (figure 5). Pour ces satellites, les images ne sont plus un objet d'étude, mais doivent être systématiquement évitées. De même les effets atmosphériques deviennent un phénomène perturbateur de la mesure qu'il faut corriger.

Cependant, la gamme d'application est là aussi immense: cartographie générale, mais aussi étude des sols, des cultures, de la végétation naturelle, archéologie, etc...

La gamme de méthodes utilisée, elle, va de la simple photointerprétation aux traitements automatiques employant des méthodes sophistiquées de traitement des images, en passant par les traitements interactifs permettant des visualisations adaptées aux phénomènes étudiés.

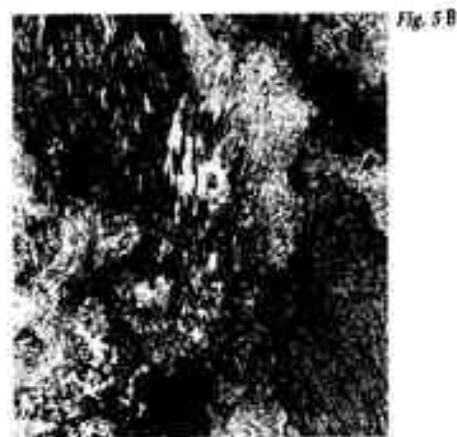
Nous sommes loin ici d'avoir énuméré tous les systèmes de télédétection existant à l'heure actuelle, nous limitant à ceux qui font le plus grand usage du caractère "imagerie" des données. Mais la plupart des autres mesures satellitaires, par exemple celles des sondeurs multicanaux de l'atmosphère (qui permettent de restituer les profils verticaux de température), ou celles des instruments fonctionnant dans le domaine des ondes millimétriques (qui permettent des mesures de température, d'humidité ou d'eau condensée), peuvent être présentées sous forme d'images pour un examen rapide, bien que leur interprétation ne fasse pas appel aux techniques de traitement d'images. Bien entendu, ce qui est vrai pour l'observation de la Terre l'est aussi pour celle des autres planètes vers lesquelles on peut envoyer des sondes spatiales. Le même genre de techniques de télédétection sont employées; c'est ainsi par exemple qu'on a pu mesurer la rotation de l'atmosphère de Vénus en suivant le mouvement des nuages, qu'on a pu détecter les tempêtes de poussière sur Mars ou observer la turbulence sur Jupiter.

Dans l'avenir, la télédétection va voir se développer de nouveaux instruments, soit munis de meilleures résolutions spatiales et/ou temporelles, soit utilisant de nouveaux canaux spectraux, soit encore faisant appel à des mesures "actives": radars, lidars. Malgré la richesse intrinsèque de chaque mesure ponctuelle effectuée par ce genre d'instruments, le caractère imagerie de la mesure demeurera, en raison même du caractère spatial de l'observation. Une fois encore, l'interprétation des résultats demandera la mise au point de méthodes associant la mesure physique au traitement de l'image, problème permanent à résoudre pour extraire le maximum d'informations des mesures de télédétection.

* albedo: pourcentage de radiation lumineuse réfléchi par une surface donnée.

Fig. 3 - Résultat d'un traitement d'images multiples à but climatologique: il s'agit ici d'une moyenne mensuelle des images du canal "vapeur d'eau" (5,7 - 7,1 μ m) de Meteosat pour le mois de juillet 1983. Les zones claires sont les zones où l'atmosphère est très humide, les zones sombres celles où elle est sèche. On matérialise ainsi la zone d'ascendance d'air humide située près de l'équateur et les zones subtropicales sèches, où l'air redescend des hautes couches. Le même traitement effectué pour des mois et des années différents permet de mettre en évidence des fluctuations climatiques. © CNRS/LMD/Meteosat/ESA. Photo L. Picon.

Fig. 4 - Exemple d'image de réflectivité du sol obtenue par traitement d'images Meteosat sur la France. On élimine les nuages par une méthode de composition d'images. Les zones les moins réfléchissantes (mer et plans d'eau) sont colorées en bleu; sur le sol, les parties les plus sombres (forêts) apparaissent en rouge et les plus réfléchissantes en jaune clair. Ce type



d'images est utilisé pour la détermination de l'albedo du sol. © CNRS/LMD/Meteosat/ESA. Photo G. Sèze.

Fig. 5 - Ces deux images du Gregory Rift (Kenya), prises par les satellites Spot (a) et Landsat (b), montrent l'amélioration de la définition obtenue par le satellite Spot. On distingue parfaitement sur l'image (a): les variations de profondeur du lac Bogoria, en bleu au nord; le réseau principal des failles nord-sud qui délimitent des blocs basculés (en haut); un volcan; les parcelles agricoles. © Laboratoire de géologie structurale (CNRS/université Pierre et Marie Curie).

PARMI LES IMAGES, LA CARTE

De la vitrine à l'instrument de recherche.

La carte, dont on croit trop souvent qu'elle ne sert qu'à illustrer, voire à décorer le texte qu'elle accompagne, est en train de devenir un instrument de recherche. Avec la diffusion des méthodes de cartographie assistée par ordinateur un nouvel élan est donné à ce type particulier d'image, sans pour autant que disparaisse la carte traditionnelle, qui n'a pas dit son dernier mot.

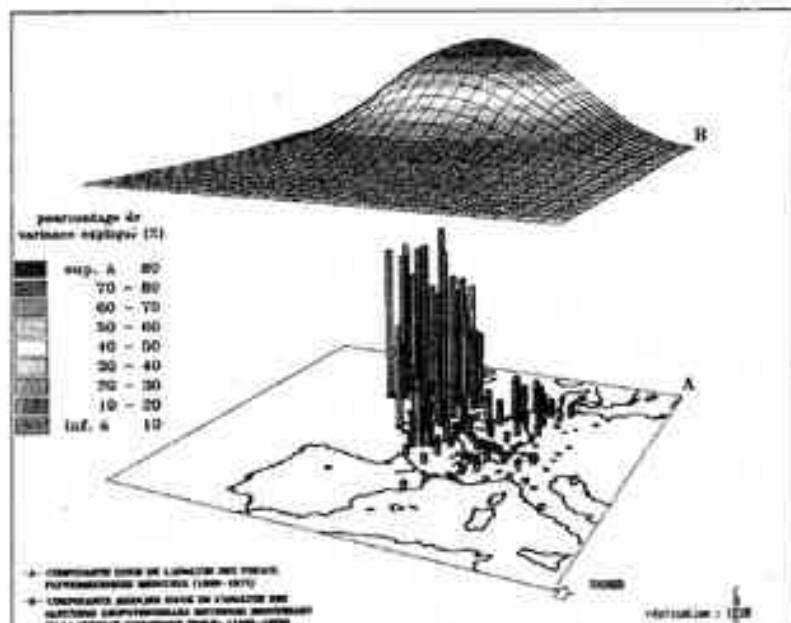
Les domaines de recherche où la carte est l'instrument privilégié de la communication et de la recherche s'élargissent de plus en plus. On peut s'en convaincre en parcourant les cartes ci-dessous, qui ont en commun de représenter divers aspects de la France : les recherches et les démonstrations qu'elles synthétisent sont aussi différentes que possible, et les images qu'elles donnent des mêmes espaces très diverses.

La première traite des variations climatiques sur l'Europe : à partir de données simples, pluviométriques, un modèle d'interprétation a été élaboré, que l'image a pour fonction de visualiser. La seconde condense sous forme graphique des années de recherches théoriques et de terrain sur la géomorphologie de la France : ici encore l'image est synthèse. La troisième utilise les méthodes de la télédétection satellitaire pour montrer les variations de température au long des littoraux de l'Ouest, afin de les mettre en rapport avec les cultures qui y sont pratiquées : les données physiques que l'image met en lumière sont un point de départ. La quatrième localise les zones d'activité sismique en France pour les années 1980-1983. La cinquième ne part pas de données du monde physique, mais se situe entièrement dans celui de l'activité humaine, pour y trouver des régularités ou des oppositions spatiales : la carte des investissements par zones d'emploi fait apparaître les axes majeurs du territoire, eux-mêmes résultant de multiples stratégies individuelles ou collectives. La sixième enfin, traduit la trace spatiale de phénomènes apparemment non géographiques, la diffusion progressive du français, moyen et résultat de l'unité nationale, et les flots de résistance à cette unification : toute une dynamique linguistique se fait jour sur cette seule image.

Variations climatiques : modélisation et cartographie

Grégoire Feyt,
Marie-Françoise de Saintignon

Les variations spatio-temporelles des précipitations mensuelles (désaisonnalisées) de 115 postes pluviométriques d'Europe occidentale ont été analysées pendant la période 1880-1975 ; elles peuvent être modélisées à l'aide de cinq composantes temporelles



associées à des espaces distincts ; ces composantes indépendantes ont été calculées à partir des précipitations mensuelles. C'est la part de variation attribuée à l'une de ces cinq composantes qui est cartographiée sur le plan A ; on constate que son aire d'influence est centrée sur les îles britanniques. La même méthode d'analyse appliquée à la succession des altitudes moyennes mensuelles (désaisonnalisées) du géopotentiel 700 hectopascals, reconstituées sur un maillage régulier pour la période 1963-1979, permet également de modéliser les variations d'un champ de pression en altitude à l'aide de cinq composantes. Sur le plan B est cartographiée la part de variation attribuée à l'une de ces composantes que l'on peut considérer comme "associée" à celle représentée en A (limites identiques pour les plans A et B).

On remarquera la différence entre les deux modes de représentation retenus, liés aux données de base utilisées : représentation "discrète" pour un réseau irrégulier de points de mesure dans le cas des précipitations, représentation continue pour un maillage régulier de valeurs déjà interpolées dans le cas des pressions.

La confrontation directe des deux cartes suggère des relations et permet d'établir des hypothèses sur ces relations, ce qui se révèle particulièrement précieux dans les cas comme celui évoqué ici où les réseaux de base sont différents. On constate par exemple que c'est sur les îles britanniques, tant pour les précipitations que pour les pressions, que les fluctuations interannuelles sont le plus liées à celles des composantes choisies : le pourcentage de variance expliqué est ici supérieur à 50%.

Modélisation des variations spatio-temporelles : modèle d'analyse de la variance associé à la méthode de transformation (bibliothèque ER 30 "Environnement climatique : statistique, modélisation, cartographie" et Laboratoire des techniques de l'informatique, des mathématiques, de la microélectronique et de la microscopie quantitative - Tom 3 (LIA 397) de Grenoble. Logiciel NAVARO, sous système MULTICS (ER 30).

Réalisation graphique : logiciel UNIRAS (implanté au Centre interuniversitaire de calcul de Grenoble) et programme d'édition (ER 30).
Base de données de l'ER 30 :
— altitudes des niveaux du géopotentiel : fichier HEMS de la Météorologie nationale pour l'hémisphère nord, au nord du 20° parallèle, échelle décadaire ;
— précipitations mensuelles : publications de la Météorologie nationale (France) et bande de données du Meteorological Office (Grande-Bretagne).

Grégoire Feyt, dans le cadre de sa thèse de doctorat (à paraître, juin 1987). Marie-Françoise de Saintignon, ingénieur au CNRS, équipe de recherche "Environnement climatique : statistique, modélisation, cartographie" (ER 30 CNRS), université de Grenoble I, Laboratoire de biologie végétale, BP 68, 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex.

Des images : pour qui ? pour quoi ?

Carte géomorphologique de la France au 1:1 000 000

Fernand Joly

Parmi les différentes représentations planes de la Terre, cartes topographiques, géologiques, pédologiques (des sols), les cartes géomorphologiques ont la particularité de présenter la genèse du relief, les facteurs qui en sont responsables. L'état actuel du relief et permettent une évaluation de son évolution actuelle.

Naturellement, le choix de l'échelle dépend du degré de détail auquel on veut arriver. Au 1:50 000, la Carte géomorphologique détaillée de la France (une trentaine de feuilles parues) est suffisamment grande pour qu'y soit consignée une somme de renseignements qui en font une source considérable de réflexion scientifique et d'informations géotechniques. Au 1:1 000 000, la Carte géomorphologique de la France est forcément plus schématique. Carte synthétique, elle vise à montrer la connaissance qu'on a, à la fin des années 80, de la géomorphologie de notre pays. En ce sens, elle diffère assez sensiblement de la précédente carte géomorphologique au 1:1 000 000 parue en 1938 dans l'Atlas de France (fig. 1), parce qu'elle intègre les progrès conceptuels, méthodologiques et techniques accomplis depuis lors.

La nouvelle carte (fig. 2) permet de mettre en valeur les contrastes structuraux (grands domaines morphostructuraux et formes structurales majeures), l'extension et la nature des formations superficielles les plus significatives (altérites, épandages détritiques anciens, alluvions fluviales ou glaciaires, accumulations éoliennes, etc.), et naturellement les principales formes de relief compatibles avec l'échelle.

La carte a été construite sur le fond orohydrographique (c'est-à-dire décrivant le relief et les réseaux fluviaux et marins) au 1:1 000 000 établi par l'Institut géographique national (IGN). Les formes et formations ont été mises en place d'après des minutes au 1:500 000 fournies par des collaborateurs universitaires ou chercheurs, tous bons connaisseurs des régions étudiées. Les vides substantiels ont été comblés à partir des documents bibliographiques et cartographiques disponibles, notamment les thèses de doctorat régionales et les cartes géologiques au 1:50 000 et au 1:50 000. La coordination scientifique et technique a été effectuée au laboratoire IMAGED. Cette coordination s'est référée particulièrement aux images de télédétection au 1:1 000 000 du satellite LANDSAT.

La préparation graphique a été exécutée au laboratoire IMAGED par J. Bessac-Graudet. Les contours ont été numérisés et reproduits au traceur piloté par ordinateur. À l'intérieur des contours, la sélection trichrome des couleurs et la mise en place des trames et des poncifs ont été réalisées à l'IGN par le procédé de cartographie automatique SEMPO. Les formes et la lettre ont été dessinées sur des planches séparées par les procédés ordinaires.

L'intérêt de cette semi-automatisation est de permettre une meilleure sélection des couleurs et un rendu plus fin des trames et des poncifs. Il est aussi possible d'envisager dans l'avenir un traitement et une exploitation informatiques des données présentes sur la carte.

Pour des raisons techniques et financières, la carte n'a pas pu être publiée pour l'ensemble du territoire en une seule feuille et en une seule fois. Un montage en quatre feuilles a été étudié. La feuille Nord-Ouest est parue à la fin de 1986. La feuille Nord-Est est au dessin pour paraître en 1987. Su-

ront les feuilles Sud-Est en 1988 et Sud-Ouest en 1989.

Fernand Joly, professeur à l'université de Paris VII, IMAGED (LP 30 CNRS), Centre de géographie, 191, rue Saint-Jacques, 75005 PARIS.

Une analyse rapide donne une idée de l'esprit et du contenu de la carte :

- La lithologie du substratum apparaît en brun pour les bassins sédimentaires, en rouge carmin ou violacé pour les massifs anciens, en rouge vermillon pour les chaînes plissées récentes. Dans tous les cas, les roches résistantes sont figurées en teintes plus fortes que les roches moins ou peu résistantes.

- Les formations superficielles et les formes du terrain sont traitées dans des couleurs conventionnelles dont la signification est générique :

- Les formes structurales dans la couleur du domaine morphotectonique auquel elles appartiennent.

- Les formations héritées quaternaires en bleu pervenche pour les formations d'altération et en bleu "pétrole" pour les formations détritiques.

- Les formes et formations quaternaires et actuelles en bleu outremer pour la côte, en vert pour le fluvial, en violet pour le glaciaire et en jaune pour l'éolien.

- Deux cas particuliers sont à signaler : les surfaces d'aplanissement représentées par des hachures horizontales, et les formes et formations sous-marines d'après les recherches faites sur le précontinent.

Le quart Nord-Ouest de la carte géomorphologique au 1:1 000 000 de la France est diffusée dans la collection "RECLIS modes d'emploi", Maison de la géographie, 17, rue Albé de l'Épée, 34000 Montpellier, au prix de 54 000 F TTC + frais de port.

Fig. 1



Fig. 2

Des images : pour qui ? pour quoi ?

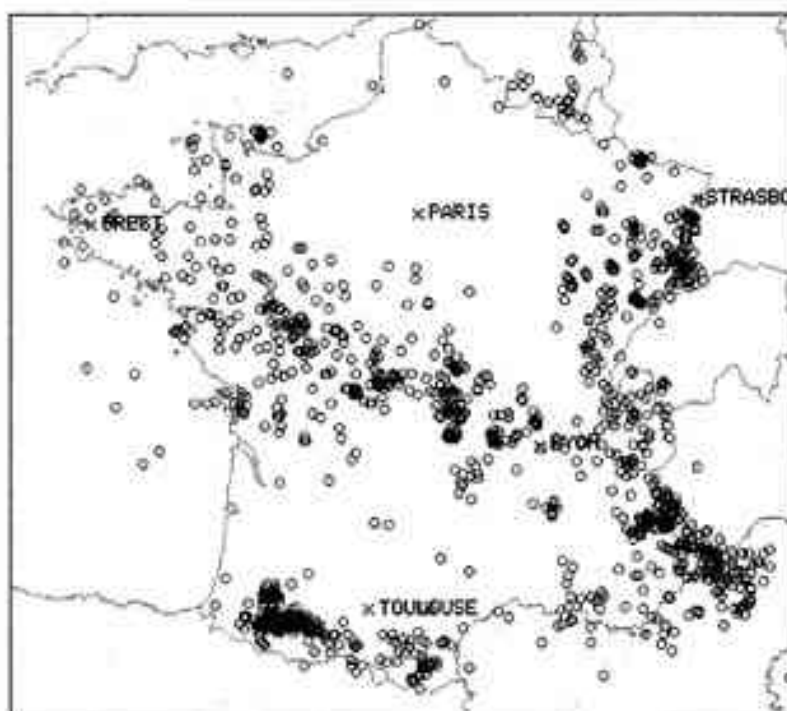
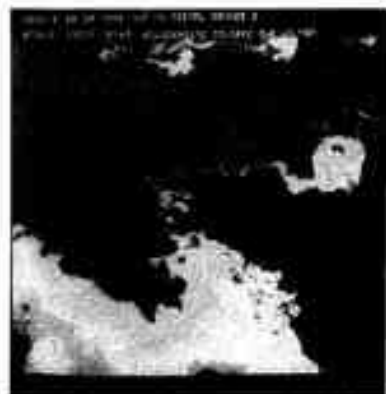
Climat et occupation du sol

Jean Mounier

Deux grandes recherches thématiques qui reposent sur l'analyse satellitaire sont aujourd'hui développées : dans le domaine du climat, dans celui de l'interprétation spatiale des paysages et des cultures. Les recherches en climatologie englobent d'abord l'étude de la circulation atmosphérique soit par l'interprétation des images d'une scène à un moment donné, soit par l'animation d'images fréquentes de satellites géostationnaires, ensuite des études de la répartition spatiale des températures. Si l'évaluation des températures de surface du sol est difficile à réaliser du fait d'une méconnaissance des valeurs de l'émissivité, par contre les résultats d'une thermographie des eaux de surface de la mer reposent sur des données physiques plus fiables : une connaissance des températures des eaux de surface autour de la Bretagne contribue à expliquer les variations géographiques du climat côtier de cette péninsule (voir figure).

La détermination des types de paysage et de cultures à l'échelle même de la parcelle est abordée par l'analyse des images fournies par les satellites SPOT et LANDSAT TM. Le savoir faire dans le traitement multispectral des images SPOT a été obtenu à la suite de recherches sur "une simulation SPOT". Celles-ci ont permis par exemple de réaliser une cartographie des paysages agricoles et des cultures dans la baie du Mont-Saint-Michel et du Marais de Dol (cf. publication dans la revue du Centre de culture scientifique technique et industrielle de Rennes). Au-delà de ces travaux de portée thématique, les analyses multispectrales des images de plusieurs types de satellites peuvent déboucher sur l'analyse d'un risque majeur aux graves répercussions économiques : par exemple, la sécheresse estivale de 1986 dans le Sud-Ouest de la France. Une étude en cours repose sur des traitements de plusieurs canaux (composition colorée, accentuation de contrastes...) pour déterminer la répartition spatiale de cette sécheresse et son extension possible dans le domaine océanique à l'échelle de la région et à l'échelle locale, voire de la parcelle. On peut ainsi, dans la France de l'Ouest, mieux délimiter les régions sensibles à la sécheresse : régions remembrées et de cultures.

Jean Mounier, professeur à l'université de Rennes II, responsable de la recherche coopérative sur programme "Climat et occupation des sols par télédétection - Costel" (RCP 853 CNRS), 6, avenue Gaston Berger, 35043 Rennes Cedex.



Visualisation de la sismicité française par cartographie

Michel Granet

La cartographie de la sismicité instrumentale est l'un des éléments fondamentaux d'évaluation du risque sismique d'une région donnée. Historiquement, l'intensité macro-sismique maximale observée en France et pays limitrophes a atteint dix dans l'arrière-pays niçois en 1564 et dans la région de Bâle en 1356, tandis que le séisme de Lambesc d'intensité neuf en 1908, près de Aix-en-Provence, a été le plus meurtrier depuis le début de ce siècle. La carte présente la compilation de la sismicité instrumentale en France réalisée par le Bureau central sismologique français (BCSF) à Strasbourg pour les années 1980 à 1983. Les ensembles de données disponibles provenant de différents organismes (Laboratoire de détection géophysique du Commissariat à l'énergie atomique, laboratoires du Centre national de la recherche scientifique et des universités) ont été intégrés dans un calcul unique. Cette carte est sans indication de magnitude, car le BCSF n'est actuellement pas en mesure de calculer ce paramètre à cause de la non-homogénéisation des réseaux de sismomètres en France. Seul le Laboratoire de détection géophysique publie actuellement une magnitude pour les séismes se produisant sur le territoire métropolitain français. Les traits principaux de la carte sont les suivants.

Michel Granet, physicien adjoint, Institut de physique du globe de Strasbourg (INSU 12), université de Strasbourg I, 5, rue Desmarais, 67084 Strasbourg Cedex.

Thermographie des eaux de la Manche et de l'Atlantique au début de l'automne 1985, selon NOAA satellite à défilement (Satmos - Lunel).

— Une forte sismicité est observée dans les Pyrénées. Les principaux séismes récents témoignant d'une activité tectonique importante dans cette région sont localisés au voisinage de la zone Nord-pyrénéenne : séisme d'Arctet (13 août 1967, magnitude $M = 5,5$), séisme d'Audoubert (29 février 1980, $M = 5,1$) et séisme des Arbailes (6 janvier 1982, $M = 4,8$).

La partie Nord des Alpes françaises, le Vercors, les Préalpes, l'arc sismique Briançonnais, l'arrière-pays niçois, les hautes vallées de la Durance et du Rhône, sont des zones à sismicité marquée mais diffuse. De l'histoire sismique récente, nous retiendrons le séisme de Monteynard (Vercors) du 25 avril 1963 de magnitude $M = 4,9$. Entre ces zones sismiques, les massifs cristallins du Pelvaux, de Belledonne, des Maures et de l'Estérel sont pratiquement aismiques.

— Les bordures du socle hercynien à couverture sédimentaire faible ou nulle (Massif Ardennais, Massif Armoricain, Massif Central, Vosges et seuil Morvano-vosgien) sont le siège de nombreuses secousses. Nous citerons pour mémoire les séismes récents de l'île d'Oleron du 7 septembre 1972 de magnitude $M = 5,2$ en bordure du Massif Armoricain et la crise de Remiremont (Vosges) de décembre 1984 et janvier 1985 avec un séisme principal de magnitude $M = 4,8$.

— Les zones d'effondrement de la Limagne et du Rhin présentent également une sismicité importante. Le fond du Rhin est caractérisé par une grande activité sismique dans sa partie Sud (exemple du séisme de Sierentz du 15 juillet 1980 de magnitude $M = 4,7$) et une activité plus modeste dans sa partie centrale.

Par opposition à ces zones où la sismicité est plus ou moins développée, nous citerons les zones aismiques.

Des images : pour qui ? pour quoi ?

niques du socle hercynien avec couverture sédimentaire épaisse : bassin de Paris et bassin d'Aquitaine.

Il est important de noter que le niveau de la sismicité française reste marginal dans le contexte Euro-Méditerranéen. Le Centre sismologique euro-méditerranéen (KSEM) dénombre dix séismes de magnitude supérieure à 4,5 en France durant la période 1976-1985, dont cinq dans les Pyrénées et aucun ne dépasse la magnitude 5,1. Le CSEM dénombre sur cette même période mille quatre-vingt-sept séismes de magnitude égale ou supérieure à 4,5 dans un domaine limité en latitude par les parallèles 30°N et 80°N et limité en longitude par les méridiens - 40° et + 65° (c'est-à-dire un rectangle dont les limites correspondent à peu près au Nord au Spitzberg, à l'Est à l'Oural, au Sud à l'Afrique du Nord et à l'Ouest au milieu de l'océan Atlantique).

L'investissement attire l'investissement Roger Brunet

Cette carte, tirée d'une série qui en comporte 235, est issue d'un contrat d'étude confié par le ministère du Redéploiement industriel et du Commerce extérieur au Groupement d'intérêt public (GIP) RECLUS. L'objectif était d'éclairer les services du Ministère sur l'évolution récente des dynamiques spatiales de l'emploi et de son environnement, à un niveau fin et en un temps très bref. Ce travail représente en France la première fourniture massive de cartes en couleurs par ordinateur, comparables à vue en raison de l'hétérogénéité des données de nature et d'origines différentes (Institut national de la statistique et des études économiques - INSEE, Enquête annuelle d'entreprises - EAE du ministère du Redéploiement industriel et du Commerce extérieur, Union nationale interprofessionnelle pour l'emploi dans l'industrie et le com-

merce - UNEDC, Agence nationale pour l'emploi - ANPE).

Les modèles graphiques joints aux cartes ne sont pas de simples "résumés" destinés à en faciliter la lecture : ils expriment une recherche des chorèmes pertinents, c'est-à-dire des situations-typiques et des tendances ou phénomènes qu'elles expriment : ils sont recherche d'explication.

La localisation des investissements est à peu près proportionnelle à la place de l'industrie : les principaux volumes sont dans le Nord, le Nord-Est, Paris-Basse-Seine, le grand Lyonnais et le bas Rhône. Il apparaît toutefois une vigoureuse consolidation, d'une part en Basse-Seine, d'autre part en Alsace. En revanche la Gascogne, le sud du Massif Central et la diagonale dépeuplée Dordogne-Limousin-plateaux bourguignons et champennois continuent à recevoir peu. Il pourrait y avoir un léger effet d'égalisation dans l'Ouest au moins, la répartition des investissements par zone paraissant un peu moins inégale que le nombre des salariés eux-mêmes.

Les voies de la francisation

Cette carte montre que le mot français *jardin* est loin d'être le seul connu et employé par les Français. De nombreuses dénominations lui font com-

currente encore aujourd'hui. Comme les roches sur une carte géologique, ces aires témoignent de l'histoire des mots. On y lit aussi des invasions, des conflits, des disparitions, toute une dynamique linguistique.

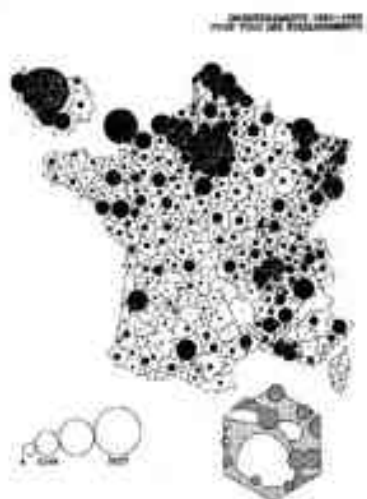
Les couches les plus anciennes, antérieures à l'arrivée des Romains, se trouvent au Pays Basque et en Bretagne. Viennent ensuite les formes ont issues du latin *HORTUS* qui ont envahi la Gaule romainisée. La zone verte doit se lire ainsi : le francique *GARD* est entré par le nord-est avant le XI^e siècle : en Alsace et en Lorraine, il a dû recouvrir des régions plus ou moins romanisées. Ces termes anciennement implantés ont un *g-* à l'initiale : *garten* en Alsace et en Lorraine germanophone, *garlin* en Picardie et Normandie.

GARD n'a pas été adopté partout : les zones colorées en rose ont des noms locaux attestés dès le Moyen Âge et tous issus du gallo-roman ou du latin médiéval. En Lorraine, *mé, mé, moué* viennent de *MANUS*, acceint, en Champagne, de *ACCINGERE*, les formes *courté* si largement répandues, de *CORTU*, *TILL*, *casal*, *casau* en Gascogne, de *CASALUS*. Dans l'ouest, *verger* n'a pas le sens du français d'aujourd'hui mais reste fidèle à son étymologie *VIRIDIANUM*, liée à la verdure et aux arbres.

Ces noms ne sont pas arbitraires — pour le basque, l'origine n'est pas établie. Ce sont les idées de col-

Travail collectif, GRECO 9 du CNRS, "Atlas linguistiques - Parlers et cultures des régions de France", université de Nancy II, 42, avenue de la Libération, 54000 Nancy.

Le GRECO 9 publie la collection de l'Atlas linguistique de la France par régions. À ce jour, cinquante-neuf volumes ont déjà été publiés.



Investissements industriels 1982-1983, en valeurs absolues. Fichier de carte et statistiques par zones d'emploi.

Roger Brunet, directeur de recherche au CNRS, responsable du Groupement d'intérêt public RECLUS (Réseau d'étude des changements dans les localisations et les unités spatiales, GIP 3 du CNRS), Maison de la Géographie, 17, rue Abbé de l'Épée, 34000 Montpellier.



ture en un lieu clos, proche de la maison, qui ont été prépondérantes : *hort* breton est "jardin à plantes" ; *gard* est très précis puisqu'en droit germanique c'était "l'espace de la terre autour de la maison que le seigneur laissait au manant, lequel avait le droit de clorre". *Mé* vient d'une restriction de *mansus*, qui désignait au Moyen Âge l'ensemble constitué par la maison et les terres ; *CONHOSTILE* fait référence à la cour (de ferme) ; *CASALIS* est "ce qui est relatif à la maison". Enfin, l'accent champenois appartient à la famille d'*ALLONGERE* "clorre". Depuis le Moyen Âge, on n'a plus de créations

Des images : pour qui ? pour quoi ?

importantes. Les Français vivent sur leur stock de mots. Et actuellement, on assiste à une régression des mots locaux, qui seront probablement supplantés un jour par le français jardin. Toutefois, cette carte ne saurait rendre compte à elle seule de la complexité des problèmes. On n'y a fait figurer que les noms les plus fréquents aujourd'hui du "jardin potager" au sens le plus général. La réalité rurale est autre. Tout près des maisons se trouve le "potager", clos d'un mur ou d'une haie, parfois distinct du "jardin d'agrément". Un peu plus loin, on a souvent une "pièce de terre de bonne

qualité où l'on cultive certains légumes en grande quantité". On a aussi le "petit pâturage", le "verger", le "verger-pâturage"... Autant de cartes dans les atlas linguistiques.

Il faudrait aussi appeler la nature des relations entre le jardin et la maison. Citons seulement l'exemple du *beratz* basque, qui peut désigner "la bande de terrain situé sous l'avant-toit de la maison et où l'on enterrait les enfants morts sans baptême".

Il reste beaucoup de cartes interprétatives à dresser.

L'IMAGE DE LA PAROLE

Mario Rossi

Décodage automatique de la parole, identification de la voix : en progression sensible, mais un long chemin reste encore à parcourir.

La parole, objet phonique du langage, n'est autre que le mouvement des molécules provoqué par les organes phonatoires et qui constitue le médium entre le locuteur et l'allocutaire. L'oscillation des molécules dans le temps peut être captée par un transducteur, un microphone par exemple, ou l'oreille de l'auditeur, pour une analyse ultérieure (voir oscillogrammes des fig. 1, 2, 3, 4).

L'image de la parole, objet organisé.

L'analyse par le système auditif, par une machine analogue ou par un logiciel fournit une évolution temporelle du spectre (fig. 1A, 2A, 3A, 4A, sonagrammes). Celle-ci est obtenue, sur les machines, par diverses méthodes dont les plus connues sont la FFT (*Fast Fourier Transform*), la LPC (*Linear Predictive Coding*) et leurs variantes. On peut extraire du signal de parole certains paramètres tels que la fréquence fondamentale, l'intensité (fig. 1B, 2B, 3B, 4B, etc.). Mais ni l'évolution temporelle du spectre, résultat de l'analyse par l'oreille, ni l'extraction de paramètres ne constituent les indices qui seront utilisés par l'auditeur pour l'interprétation du signal qui lui est destiné. L'oscillation des molécules provoquée par les articulateurs de parole du locuteur active chez l'allocutaire des processus auditifs et cognitifs complexes.

Mario Rossi, professeur à l'université d'Aix-Marseille I, responsable de l'unité associée "parole et langage" (UJA 261 CNRS), Institut de phonétique, université d'Aix-Marseille I, 19, avenue Robert Schumann, 13621 Aix-en-Provence.

L'oscillation des molécules créée par l'action des organes phonatoires (ou articulateurs) est elle-même organisée de façon complexe. Cette organisation est l'image de la complexité de l'encodage qui met en œuvre des processus permettant le passage des ordres linguistiques à l'articulation.

Chez l'homme nous ne savons pas comment sont codés, au plus haut niveau, les ordres moteurs : y a-t-il homomorphisme entre d'une part ces ordres et d'autre part la séquence des phonèmes (Liberman et al. 1967) ou les traits qui les définissent ou les indices qui composent ces derniers ? Nous sommes réduits aux hypothèses. L'information la plus haute que nous puissions recueillir réside dans l'activité musculaire. Or l'EMG (électromyographie) n'a pas permis de trouver l'invariant à ce niveau qui est caractérisé par l'ubiquité de la variabilité (1).

La tâche est compliquée du fait que les ordres moteurs ne sont pas isolés et sont transmis à des muscles hiérarchisés, les "structures coordinatives" : les ordres moteurs à court terme n'auraient pour rôle que de modifier les relations dans cette structure hiérarchique.

Si nous descendons d'un étage au niveau des articulateurs, la rupture de correspondance avec les unités linguistiques putatives du niveau supérieur semble quasi totale ; les articulations en effet, agissent et interagissent de façon complexe dans un espace à quatre dimensions (qui inclut bien entendu le temps). L'activité musculaire, l'organisation des articulateurs, ainsi que l'anticipation, phénomène fondamental dans le langage, sont à l'origine de la coarticulation qui caractérise la syllabe au sein de laquelle on peut dire que consonne et voyelle sont coproduites. La coarticulation recouvre une organisation tellement complexe que les nombreux travaux qui y ont été consacrés n'ont fait jusqu'ici qu'effleurer le sujet. Or la coarticulation est un phénomène essentiel, car elle est le résultat d'un projet, d'une préprogrammation du message à véhiculer sur une distance qui varie selon les niveaux linguistiques impliqués mais dont l'extension minimale est la syllabe. Sans cette préprogrammation, il n'y a pas de langage possible, donc pas d'objet phonique significatif.

L'image de la parole, empreinte vocale ?

• Variabilité contextuelle. Si, dans la parole, les éléments consonnes et voyelles sont coproduits et si l'objet phonique est le résultat d'une activité musculaire caractérisée par l'ubiquité de la variabilité, on comprendra qu'il est illusoire de rechercher dans le signal acoustique les unités linguistiques discrètes et inaltérables que reconstruit l'auditeur.

La coarticulation crée une variabilité contextuelle qui complique ou interdit la classification dans une même catégorie de deux ou plusieurs représentants d'une même entité. Ainsi dans l'énoncé *parole et langage*, les deux *(a)* sont représentés par deux images temporelles et spectrales totalement différentes (fig. 1A, 2A, 3A, 4A, entre les points 1 et 2, 9 et 10). Une classification qui ne tiendrait pas compte du contexte (pour *g*) aboutirait à ranger la deuxième représentation *(a)* dans la catégorie *(e)*. De même, les deux images temporelles et spectrales des consonnes *(f)* de cet énoncé ne sont pas superposables (voir entre les points 4 et 5, 6 et 7).

• Variabilité interindividuelle. La variabilité de l'activité musculaire à une autre source que la coarticulation : elle est liée au locuteur. Le volume et la forme des organes et des cavités varient d'un locuteur à l'autre. Deux locuteurs ne parlent pas le même idiolecte : cette diversité implique une stratégie articulatoire partiellement différente accompagnée de faits de compensation qui peuvent être liés à l'état des organes. Il est fréquent enfin que deux locuteurs appartiennent à deux régions caractérisées, comme on dit, par des accents différents. Ces trois ordres de diversité, idiosyncrasique, idiolectale et dialectale, s'ajoutent pour accroître la variabilité acoustique et la difficulté du décodage phonétique d'un énoncé. Ainsi, pour deux énoncés de même valeur linguistique (énonciation sans emphase), les productions de chacun des locuteurs (fig. 1B et 3B) montrent une variation de plus d'un ton entre les extrema de la fréquence fondamentale. Par ailleurs, les sonagrammes (fig. 1A et 3A) des locuteurs M.R. et L.S. ne sont pas exactement superposables, ni sur l'axe des fréquences ni sur l'axe temporel.

Des images : pour qui ? pour quoi ?

ainsi les formes spectrales des voyelles (/i/) et (/a/) entre les points 3 et 4, 9 et 10, divergent pour des raisons liées peut-être à la forme et au volume des cavités ; la différence entre les voyelles (/a/) est d'origine dialectale (entre les points 7 et 8) ; prononciation méridionale chez L.S., non méridionale chez M.R. ; en conséquence, deux réalisations différentes de (/i/) et (/a/) liées respectivement à la variabilité idiosyncratique et dialectale, semblent induire deux stratégies différentes pour le passage de (/i/) à (/a/) qui expliqueraient la divergence des structures acoustiques, en ce point du continuum de parole.

On conçoit dès lors la grande difficulté liée au décodage acoustico-phonétique, étape essentielle dans la reconnaissance automatique de la parole, tandis que l'auditeur humain reconnaît avec la même facilité apparente les énoncés émis par tous les locuteurs de sa communauté linguistique.

• **Variabilité intra-individuelle.** Étant donné qu'en dehors de l'effet du contexte, la variabilité dont j'ai parlé est liée au locuteur, on pourrait penser que l'image temporelle du spectre constitue en revanche ce qu'on pourrait appeler une empreinte vocale susceptible de permettre la reconnaissance de la voix d'un locuteur *x*(?).

Tel imitateur de talent sera capable de contrefaire la voix des hommes connus du grand public. Mais on s'aperçoit à l'analyse que l'imitation et l'original sont parfois très différents, malgré l'illusion créée chez les auditeurs. L'imitateur sait en effet extraire des voix qu'il contrefait les caractéristiques

essentielles, surtout les tics de langage, la voix cavernense, le bredouillement, le chuintement, le rythme saccadé, etc. ; ces caractéristiques frapperont l'auditeur et masqueront ce qui mesure de la voix de l'imitateur lui-même. Peut-on utiliser ces caractéristiques pour reconnaître la voix de *x* ? Cette méthode constituerait une extrapolation dangereuse car, outre que tout locuteur est capable de déformer sa propre voix et donc d'ajouter à la variabilité, ces signaux distinctifs peuvent ne pas être propres à un locuteur, mais caractériser une classe d'individus.

Quand on connaît les sources de la variabilité inter-individuelle, on comprend que ce qui fait l'individualité de la voix est plus intime que ces signaux. Dans le continuum de parole, l'organisation portante de l'information phonétique et celle qui renvoie au locuteur ne sont pas superposées, elles sont intimement mêlées. Mais l'évolution temporelle du spectre ou de certains paramètres de la parole, comme le rythme et la mélodie, ne constituent pas pour autant des "empreintes vocales" à cause de la variabilité intra-individuelle.

Non, ne possédons pas de système phonatoire propre ; la parole est réalisée par un "dispositif adapté", emprunté aux fonctions vitales de l'organisme. De ce fait, ce dispositif est créateur de "bruit" (inertie, temps de latence, etc.) et donc de variabilité. Par ailleurs, on peut considérer le langage comme un système complexe à autorégulation : le locuteur est exposé au "bruit" (au sens de la théorie de l'information) de l'environnement ;

le langage s'adapte aux conditions de la communication ; cette adaptation, source de variabilité intra-individuelle, est provoquée par des facteurs externes mais aussi internes (affectivité, état de santé, etc.).

Tout locuteur est donc soumis à la variabilité : le même énoncé produit par le même locuteur à quelques minutes d'intervalle sera réalisé différemment.

Il en est ainsi des deux répétitions de l'énoncé parole et langage par M.R. et L.S. respectivement :

— **Réalisation de M.R. (fig. 1A et 1B, 2A et 2B) :**

Les extrema de la fréquence fondamentale (signe b des figures 1B et 2B) sont différents : la durée des voyelles (/i/, é, a/) dans la production de la fig. 1A est plus longue que dans celle de la fig. 2A ; les deux consonnes (/t/) sont alors caractérisées (fig. 2A) par un abréviation compensatoire qui fait pratiquement perdre son individualité au second, etc.

— **Réalisation de L.S. :**

La comparaison entre les points 4 et 6, sur (/i/) et (/é/) des fig. 3A et 4A est éloquent. Elle suffit à confirmer mon propos.

L'image de la parole.

En conséquence, assimiler l'image acoustique de la parole à des empreintes vocales permettant l'identification certaine d'un suspect, relève, en l'état actuel de la recherche, de la mystification. Les participants à un colloque consacré à l'identification du locuteur et qui s'était tenu à Padoue

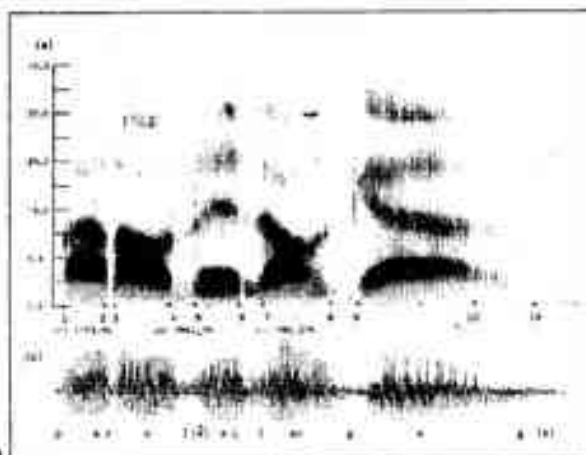


Fig. 1A

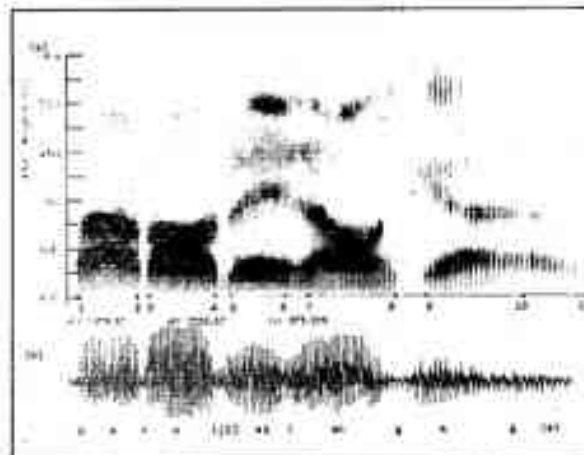


Fig. 2A

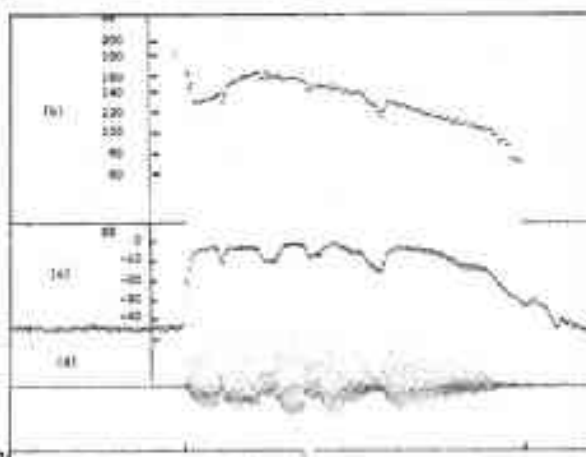


Fig. 1B

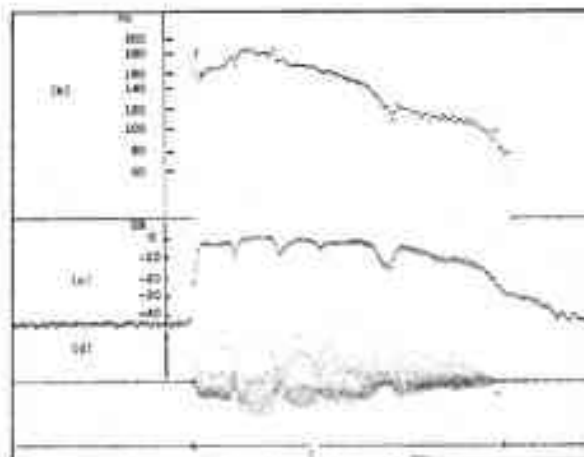


Fig. 2B

Des images : pour qui ? pour quoi ?

à l'époque dramatique des "Brigades Rouges", avaient conclu que dans le meilleur des cas la possibilité d'identification ne dépassait guère les 60% (3) compte tenu des conditions dans lesquelles s'effectuait l'expertise (et en particulier de la distorsion apportée par le téléphone).

En revanche, des techniques sont au point qui permettent d'utiliser l'image acoustique de la parole pour la signature vocale, dans les systèmes qui s'ouvrent à la voix du maître (4). Mais à condition que l'utilisateur contraigne sa variabilité et s'adapte au système, c'est-à-dire à sa propre voix qui a servi de modèle !

En résumé, pour un même énoncé, relativement court, dit deux fois par deux locuteurs à quelques minutes d'intervalle, nous obtenons quatre images acoustiques différentes. L'effet du contexte, les caractéristiques idiosyncrasiques, idiolectales et dialectales, le "bruit" de l'environnement et celui du dispositif utilisé dans le traitement de la parole constituent les sources de cette variabilité.

Malgré cette variabilité, l'auditeur humain est parfaitement capable de reconnaître à la fois le message et la voix de Valérie, François, Jacques ou Gaston. L'œil du phonéticien est capable de reconnaître entre ces quatre images du même énoncé une parenté indéniable ; l'œil de l'expert sait extraire un squelette, une forme qui devrait suffire à un bon décodage acoustico-phonétique. Des progrès ont été effectués dans le décodage automatique de la parole et l'identification de la voix. Le chemin le plus long reste encore à par-

courir. Mais peut-être n'avons-nous pas su biter encore les outils d'analyse ou d'interprétation qui permettraient de traiter automatiquement les catastrophes de la parole comme sait le faire l'humain.

Fig. 1A - Énoncé : parole et langage dit par le locuteur M.R. à 15 h 30.

a) Image tridimensionnelle de l'évolution temporelle du spectre (le temps en abscisses, la fréquence en ordonnées, les nuances de gris sont l'image de l'intensité du signal) : sonagramme obtenu à partir du signal digitalisé à l'aide d'un logiciel de traitement du signal élaboré par R. Egesse, ingénieur, (LIA 261). FFT toutes les 10 ms.

b) Signal temporel (représentation temps/amplitude) ou oscillogramme. Fréquence d'éch. 8kHz. Les signaux a et b sont synchronisés.

Fig. 1B - Extraction des paramètres prosodiques du signal représenté sur la fig. 1A.

b) Evolution de la fréquence fondamentale, image de la mélodie.

c) Evolution de l'intensité.

d) Signal temporel.

Fig. 2A - Énoncé parole et langage, dit par le locuteur M.R. à 15 h 40. Voir légende sous 1A.

Fig. 2B - Extraction des paramètres prosodiques du signal représenté en 2A.

Fig. 3A - Énoncé parole et langage dit par le locuteur L.S. à 15 h 45. Voir légende sous fig. 1A.

Fig. 3B - Extraction des paramètres prosodiques du signal représenté sur la fig. 3A.

Fig. 4A - Énoncé parole et langage dit par le locuteur L.S. à 15 h 55. Voir légende sous fig. 1A.

Fig. 4B - Extraction des paramètres prosodiques du signal représenté sous la fig. 4A.

Bibliographie

- (1) Stoddert-Kennedy, (M.), "The perception of speech", *Current Trends in Linguistics*, 1973, pp. 15-48.
- (2) Tosi (D.), *Voice Identification, Theory and Legal Applications*, Un. Park Press, Baltimore, 1973.
- (3) Ferrero (F.), (à cura di), *L'identificazione della persona per mezzo della voce*, ed. scientifiche associate, Roma, 1979.
- (4) Corsi (P.), *Reconnaissance automatique du locuteur*, thèse de Docteur ingénieur, Grenoble, 1979.
- (5) Egesse (R.), "Un logiciel de traitement du signal de parole sous UNIX", 13^e JEP, Bruxelles, 1984, pp. 173-175.
- (6) Liénard (J.-S.), *Les processus de la communication parlée*, Masson, Paris, 1977.

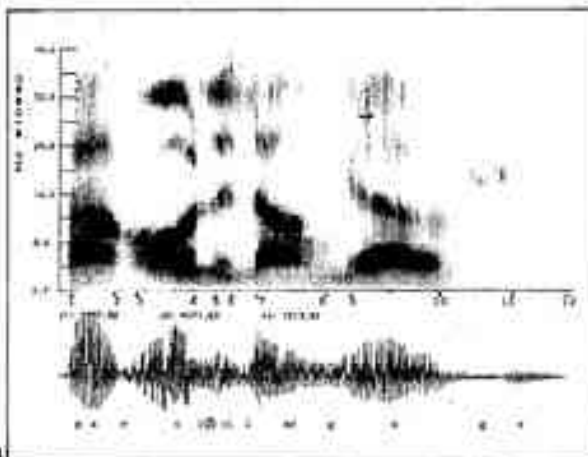
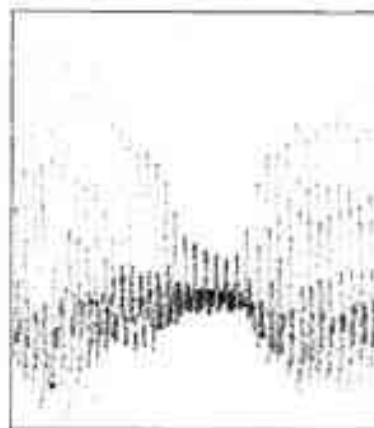


Fig. 3A

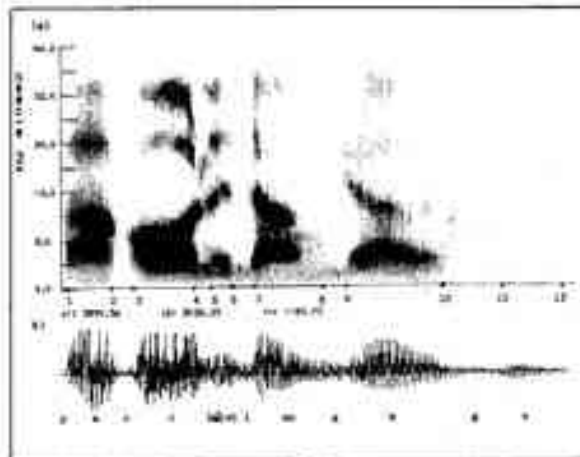


Fig. 4A

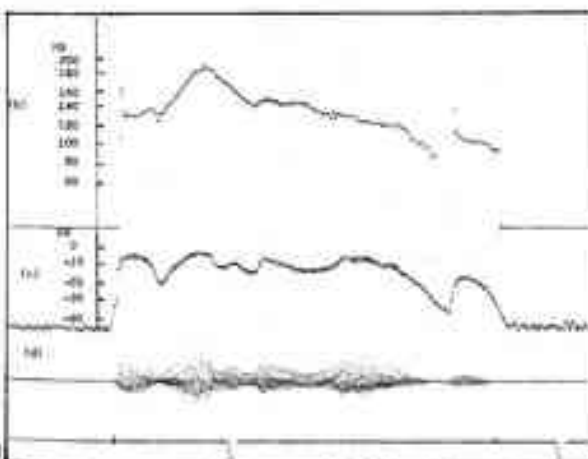


Fig. 3B

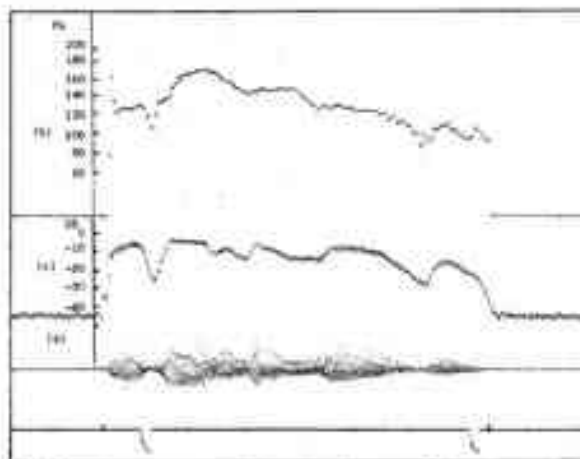


Fig. 4B

Des images : pour qui ? pour quoi ?

IMAGE DE LA MUSIQUE

Gilbert Rouget

Convertir le son en image, de manière à disposer, pour la recherche, de données matérielles rigoureusement objectives et immédiatement repérables, manipulables et communicables, telle est l'opération dont on décrit ci-dessous l'utilité en ethnomusicologie. L'objectif est ici de mettre en lumière, par ce moyen, des structures musicales dont l'existence en Afrique était jusqu'à présent insoupçonnée.

En 1984, lors de l'exposition organisée par le CNRS : *Images de la recherche : la communication*, le visiteur pouvait écouter, au casque, l'enregistrement d'un très long chant africain. Simultanément, sous ses yeux, une flèche lumineuse se déplaçait le long d'une représentation graphique de cette musique, pour lui permettre d'en suivre très exactement le déroulement. Cette représentation graphique de très grandes dimensions (trois mètres de long sur deux de haut) était complétée par un autre tableau plus petit, reprenant les mêmes éléments que le précédent mais en les segmentant et en les disposant d'une autre manière. C'est ce second tableau qui est reproduit ici.

Le chant ainsi donné à voir et à entendre est un chant initiatique de tradition purement orale et ne devant être exécuté que dans certaines circonstances très précises. Pourquoi avoir choisi, pour le présenter au public, cette association qu'on

Gilbert Rouget, directeur de recherche honoraire au CNRS, "Études d'ethnomusicologie" (ER 165 du CNRS), Musée de l'Homme, département de la musique, Palais de Chaillot, 75116 Paris. Sonagramme de Jean Schwarz, ingénieur au CNRS.

peut insulter d'une si vaste image et d'une écoute si confidentielle ?

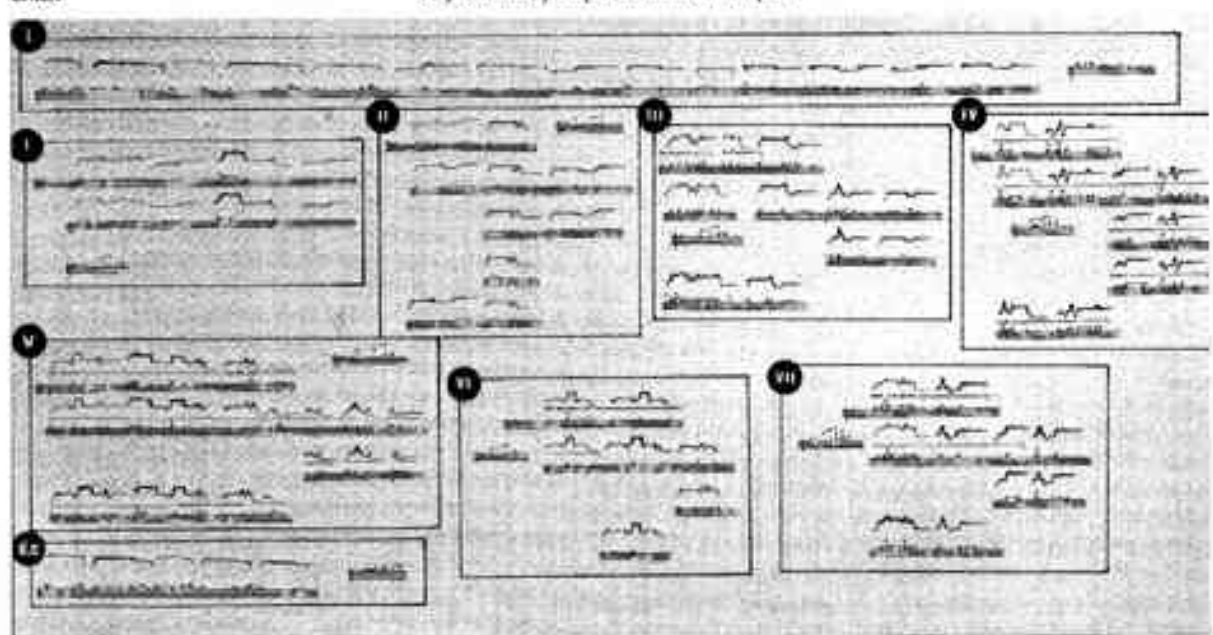
L'aspect confidentiel de l'écoute était destiné à mettre l'auditeur dans la disposition d'esprit attentive et déferente que requiert ce genre de musique. Les dimensions particulièrement importantes de la représentation graphique avaient pour but de lui permettre d'apprécier, dans le détail, la qualité plastique du tracé obtenu par machine et reproduisant très fidèlement, en deux dimensions, les inflexions de la mélodie. Sans doute s'agit-il là du plus long sonagramme jamais offert au public, puisqu'il représente, dans sa continuité, un chant durant près de douze minutes.

La disposition paradigmatique offerte par le tableau permet à l'auditeur de comprendre la structure interne de l'œuvre, dont l'autre tableau (celui de trois mètres sur deux) lui avait donné une lecture syntagmatique. Mais soulignons-le ici, au stade de la découverte c'est ce premier tracé, syntagmatique, qui avait permis, par application du critère de répétition, l'identification des constituants mélodiques que l'on voit disposés en séries verticales.

À l'heure où le traitement digital du son offre tant de possibilités, pourquoi, demandera-t-on peut-

être, avoir recouru à sa représentation analogique ? La réponse est simple : parce que c'est elle qui convenait le mieux à notre propos.

Partition composée d'un tracé obtenu par Sonograph, reproduisant la courbe mélodique du chant avec, en dessous, sa transcription classique en notation occidentale. Le tableau montre que ce chant est composé d'une succession de sept grandes unités de discours (stances), précédées d'une introduction partiellement reprise à la fin en forme de *da capo*. Chaque stance est composée d'un certain nombre d'unités mélodiques qui s'enchaînent en se répétant de diverses façons, suivant un modèle de répétition variant chaque fois d'une stance à l'autre. La disposition synoptique met en évidence le paradigme de la répétition pour chacune des sept stances. La partition se lit en parcourant, dans l'ordre, les tableaux partiels, de haut en bas et de gauche à droite, la continuité de la musique étant ainsi respectée. Chaque tableau comporte, un peu à part, l'indication de l'échelle musicale qui lui est propre. La structure générale de l'œuvre apparaît ainsi très clairement. Durée : 11 mn 48 s.



Des images : pour qui ? pour quoi ?

LES IMAGES DE L'ACTIVITE HUMAINE

PHOTOGRAPHER LE THÉÂTRE POUR LA RECHERCHE

Denis Bablet

Le théâtre est un art vivant, éphémère. Il faut pouvoir le fixer sans le figer. Là intervient la photographie de théâtre. Son problème principal réside dans la nécessaire soumission du photographe aux buts scientifiques. La photographie de théâtre doit être analysable, il faut qu'au-delà de la suggestion d'une atmosphère, elle soit pour nous un outil de révélation.



Fig. 1 - Le cercle de craie caucasien de Bertolt Brecht, par le Théâtre de Liberté, mise en scène de M. Ullusoy, Théâtre de la Cité universitaire, Paris, 1984. (Photographie Jacques Bablet / CNRS. 3 M 640 ASA. Prise au zoom.)

Dans la pièce de Brecht des paysans jouent avec les moyens du bord récupérés dans un pays dévasté par la guerre. *Le cercle de craie*.

Mehmet Ullusoy s'empare de l'œuvre et allie ses sources d'inspiration populaire avec son goût pour l'objet traité par l'art moderne, pour les matières usées, avariées, pour les instruments inventés ou réinventés, ce qui lui permet d'atteindre la métaphore du réel. Ici ce plan moyen a été pris pour mettre en valeur les textures des matériaux, les objets détournés de leur signification première. Pour fond, une vaste toile en patchwork couleur de terres et de forêts, aux significations changeantes, tour à tour murs de château ou rivières. Pour le costume du prince, des chambres à air, signes des enfures et des dégoûts du pouvoir, expression d'une forme de grotesque pour aujourd'hui.

Fig. 2 - Wielopole-Wielopole de Tadeusz Kantor par le Théâtre Cricot 2, Théâtre des Bouffes du Nord, Paris, 1980. (Photographie Jacques Bablet / CNRS. Ektachrome 160 ASA, poussé 600 ASA, Objectif 50 mm.)

Il ne s'agit pas ici d'une photographie de représentation mais de répétition avant que le spectacle créé à Florence soit donné à Paris. Non pas une de ces habituelles "répétitions de raccord" mais une véritable reprise en main où Tadeusz Kantor (par l'attitude, la parole et le geste) initie à nouveau au spectacle rythme, tension, mouvement intérieur. Le but de cette photographie est de souligner le rapport physique et de suggérer la relation mentale entre Kantor et les comédiens, de montrer les porteurs de thèmes essentiels (soldats, famille, crucifié), de mettre en valeur deux figures de base du théâtre de T. Kantor : le cercle et la ronde, tout cela sur un pauvre plateau de bois à ras du sol. Pour mieux faire apparaître les coordonnées et la nature de l'espace, la photographie a été prise en légère plongée depuis un gradin du Théâtre des Bouffes du Nord.

Fig. 3 - Où sont les neiges d'antan ? de Tadeusz Kantor par le Théâtre Cricot 2, Genève, salle de Plainpalais, 1983. (Photographie Jacques Bablet / CNRS. 3 M 640 ASA. Objectif 50 mm.)

Dans ce bref spectacle de Tadeusz Kantor un premier élément physique : l'aire de jeu est une sorte de piste, de route bordée de chaque côté par les spectateurs assis sur des gradins. L'action : des hommes vêtus de papier blanc tirent et secouent dans un va-et-vient angissant une grande bande de papier blanc qu'ils abaissent peu à peu jusqu'à en recouvrir le corps de la jeune femme morte. Voile de mariée et linceul. Le blanc couleur de vie et de mort. Pour montrer l'espace et l'interaction action-spectateurs, pour saisir l'action dans sa globalité, la photographie a été prise de biais et en plongée relative sans qu'on tente à aucun moment de renforcer la perspective.

Denis Bablet, directeur de recherche au CNRS, directeur du Laboratoire de recherche sur les arts du spectacle (LP 12 du CNRS), 10, rue Charles V, 75004 Paris.

Des images : pour qui ? pour quoi ?

LA PHOTOGRAPHIE ET L'ŒUVRE D'ART

Magdeleine Hours

La photographie scientifique peut-elle servir l'œuvre d'art ?

Dès le début du XIX^e siècle, Niepce écrivait : *Je cherche un meilleur moyen de reproduire l'œuvre d'art, sous entendu meilleur moyen que "la gravure", technique qui depuis des siècles avait pour but essentiel de diffuser peintures et sculptures.*

Quelques années plus tard, lorsque l'Académie livra au monde la découverte de Niepce (la photographie) et de Daguerre, c'est encore la question posée : *la photographie peut-elle servir les arts ?* Aujourd'hui, la réponse est indubitablement positive. André Malraux, dans *Le Musée imaginaire* a fait la démonstration du rôle de la photographie dans l'histoire de l'art et de sa participation à notre civilisation : celle de l'image.

La photographie scientifique utilisant tout l'empire des ondes électromagnétiques, élargit notre connaissance dans l'invisible et contribue à une vision nouvelle de l'œuvre étudiée. Elle permet de révé-

ler les altérations des œuvres d'art (peinture, accidents apparaissant sous les rayons ultraviolets) mettant également en évidence les étapes de la création artistique, les reprises et repentirs de l'artiste (photographie sous infrarouge) permettant de déchiffrer textes et inscriptions illisibles.

L'image radiographique est vraisemblablement le moyen le plus démonstratif d'enrichir nos percep-

tions. L'ensemble des documents, fruits de l'exploration de l'œuvre d'art, éclairent les problèmes de technique, d'état de conservation et révèlent les étapes de la création, permettant de dissocier l'original de la copie. Bien interprétés, bien intégrés aux éléments de la critique traditionnelle, ils la transforment et l'enrichissent.

C'est non seulement un nouveau moyen de perception que la photographie nous offre, mais une méthode critique nouvelle.

Rembrandt, *Bethsabée (détail)*, Musée du Louvre, Paris.

A - La photographie représente la tête de la Bethsabée, c'est-à-dire la partie supérieure du tableau conservé au musée du Louvre, chef d'œuvre de Rembrandt. La photographie est obtenue en lumière artificielle directe. (© Laboratoire de recherche des Musées de France).

B - Ce document est une radiographie de la même partie du tableau ; les rayons X utilisés sont de 44 kilovolts, 4 milliamperes, 1 minute de pose. L'image est obtenue par contretype du film radiographique original. Elle met en évidence les hésitations du peintre, ses repentirs.

Elle permet de percevoir les esquisses successives faites par le maître devant son modèle : c'est une manière de remonter le temps et de découvrir les étapes de la création. (© Laboratoire de recherche des Musées de France).



Magdeleine Hours, inspecteur général honoraire des Musées de France, ex-maître de recherche au CNRS de 1962 à 1972, a dirigé pendant plus de quarante ans le Laboratoire de recherche des Musées de France, Palais du Louvre, 75001 Paris. Elle est l'auteur de nombreux ouvrages sur ce même thème dont *Les secrets des chefs d'œuvre*, Robert Laffont.



KARNAK ET SON JEU DE PUZZLE

Jean-Claude Golvin

La richesse documentaire de Karnak et la variété des problèmes scientifiques qui se posent ont encouragé depuis trois ans le développement sur place de moyens informatiques ainsi que la collaboration de la Mission permanente avec d'autres laboratoires.

A Karnak, les recherches sur les Talatat progressent rapidement grâce à l'informatique. Il s'agit de reconstituer de petits blocs, appelés Talatat (provenant des édifices d'Aménophis IV à la fin de la XVIII^e dynastie), dont la réutilisation massive a entraîné la délocation complète des scènes qui les décoraient. Ainsi, chacun de ces petits éléments parallélépipédiques de forme et de dimensions identiques (25x25x50 cm), retrouvés au cours des fouilles récentes pratiquées à l'intérieur du IX^e pylône, comporte-t-il un fragment de scène identifiable

mais impossible à raccorder tout de suite avec une autre pierre décorée.

Le problème consiste donc à reconstituer un étrange puzzle, dont on ne connaît pas le modèle d'origine et sans savoir quel pourcentage véritable représentent les 12 500 pierres connues par rapport à l'ensemble de celles qui ont existé. Or, comme il n'est pas encore possible aujourd'hui de procéder directement à la reconnaissance des formes par les moyens informatiques, le raisonnement qui nous permet d'aboutir aux assemblages s'appuie actuellement sur les recherches effectuées

à partir du lexique très précis qui fut utilisé pour décrire chaque bloc et constituer le fichier informatisé de base.

Ainsi, à partir d'un fragment de décor connu, et par extrapolation, il est souvent possible de décrire assez précisément la pierre voisine recherchée et de demander à l'ordinateur de la retrouver. De plus, une recherche sur des combinaisons d'association iconographique et de voisinage thématique portant essentiellement sur la manipulation du lexique permet déjà de regrouper, par édition de listing, des blocs appartenant potentiellement à un même assemblage. La recherche des images (et donc celle des assemblages possibles) s'appuie par conséquent beaucoup sur celle des associations de mots et d'idées : l'ordinateur est capable d'identifier les blocs répondant aux définitions énoncées et l'assemblage final, s'il est pertinent, est effectué visuellement à l'aide de photographies. L'utilisation prochaine de programmes-experts dans le cadre de la convention de collaboration établie avec la direction des études et recherches de l'Électricité de France va permettre de pousser de façon aussi importante que possible ce type d'intervention qui devrait à terme nous donner toutes les possibilités d'assemblage existant entre les 12 500 blocs considérés, apportant ainsi une contribution majeure à l'étude d'une des périodes les plus originales de l'histoire égyptienne.

Application de la conception assistée par ordinateur (CAO) à la visualisation spatiale des temples pharaoniques.

La convention de collaboration précitée, permet en outre de réaliser déjà dans un autre domaine une expérience nouvelle. Il s'agit en se fondant sur les dessins de restitution du temple d'Amon, (achevés en 1984-85), de faire enregistrer à l'ordinateur la forme exacte des volumes architecturaux afin d'obtenir ensuite des vues aussi nombreuses et variées que possible (axonométries et perspectives), capables de traduire l'aspect général des édifices et même d'exprimer différentes phases bien connues de leur évolution.

Fig. 1 - Exemple de talatat extraite du IX^e pylône. Représentation très rare dans l'art égyptien, un voyage est figuré vu de face. Il s'agit certainement d'une scène de massacre de prisonniers analogue à celles qui décoraient les grands pylônes de Médinet-Habou ou d'Edfo.
Fig. 2 - La beauté des bas-reliefs d'Aménophis IV et l'abondance des renseignements fournis par les 12 000 petits blocs retrouvés dans le milieu ouest du IX^e pylône laissent présager de l'intérêt scientifique et artistique que représenteront les assemblages ici, la reine Néfertiti embrassant le sol.



Jean-Claude Golvin, directeur de recherche au CNRS, directeur de la mission permanente en Égypte, (MP 1002 du CNRS) Ambassade de France au Caire, Centre franco-égyptien des temples de Karnak, service de la valise, Ministère des affaires étrangères, 37, quai d'Orsay, 75007 Paris.

Des images : pour qui ? pour quoi ?

L'IMAGE : AIDE À LA CONCEPTION DE CIRCUITS

Jean Mermet, Yvon Bressy

Outil de simulation et prédiction de phénomènes, l'image est un moyen de dialogue irremplaçable.

L'image est l'un des deux supports de base de la conception assistée par ordinateur (CAO) en général, l'autre étant le texte à travers les langages de description ou de spécification. En mécanique, par exemple, l'image a toujours prévalu, mais on doit souvent la compléter par des expressions analytiques ou fonctionnelles. On peut, dans certains cas, la remplacer totalement par du texte. C'est le cas en dessin industriel où le dessin est loin de traduire toutes les caractéristiques d'une pièce et où une macro-instruction paramétrée peut parfois efficacement générer toute une famille de pièces (vis, chanfrein...).

En électronique, le dessin a aussi toujours prévalu dans les phases terminales de la conception comme la synthèse logique ou la production de masques pour cartes imprimées ou circuits intégrés. Mais, dès les débuts de la CAO (et des années 60), la saisie des modèles s'effectuait sous forme d'équations et le texte semblait d'autant plus indispensable que les descriptions se situaient à des niveaux d'abstraction élevés. En même temps, la saisie de schémas logiques à l'aide de digitaliseurs à partir du dessin, en général manuel, était utilisée par les concepteurs. Depuis 1980, l'entrée de modèles directement sous forme graphique sur station de travail se développe rapidement. Ceci d'autant plus aisément que les performances demandées permettent de se contenter d'outils graphiques assez rudimentaires (par rapport à ceux utilisés en CAO mécanique par exemple). C'est ainsi que sont apparus, sur le marché, de nombreux systèmes de saisie de schéma (schématique capture). Ce sont en général, des outils symboliques simples, permettant de visualiser et de décrire des synoptiques de fonctions ou de schémas logiques ou électriques.

Les langages de description se sont développés en



Yvon Bressy, ingénieur d'études au CNRS, Jean Mermet, directeur de recherche au CNRS, responsable de l'Atelier de recherche sur les techniques mathématiques et informatiques de systèmes (ARTEMIS - UA 396 CNRS), informatique et mathématiques appliquées de Grenoble, domaine universitaire de Saint-Martin-d'Hères, BP 68, 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex.

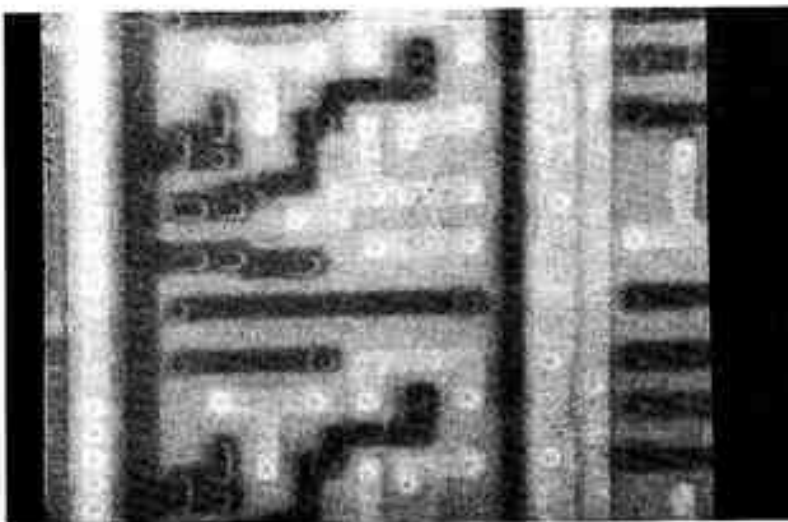


Fig. 1

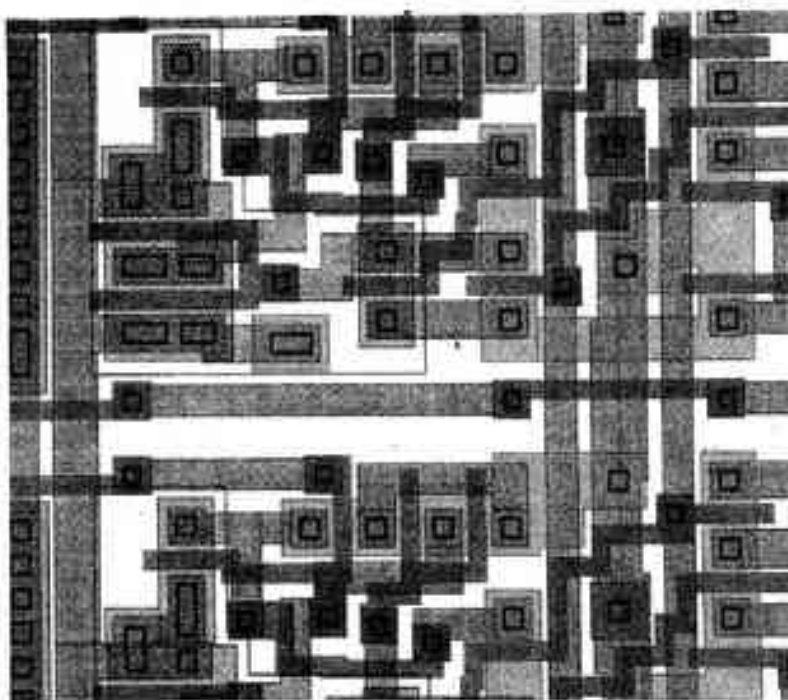


Fig. 2

parallèle et ont permis de prendre en compte rapidement, après les notions structurelles, les propriétés temporelles et même des notions fonctionnelles d'un niveau comparable à celles que l'on peut trouver dans un langage tel que "ADA".

Examen des résultats

La CAO utilise, aujourd'hui, de nombreux programmes d'application souvent très complexes pour la simulation des circuits, l'étude de leur stabilité en leur synthèse (compilateurs de silicium par exemple).

Plus personne, aujourd'hui, n'accepte de dépouiller

des résultats souvent pléthoriques sur l'iting. La représentation des signaux sous forme de courbes (waveforms) s'est maintenant largement imposée comme moyen d'expression des valeurs en fonction des variables apparaissant dans la description des circuits, aussi bien en entrée qu'en sortie.

CASCADE*, par exemple, possède un environnement de préparation d'expérimentation à l'aide

* Circuits And Systems Computer Aided Design & Engineering - CASCADE. Marque déposée du Laboratoire ARTEMIS, UA 396.

Des images : pour qui ? pour quoi ?

duquel l'usager peut définir graphiquement des séquences de stimuli d'entrée. Après la simulation proprement dite, il peut activer une phase d'analyse de résultats comportant des tracés de chronogrammes, courbes d'ondes électriques, etc.

De même, les sorties des applications de synthèse des circuits se présentent sous forme de dessins de plus en plus proches de l'objet final. D'abord schémas logiques générés par synthèses à partir d'équations, puis implantation symbolique après les programmes de placement-routage, et enfin "géométrie", avec la production d'un dessin réaliste et géométriquement exact des différents niveaux de masques d'un circuit.

Un moyen de dialogue indispensable

L'image et le terminal graphique interactif, sont devenus une composante majeure de l'environnement de dialogue dans les outils CAO. Elle permet de matérialiser clairement le choix d'actions à exécuter à l'aide de menus hiérarchisés. La visualisation simultanée de plusieurs notions dans des fenêtres distinctes permet une appréhension aussi globale que nécessaire de l'ensemble des actions en cours et des informations à connaître à un même instant, tout en donnant la possibilité de focaliser l'attention sur un point de détail critique en faisant un "zoom" sur la zone concernée du circuit.

L'outil de dessin pour la CAO des circuits

Le travail de dessin en lui-même ne pose pas de problème, à condition toutefois, que l'outil graphi-

que possède les qualités requises de rapidité de réaction, de souplesse, de fidélité. Le concepteur procède par approximations successives, intégrant à chaque nouvelle version une donnée qui lui a échappé précédemment. Ses deux outils sont le crayon et la gomme. Il faut que le dessin sur l'écran accompagne la main de l'utilisateur sans qu'il soit nécessaire, comme sur certains terminaux bas de gamme, d'effacer la totalité de l'écran puis de le réécrire pour qu'une modification se manifeste. On peut envisager, dans les temps à venir, une visualisation du fonctionnement du simulateur logique ou électrique où les portes logiques et les équipements changent d'aspect au rythme de leur changement d'état logique ou électrique. Il est difficile et sans doute sans intérêt d'envisager de visualiser le fonctionnement simulé de la totalité d'un circuit. En revanche, on peut imaginer de déplacer le point d'observation sur la partie du circuit qui doit faire l'objet d'une visualisation dynamique. On pourrait ainsi faire apparaître clairement dans un schéma logique le chemin le plus long que peut emprunter l'information pour traverser le circuit et orienter le concepteur vers la recherche d'une structure moins pénalisante pour ce transfert d'information quand cela est possible.

On peut aller plus loin et faire apparaître ainsi la représentation physique du circuit (ou du moins son abstraction avec le dessin des masques superposés). La base de données des structures associées aux différents programmes du système CAO doit assurer la cohérence entre les différentes vues du même objet (et donc dans notre cas, entre la

"vue physique" et les vues "structurelles" et "logiques"). Ainsi on peut faire changer la couleur des polygones correspondant à une vue variable qui change d'état. On obtient l'équivalent entièrement synthétisé de l'observation stroboscopique sous microscope du circuit réel (fig. 1 et 2). Toute une palette de nouvelles prédictions (fonctionnement thermique, capacités parasites, risques de court-circuit) peut être offerte par une image de plus en plus réaliste.

En matière de CAO des circuits, les progrès simultanés de l'image et du texte ne s'opposent pas, mais se stimulent tous deux au fur et à mesure que la CAO remplit de plus en plus de tâches. Dans tous les cas où les deux représentations offrent le même service, le choix doit être laissé au concepteur pour qu'il adopte le mode de représentation et d'expression qui lui est le plus familier et qui rend son travail le plus efficace.

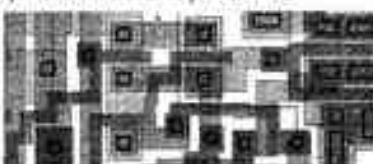


Fig. 1 - Vue stroboscopique d'un circuit en cours de fonctionnement observé au microscope électronique (visualisation de la propagation des signaux par contraste de potentiel : blanc 0 volt, noir 5 volts) (fichier CNET-Meylan CCI/MCC).

Fig. 2 - Dessin des masques correspondant à la partie du circuit observée figure 1 (fichier CNET-Meylan CCI/MCC).

L'ARCHIVAGE DES IMAGES : DES FICHIERS AUX BASES DE DONNÉES

Robert Jeansoulin

On sait archiver les images dans des systèmes de fichiers, on commence à savoir accéder un peu plus intelligemment à ces fichiers, mais on ne sait pas encore vraiment gérer les bases de données-images autant pour des raisons physiques que pour des raisons sémantiques.

Dans tous les domaines où une part importante de l'information se présente sous forme photographique, le besoin de méthodes de classement et d'accès automatiques devient évident.

Au-delà de ce besoin, la perspective de manipuler le contenu lui-même des images, et de déduire des relations entre les objets représentés, sera pro-

chainement possible avec les progrès attendus des bases de données et de l'intelligence artificielle.

Les besoins de gestion des images

Le besoin fut essentiellement documentaire pendant des années. Le support des images était le tirage papier ou le film, et le classement se limitait à l'utilisation de quelques mots-clés.

L'imagerie numérique et informatisée a fait son apparition dans les quinze dernières années, dans quelques domaines particuliers :

- physique nucléaire, astronomie : séries temporelles d'un même phénomène observé.
- médecine : clichés associés avec dossiers médicaux.

- robotique, industrie : images traitées "à la volée", rarement archivées.

- télédétection : quelques images par zone d'étude.

Dans la plupart des cas, les différents objets ou phénomènes scientifiques observés avaient leurs méthodes de classement propres. L'existence d'une image associée étant seulement un attribut supplémentaire.

Entre les années 1970 et 1980 (fig. 1), l'apparition de l'imagerie numérique, des systèmes de gestion de bases de données (SGBD), et plus récemment de l'intelligence artificielle, est venue modifier la situation, avec les deux conséquences suivantes :

- une multiplication des sources d'images que l'on peut mettre en relation selon différents critères (date, zone, thème...), qu'il s'agisse de relations entre images ou avec d'autres informations (notamment graphiques : cartes, contours...)
- une grande souplesse de visualisation sur écran : accès rapide, à distance, sur un matériel informatique capable de gérer de nombreuses tâches complexes.

Ce n'est pas un hasard si le domaine géographique est le lieu de développement privilégié des systèmes de base de données cartographiques et image.

Robert Jeansoulin, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire d'Informatique pour la mécanique et les sciences pour l'ingénieur - LIMS (LP 3251 du CNRS), université de Paris XI, Bâtiment 508, BP 30, 91406 Orsay Cedex.

Des images : pour qui ? pour quoi ?

Les problèmes spécifiques de la gestion des images

Des systèmes de gestion de base de données (notés SGBD) existent depuis une vingtaine d'années. Leur but est d'offrir un modèle d'organisation des données capable de répondre à des requêtes d'accès plus complexes qu'un simple appel par nom. Pourquoi un tel progrès n'a-t-il pas été pris en compte par les systèmes de traitement d'image ? Deux types de problèmes font obstacle à l'utilisation des SGBD classiques.

Le premier est d'ordre physique et tient au fait que les images contiennent une quantité colossale d'informations. Ainsi par exemple, une seule image SPOT (un carré de 50 x 60 km au sol) renferme 36 millions d'octets. Même avec une compression efficace (1/5), une centaine d'images occupe plusieurs milliards d'octets !

Jusqu'à une période très récente, les images numériques étaient conservées exclusivement sur bandes magnétiques, avec ce que cela implique de manipulation manuelle. De plus, l'accès uniquement séquentiel, ne permet pas la prise en compte des deux dimensions de l'image.

Les nouvelles mémoires de masse, d'apparition récente, peuvent offrir un service en ligne sur plusieurs milliards d'octets : vidéo-disques numériques, qui sont chers à la création, et les magnétoscopes pilotés par ordinateur, associés à un numériseur temps-réel, et surtout les disques optiques numériques, d'utilisation plus standard. Il est plus facile sur ces matériels, de définir des méthodes d'accès rapide par bloc, ce qui prend en compte les deux dimensions.

Le second obstacle qui freine la mise en place de SGBD aux images est d'ordre sémantique. En effet, les SGBD classiques répondent à des questions qui se résument à des recherches textuelles sur les informations enregistrées. Et un SGBD-image, que doit-il faire de plus ? L'exemple suivant, emprunté au cinéma, illustre le problème.

Imaginons un SGBD classique contenant des relations film/acteur. Il saura répondre à la question : "De Niro et Depardieu ont-ils joué ensemble ?" Il ne s'agit, pour le système, que d'une simple reconnaissance de chaînes de caractères portant implicitement sa propre sémantique. Imaginons, à présent, de poser la même question à un SGBD-images contenant des relations film/photo ou acteur/photo. Le système restera sans réponse. A moins d'y introduire des relations film/acteur/photo, artifice ramenant au cas purement textuel. Certes, cette solution peut rendre service (visualiser une image si la réponse à la requête est positive). Mais c'est une tromperie si on la qualifie de "SGBD-image".

En fait, l'obstacle majeur à une véritable utilisation des SGBD pour les images provient de la faiblesse des méthodes de reconnaissance des formes. Situation particulièrement frustrante quand un simple coup d'œil permet, généralement, de reconnaître De Niro et Depardieu.



Évolution des caractéristiques de gestion d'images

Figure 1

Années	Données	Supports	Critères	Accès
1970	photos (+) commentaires	analogique papier/film	clé unique (nom)	manuel
	photos + commentaires + graphique	papier/film + vidéo + numérique	sélection/ projection (zone + date)	interactif
1980	idem + traitements associés		requêtes complexes	interactif + automatique



LES COMPOSANTES ESSENTIELLES D'UN SGBD CLASSIQUE

On distingue classiquement trois couches dans un SGBD, correspondant à des modèles différents :

- 1) le modèle externe : défini par l'utilisateur, accessible par un langage de haut niveau,
- 2) le modèle conceptuel : cœur du SGBD, doit offrir une structure adaptée et un ensemble cohérent d'opérations,
- 3) le modèle physique : doit être efficace, en temps et en place mémoire.

Les familles de modèles conceptuels, classiques en SGBD, sont :

— le **réseau** (modèle Codasy), et le **hiérarchique** (cas particulier très courant du précédent), qui permettent de représenter des liens de dépendance ou d'inclusion entre des objets, mais dont la manipulation est souvent très liée à l'application.

— le **relationnel** (ce mot pris au sens mathématique du terme), qui a pris un net avantage à cause de l'ensemble cohérent d'opérations qui le définit : l'**algèbre relationnelle**. Par contre, la notion de lien de dépendance ne peut exister qu'à l'intérieur de la relation, et pas au niveau de la base comme précédemment.

Les recherches actuelles portent sur les systèmes déductifs et les bases de connaissances : on veut pouvoir construire de nouveaux types par l'introduction des notions de filiation et d'agrégation (ressemblance avec les langages structurés), on veut créer automatiquement des relations déduites par l'usage de règles (bases de données déductives), et introduire ces **règles** comme objets de la base, à côté des objets classiques (**faits**), l'ensemble étant qualifié de **connaissances**.

BASES DE DONNÉES-IMAGES EXPÉRIMENTALES

GRAIN (Graphic-oriented Relational Algebra Interpreter : université d'Illinois 1978)

- système : SGBD relationnel + système de manipulation d'images sur SGF
- objets : géographiques (points, lignes, régions) existent sous forme de relation dans la base (nom + liste de coordonnées) et sous forme de matrice de pixels en dehors.

- langage : algébrique étendu aux opérations de visualisation totale ou partielle

IMAD (Image Analysis and Image Database system : université de Purdue-Indiana 1978)

- système : SGBD relationnel + système de traitement d'image

- objets : matrices de pixels en dehors du SGBD, mais possibilité d'extraire des "régions" de pixels pour les introduire dans la base

- langage : QPE (Query by Pictorial Example) dérivé de QBE (Query by Example).

Base d'images de Télédétection du Centre scientifique d'IRM (Paris 1983)

- système : SGBD relationnel IBM

- objets : de nature descriptive (capteurs, satellites) ou géométrique (référentiel cartographique, zone, localisation, modèles de déformation), les matrices de pixels sont en dehors du SGBD

- langage : SQL (Structured Query Language) + commandes de traitement, immersion dans Fortran/SQL.

MAPS (Map Assisted Photo-interpretation System : université de Carnegie-Mellon, Pittsburgh 1983)

- système : modèle hiérarchique.

- objets : images, contours, pixels, points, relations d'inclusion.

- langage : interactif permettant un accès symbolique, spatial (coordonnées) ou géométrique (inclusion, proximité).

Des images: pour qui? pour quoi?

Classes de SGBD image

Pour effectuer un classement, on ne tient compte que des types de requêtes possibles en fonction des objets effectivement présents dans le SGBD. Les capacités liées à l'interface homme-machine, comme l'interactivité, la visualisation simultanée, l'interprétation de requêtes en langage "naturel", n'interviennent pas dans ce classement.

• Les systèmes d'archivage d'images.

On se contente d'une simple juxtaposition des fichiers images et d'un SGBD textuel classique: seul le nom du fichier image *NFI* apparaît dans les relations de la base, le contenu (matrice de pixels) n'est pas accessible pour les opérations du SGBD, il est géré par un système de gestion de fichiers (SGF).

relation image =

image	attributs	NFI
-------	-----------	-----

où *image* est le nom donné par les utilisateurs et les *attributs* sont par exemple la date, le thème, le nom du propriétaire...

Les relations sont immergées dans un SGBD classique, adapté au domaine d'utilisation, exemple: SGBD "cinéma" pour une société de casting, SGBD de géographie statistique (cf. le GIP RECLUS à Montpellier) associé à un logiciel d'édition cartographique, et à un logiciel de traitement et de visualisation d'image (cf. GRAIN de l'université de l'Illinois à Chicago, et IRIS du Jet Propulsion Laboratory-Californie).

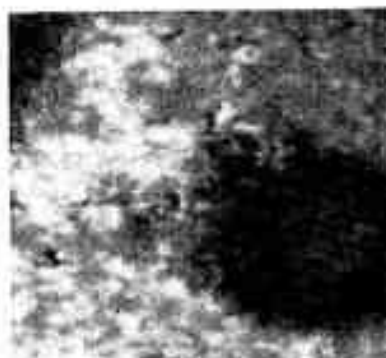
• Les systèmes avec traitement d'image intégré. Les requêtes se traduisent par des opérations globales sur l'image, dont les pixels ne sont toujours pas dans la base. Le SGF et le SGBD précédents sont tous deux accessibles par un langage qui permet également d'activer des opérations de traitement d'image (STI: système de traitement d'image).

relation image =

image	attributs	NFI
-------	-----------	-----

relation traitement =

traitement	paramètres	NFI entrée	NFI résultat
------------	------------	------------	--------------



La base de données IMAD de l'université de Purdue, de même que celle développée au Centre scientifique IBM dans le cadre d'un projet commun CNRS - CNES - IBM, appartiennent à cette catégorie. Dans la base IBM, l'expression de correspondances logiques entre types (modèle Entité-Relation) introduit une fonctionnalité que n'assure pas un SGBD classique: combinaison des visions "réseau" et "relationnel" d'une même base (voir encadré 1). Des systèmes commerciaux de ce type sont annoncés.

• Les systèmes de base de données images.

Si les requêtes sont de nature textuelle sur les pixels (exemple, un comptage de pixels de couleur donnée), ou si le domaine étudié permet de traduire ces requêtes en algorithmes de reconnaissance des formes suffisamment fiables, alors les pixels doivent être présents dans la base.

relation image =

image	attributs
-------	-----------

relation pixel =

image	coordonnées	couleur
-------	-------------	---------

relation contour =

contour	attributs
---------	-----------

relation point =

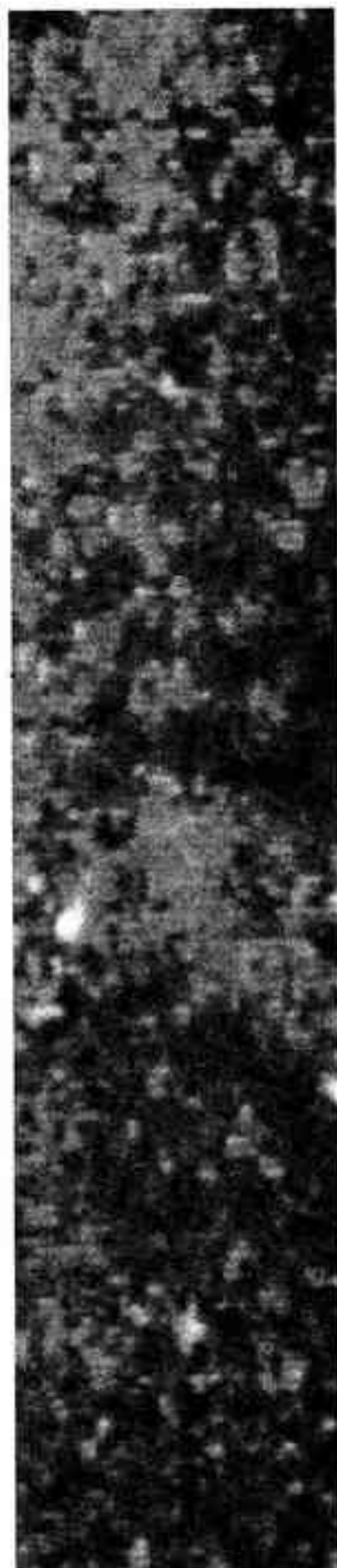
contour	coordonnées
---------	-------------

relation traitement =

traitement	paramètres	NFI entrée	NFI résultats
------------	------------	------------	---------------

La base MAPS de Carnegie-Mellon semble la seule actuellement capable de répondre à des requêtes qui portent à la fois sur les valeurs des pixels et leurs positions. Ce n'est pas un hasard si le modèle conceptuel choisi est hiérarchique et non relationnel. MAPS possède quelques capacités déductives, de nature essentiellement géométrique, qui permettent de créer des relations nouvelles (exemple du pont qui rejoint deux régions non adjacentes en traversant une troisième).

Les travaux actuels sur l'utilisation du modèle V-relationnel, qui a abouti au SGBD Versio (Laboratoire de recherche en informatique - LRI - CNRS et Institut national de recherche d'informatique et d'automatique - INRIA) cherchent à bénéficier des avantages de l'algèbre relationnelle sur un modèle hiérarchique qui est le seul à s'adapter aux images. La gestion des images dans une base de données fait apparaître les limites du modèle relationnel: il est indispensable de lui ajouter certains avantages du modèle hiérarchique (comme l'inclusion). Le développement actuel des "langages orientés objet" offrira la souplesse et la complexité suffisantes pour construire de véritables SGBD-images. Enfin les facilités de visualisation simultanée et cohérente d'images et de graphiques seront une composante essentielle de ces futurs systèmes.



Des images : pour qui ? pour quoi ?

UN NOUVEAU SOUFFLE POUR LES SHS : LES BANQUES D'IMAGES

René Ginouvès

Acôté des sciences de la nature dont les besoins concernent la gestion de séries d'images, mais aussi la manipulation de leur contenu à des fins cognitives, les sciences de l'homme et de la société (SHS) sont de plus en plus intéressées à automatiser l'accès à leur documentation graphique et photographique : car elles font, elles aussi, une consommation toujours plus intense d'images.

La géographie que naguère on appelait "humaine" tend désormais à rejoindre la géographie "physique" dans l'utilisation de cartes fondées sur la photographie aérienne et le traitement d'images de satellites, qui révèlent à la fois les caractères morpho-pédologiques du milieu naturel et les transformations qu'y apporte l'homme à travers la diversité de ses types d'agriculture, de son parcellaire, de ses constructions : la constitution de séries chronologiques de ces images agro-écologiques permet seule de comparer saisons et années, de suivre les évolutions. L'histoire, dans sa volonté de considérer le passé dans sa complexité, tire parti de toutes les images qu'il nous a laissées, peintures, dessins, décor : ici encore, seule la constitution de séries permet une étude méthodique, comme celles des ex-voto peints en Provence depuis le XVII^e siècle, où se traduisent les changements des mentalités selon les milieux sociaux.

L'archéologie n'existerait pas sans la description des réalités matérielles qu'elle tire du sol ; mais cette description serait bien pauvre sans l'information qu'apportent dessins ou photographies, d'autant que ces illustrations sont parfois elles-mêmes des images d'images, quand elles reproduisent des vases peints ou des fresques antiques : leur rassemblement, dans des ensembles comme le *Corpus Vasorum Antiquorum*, est d'autant plus efficace que l'accès direct au document original est souvent difficile, à cause de la dispersion géographique des collections, et même parfois impossible, à cause de sa disparition (destruction, perte, réensevelissement) ; et, ici aussi, photographie aérienne et télédétection par satellite interviennent pour favoriser la prospection des sites, tout comme la reconnaissance des organisations spatiales anciennes.

Encore faut-il ajouter à ces images en quelque

René Ginouvès, professeur à l'université de Paris X, responsable de l'unité associée "mosaïque, peinture et stuc, informatique en archéologie classique" (UA 375 CNRS), Institut d'art et d'archéologie, 3, rue Michelet, 75006 Paris.

sorte "naturelles" celles que construisent les techniques de la statistique, les graphes qui permettent, en sciences économiques, de visualiser l'impact d'une politique, les histogrammes qui, en démographie, font apparaître des résultats sinon difficile à lire, les lexicogrammes qui révèlent le fonctionnement des mots, les analyses factorielles qui en poïtologie montrent la structure des groupes sociaux, en géographie mettent en lumière l'organisation des villages, en archéologie situent les variantes d'une forme. Tous ces traitements graphiques des données, pour fonder une sémiologie, appellent eux aussi la constitution de séries aussi régulières et nombreuses que possible, la constitution de véritables banques d'images. Mais les banques d'images, pour être commodément exploitées, bénéficient désormais d'outils particulièrement performants.

C'est d'abord l'informatique, qui permet de retrouver, à partir de descriptions des réalités (ou de leurs images) aussi sommaires ou fines qu'on le désire, celles qui répondent à toute une série de critères.

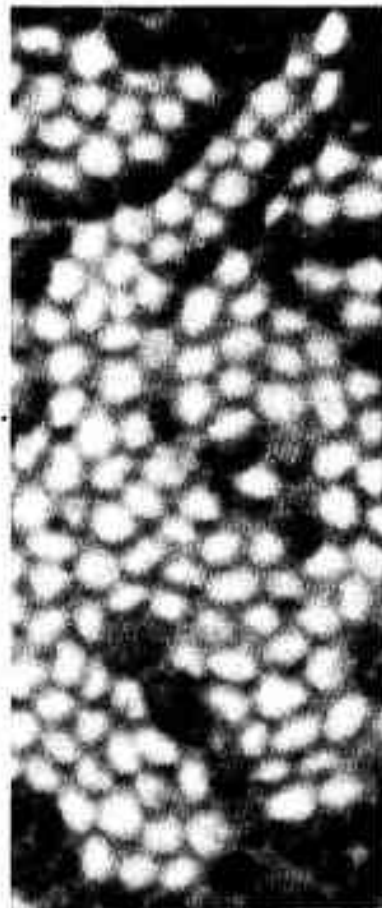


Fig. 1



Des images : pour qui ? pour quoi ?

C'est aussi le vidéodisque, qui permet d'emmagasiner, sur un support de dimensions restreintes et avec une stabilité remarquable, un nombre considérable de documents. La conjonction de ces deux techniques, c'est-à-dire le vidéodisque piloté par une banque de données, apparaît dès lors comme une solution privilégiée, réalisée dès 1985 par le Centre de recherche sur les traitements automatisés en archéologie classique, URA 375.3 du CNRS et de l'université de Paris X (1) : si ce organisme a été choisi par la Direction des bibliothèques des musées et de l'information scientifique et technique (DIBMIST), qui a financé la construction du vidéodisque, c'est précisément parce qu'il prépare et aide à préparer des banques de données documentaires gérées par un logiciel très développé, SIGMI-SIGMINI, produit par l'École des Mines de Paris (2) : on a ainsi pu enregistrer, sur un vidéodisque optique analogique à laser, les images de trois banques de données : la première, les

tuelle, est consacrée à la mosaïque dans le monde grec des origines à la fin de l'époque byzantine (fig. 1 et 2), et comporte un nombre restreint de documents, mais pour chacun un grand nombre d'informations strictement reliées dans une structure libre (fig. 3) : les deux autres sont télévisuelles, puisque destinées à faciliter la consultation de documents secondaires — deux collections de diapositives, celles du Centre de recherche sur la mosaïque antique et celles du Centre de documentation photographique et photogramétrique, ces dernières concernant l'ensemble des domaines de l'archéologie grecque et romaine (3). On le voit, il ne s'agissait pas ici de construire des banques d'informations pour gérer les images d'un vidéodisque : les banques de données descriptives avaient été constituées en premier, et on leur a ajouté le vidéodisque, porteur des images qui les illustraient déjà sous forme de photographies traditionnelles.

L'intérêt d'une pareille conjonction est de donner une nouvelle échelle à la diffusion, et à l'utilisation interactive, des banques d'images et des banques de données documentaires qui les supportent. Car il n'était pas trop difficile, jusqu'à présent, de consulter une banque de données, même très éloignée; mais on ne pouvait recevoir que la description textuelle des documents répondant à la question, description nécessairement appauvrie par rapport aux images; désormais, il suffira de disposer de vidéodisque pour obtenir aussi ces images, et rien n'est moins onéreux que la libération d'un vidéodisque à partir de la matrice originale.

Certes, un certain nombre de difficultés s'opposent encore à la diffusion de ces techniques. Sur le plan pratique, on peut reprocher à l'image portée par l'écran type télévision une finesse de résolution insuffisante, — inconvénient que devrait faire oublier les écrans d'une prochaine génération ; on peut regretter aussi de n'avoir à la fois qu'une seule image, alors que le travail dans nos disciplines implique souvent leur juxtaposition, mais des techniques apparaissent, qui permettent d'étaler sous le regard comparatif une véritable mosaïque de documents ; et, si l'on choisit de numériser l'image, toute une série de nouveaux types de traitements deviennent possibles, qu'évoque le texte de R. Jeanoulin. Sur le plan économique, on peut regretter le coût de réalisation d'un vidéodisque, et des banques de données.

Malgré la vraie question est de savoir si nos communautés scientifiques voudront profiter de ces nouvelles technologies pour décider de lancer des opérations en collaboration, nationale et internationale, qui seules permettraient de partager le travail de réalisation et le poids du financement (4) ; si de telles décisions venaient à se concrétiser, malgré les contraintes scientifiques et techniques, psychologiques et institutionnelles qu'elles impliquent, la construction de banques d'images informatiques pourrait apporter un nouveau souffle aux sciences de l'homme et de la société.

Fig. 2

Fig. 3¹⁴[illegible]

Fig. 1 - Mosaïque de galets, époque hellénistique (III^e siècle avant J.-C.), ornant une salle à manger d'une maison de Sévère, Grèce. (Conservation florentine d'R)

Fig. 2 - Mûre mosaïque. Panneau de seuil / grillon. Photographies de vidéodisque illustrant la banque de données La mosaïque dans le monde grec (DN).

Fig. 3 - Analyse de la même mosaïque dans la base de données, en système SIGM-SIGMINI (D.R.)

(1) Renseignements auprès de A.-M. Gauthier-Sorbet, responsable de l'IIA 375.3, Centre de recherche en archéologie classique, université de Paris X, 200, avenue de la République, 92001 Nanterre Cedex.

(2) Sous la responsabilité de M. Lenel, directeur du Centre d'automatique et d'informatique de cette École : il s'agit d'un logiciel intermédiaire entre les systèmes documentaires et les SGAD.

(3) La banque sur la mosaïque dans le mode grec a été réalisée par l'IA 375.3 (cf. supra n° 1); le Centre de recherche sur la mosaïque constitue l'IA 375.1 sous la responsabilité de J.P. Darmon; le Centre de documentation photographique et photogramétrique, à leur responsabilité M. Fourmont.

(4) Le Conseil de l'Europe (groupe PACT) patronne un projet de réseau "banques d'images en archéologie", dont la coordination est assurée par A.-M. Guimier-Sorbet (cf. supra n° 1).

L'HOLOGRAPHIE OU LES IMAGES DANS L'ESPACE

Patrick Meyrueis

La mesure,
le contrôle et
la communication.
Trois domaines
où l'holographie joue
un rôle original.

Objet de recherches académiques ouvrant des possibilités d'applications, l'holographie entre maintenant pleinement dans le monde économique à travers des utilisations efficaces, de plus en plus nombreuses.

L'holographie est un moyen efficace d'expression, de mesure, de contrôle et de communication. Le fait qu'un hologramme soit capable d'opérer sur un front d'onde qu'il transmet ou réfléchit, une mise en forme des phases et des amplitudes pouvant être programmées, a conduit tout d'abord l'holographie à des utilisations de type enregistrement d'images tri-dimensionnelles visibles à travers une "fenêtre" que constitue l'hologramme. Des musées de l'holographie se sont constitués en Europe, aux États-Unis et au Japon pour les présenter ; ils attirent un public nombreux et attentif et des artistes s'y expriment.

L'holographie d'expression s'étend actuellement jusqu'au cinéma holographique et à la synthèse d'images à l'ordinateur sur 360°, grâce au synthétiseur d'images tri-dimensionnelles holographiques (SITH) de l'Ecole nationale supérieure de physique de Strasbourg (ENSPS) qui fournit des "sithographies" (hologrammes composés) animés en sortie d'ordinateur. La Société X-IAL produit actuellement des hologrammes très lumineux sur un matériau photosensible donnant une efficacité de diffraction de 98%. Les hologrammes sont commercialisés sous forme de médaillons, souvenirs, articles publicitaires, etc...

Il existe des associations, des universités et des sociétés qui réalisent sur demande des hologrammes à des fins de prestige, de publicité, ou d'éducation sur des films ou plaques à halogénure d'argent avec des dimensions pouvant dépasser le mètre carré. Malgré le temps et la minute nécessaires à leur production, ces hologrammes sont maintenant visibles sans laser, en lumière blanche, par transmission, principalement par "effet rainbow" * ou par réflexion.

Parmi les plus intéressants domaines d'applications de l'holographie on trouve la métrologie et le contrôle non destructif. L'holographie permet de com-

parer interférométriquement des objets très peu différents ou de caractériser qualitativement ou quantitativement les déformations d'un objet de surface non poile sous contrainte statique ou dynamique. Cette utilisation s'est révélée être de plus en plus importante en génie mécanique, particulièrement dans le domaine des matériaux composites. L'holographie assiste la conception et le contrôle en production de pièces où leurs modifications dans les conditions aux limites sont délicates et où les autres méthodes de contrôle sont très peu efficaces.

Cependant, la généralisation de l'utilisation de l'holographie en contrôle non destructif a été très fortement ralentie dans un premier temps par

Fig. 1 - Hologramme composite avec animation, utilisé pour des applications artistiques. Juxtaposition d'hologrammes transmis en "hologrammes de bandes". La juxtaposition de ces bandes observée à une certaine distance donne l'impression du relief et chaque image a été enregistrée selon une succession de parallèles de sauto. Photo Kaji.

Fig. 2 - Etude de mode de vibration d'étage de réacteur par holographie avec caméra holographique. Photo ENSPS.



l'obligation d'utiliser des plaques photographiques pour enregistrer les hologrammes, ce qui nécessitait une procédure physico-chimique contraignante, même en laboratoire mécanique. De plus, les plaques à halogénure d'argent sont source d'erreur métrologique par déformation de la gélatine. Ces problèmes ont été résolus par l'apparition de systèmes automatiques à développement instantané faisant appel à d'autres matériaux (cristaux photosensibles, thermoplastiques, par exemple). Une PMI française, la société Micradel, à Strasbourg, fabrique depuis 1985 une caméra holographique à développement instantané (HOLO-DATA) qui utilise, par exemple, la SNIAS pour vérifier l'homogénéité des structures en fibres de carbone. De tels systèmes accouplés à des systèmes de dépouillement automatique des hologrammes peuvent fonctionner avec efficacité sur des cas complexes avec un personnel très réduit.

Un autre volet d'utilisation de l'holographie est celui que l'on peut qualifier d'optique diffractive. En effet, pour la majorité des applications de lasers de faible puissance nécessitant des lentilles, il est possible de remplacer ces lentilles de type réfractif par des éléments optiques holographiques de type diffractif avec des performances nettement améliorées (par exemple, pour la lecture de disque mémoire par laser ou pour des systèmes à fibres optiques). Dans certaines applications, des éléments optiques holographiques remplacent avantageusement des ensembles de miroirs-lentilles rendant possibles de nouveaux produits. C'est le cas des systèmes de "piloteage tête haute" holographiques qui affichent dans de bonnes conditions les données de conduite à travers le pare-brise du véhicule. La société X-IAL, à Strasbourg a mis au point pour différents industriels européens de tels éléments optiques holographiques ainsi que Hughes aux États-Unis et Pilkington en Grande-Bretagne. Thomson en fait de même pour des applications militaires. Les éléments optiques holographiques ont également un rôle à jouer en communication non guidée par laser où ils opèrent en tant qu'antenne. La qualité d'un élément optique holographique repose essentiellement, outre ses méthodes de réalisation, sur les logiciels utilisés pour leur calcul, sur le matériau photosensible qui doit permettre la plus grande efficacité de diffraction.

Il faut aussi noter l'utilisation d'éléments optiques holographiques synthétiques (réalisés à l'ordinateur) pour traiter des données (par exemple en traitement d'image) : ils constituent un substitut économique à des ordinateurs parallèles très puissants.

L'holographie est un outil de connaissance et de communication dont l'utilisation se généralise à travers des systèmes et méthodes de plus en plus au point. Les technologies d'applications semblent être mûres pour affronter les marchés de masse. Toutefois, les recherches se poursuivent pour l'abaissement des coûts et la simplification de l'usage. La France peut jouer un rôle important dans l'industrialisation à grande échelle de l'holographie. En effet, elle a été parmi les pionniers de l'holographie. Elle dispose d'équipes très actives en recherche dans ce domaine, mais très peu d'entreprises acceptent de transférer les résultats de ces recherches vers le secteur économique.

* Hologramme visible par transmission, par simulation d'effet de lentille, "effet rainbow" ou "arc en ciel" provenant de la diffraction de la lumière par la lentille simulée.

Patrick Meyrueis, professeur à l'université Louis Pasteur, Ecole nationale supérieure de physique de Strasbourg, 7, rue de l'Université, 67000 Strasbourg.

QUE VOIT LE ROBOT ?

Sylvie Jacquart, Pierre André

Tout d'abord objet de recherche, la vision en robotique est aujourd'hui une réalité industrielle tant en France qu'à l'étranger.

Le principal rôle de la vision en robotique est la perception globale de l'environnement. Ceci conduit les systèmes de vision à assurer des fonctions très diverses dont nous ne donnons ici que quelques exemples.

Ils peuvent tout d'abord se substituer partiellement ou totalement à l'opérateur humain pour toutes les tâches qui sollicitent son sens visuel. Ainsi, lors de l'inspection de produits allant du contrôle qualité jusqu'au contrôle dimensionnel, les systèmes de vision permettent souvent un contrôle exhaustif de toute la production. Cela constitue actuellement le plus grand domaine d'applications industrielles. Ils sont également utilisés pour assister un robot industriel opérant dans un environnement variable. Ainsi, le robot doté de caméras peut reconnaître et localiser des pièces disposées, par exemple, en vrac planaire sur un convoyeur mobile, pour les saisir en vue de les assembler ou tout simplement de les trier. Cependant, dans le cas le plus fréquent de composants en vrac volumique, il n'existe à l'heure actuelle que des solutions partielles développées en laboratoire, proposant une saisie directe dans le vrac. Dans le cadre de l'automatisation flexible de l'assemblage, nous avons développé, au Laboratoire d'automatique de Besançon, un système industriel d'alimentation automatique programmable (voir encart), capable de s'adapter très aisément à des modifications fréquentes du type de lots de pièces à distribuer, au sein d'une classe donnée de composants.

Dans les tâches de soudage par cordon continu, le robot peut être assisté par un ensemble de vision incluant une caméra et un système d'éclairage par laser, qui projette un plan lumineux sur les pièces à souder. L'intersection de ce plan avec les pièces donne une image présentant des discontinuités et dont l'interprétation permet de localiser exactement le joint de soudure et donc de corriger si nécessaire la trajectoire du robot.

Enfin, la vision représente une solution possible au problème des événements d'obstacle ou de la coopération entre robots.

Sylvie Jacquart, maître-assistant à la faculté des sciences de Besançon, travaille à l'unité associée "micro-systèmes et robotique".

Pierre André, professeur à l'ENSM, responsable de l'unité associée "micro-système et robotique", (UA 822 CNRS) université de Franche-Comté, Ecole nationale supérieure de mécanique et des microtechniques (ENSM), La Boissière, route de Gray, 25030 Besançon.

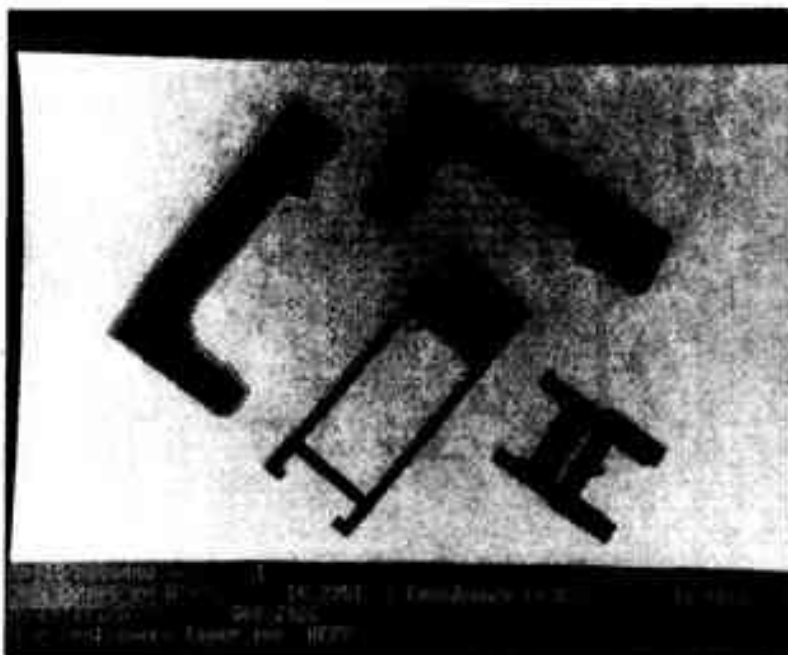


Fig. 1 - Reconnaissance d'un objet appris et détermination de sa position (x,y) et de son orientation.



Fig. 2 - Saisie de pièces par robot assisté par vision (gras plans).

Dans le cas des robots mobiles (robots d'intervention en milieu hostile, robots agricoles, robots de nettoyage...), la vision peut constituer un outil privilégié d'appréhension de l'environnement global du robot. Elle doit alors être assistée par des capteurs de distance (télémétriques, proxémétriques...).

Par ailleurs, dans le cas de la saisie automatique d'objets, il est souvent nécessaire de disposer d'informations sur l'environnement local de l'organe terminal du robot. Ces informations peuvent être obtenues en utilisant des microcaméras embarquées ou plus simplement à l'aide de capteurs de proximité (par exemple à infrarouge) fixés dans la pince du robot.

Ce rapide panorama met en évidence la diversité des applications de la vision en robotique, certaines sont déjà industrielles, d'autres en sont encore au stade du laboratoire. Il est commun de dire que l'avenir de la robotique se joue avec la vision. Cependant, comme toute technique, la vision a ses limites et ne saurait prétendre résoudre tous les problèmes !

Des images : pour qui ? pour quoi ?

LA VISION REBELLE A L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Robert Jeansoulin

Il est utopique d'imaginer un système expert de vision universel. L'étude psycho-physiologique est encore loin de dévoiler les secrets de la vision humaine. Malgré une faiblesse algorithmique, la vision automatique se met en place au gré d'applications, qui donnent parfois des résultats prometteurs (lecture automatique, tri industriel...). Un modèle plus complet de la vision devra combiner les systèmes experts et les bases de données images.

La vision est à la fois un objet et un moyen d'étude. En tant que moyen, si elle se prête à de nombreuses applications, en revanche elle se traduit souvent mal dans le langage symbolique de ces applications.

Besoins d'intelligence artificielle en imagerie

Certains domaines sont dès aujourd'hui redevables de l'automatisation du traitement de l'image. En médecine, les anomalies sont de mieux en mieux diagnostiquées sur des images rayons X, ou échographie, ou angiographie... En robotique, la préhension ou le déplacement sont tributaires de la reconnaissance d'un environnement industriel, de l'appréciation des positions relatives. Pour inventorier ou prévoir, la télédétection joue à fond l'image dans la reconnaissance du couvert terrestre ou maritime et dans les études d'évolution.

Malheureusement, en dépit du besoin d'intelligence qui se fait sentir dans ces domaines, il manque une algorithmique sous-jacente permettant de le satisfaire. La connaissance d'un sujet (*l'expertise*) signifie la capacité de modélisation. Concernant l'imagerie, cette capacité doit porter sur trois niveaux :

- accès : localisation sur les images relatives à l'application [but(s) = requête d'accès aux images et aux modèles] ;
- traitement : filtrage de ces données dans l'optique de l'application [but(s) = image(s) = traitement(s)] ;
- description : comparaison entre les données et les modèles dans le langage de l'application [modèle(s) + image(s) + traitement(s) = description symbolique] ;

Après ces étapes, que nous nommons vision, tout système expert fonctionnant sur les données symboliques peut prendre le relais.

Mais il existe aussi un besoin théorique de compréhension de la vision, qui n'est pas seulement

Robert Jeansoulin, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire d'Informatique pour la mécanique et les sciences pour l'ingénieur - LIMS (LP 3251 du CNRS), université de Paris XI, Bâtiment 508, BP 30, 91406 Orsay Cedex.

une perception, mais aussi une cognition, un mécanisme de connaissance du monde qui nous entoure. Les études physiologiques sur la vision sont encore incomplètes, mais le chemin œil-cerveau commence à être jalonné de découvertes intéressantes, qui montrent que la différenciation fonctionnelle apparaît très tôt, de même que certains processus décisionnels : il faut parfois plusieurs secondes pour "corriger" une illusion d'optique spontanée.

Les problèmes spécifiques de l'imagerie

Tout système automatique commande ses changements d'état par des règles activées par des événements extérieurs. Il y a donc un niveau de perception des événements extérieurs, et un niveau de cognition qui choisit, parmi les règles activables, celle qui conduit à un état final (but). La complexité du système peut être quantitative et croître avec le nombre de règles. Une simple séquence de quelques règles permet, par exemple la lecture des "codes-barres" dans les supermarchés. L'analyse combinatoire, la programmation dynamique, convergent, lentement mais sûrement, si les règles sont nombreuses mais indépendantes. Pour des règles dépendantes, la convergence n'est pas obligatoire, il faut donc des "méta-règles" qui contrôlent l'enchaînement et la convergence dans un temps raisonnable.

En traitement d'image, on peut appliquer un grand nombre d'algorithmes, sur un grand nombre de points d'image (pixels = picture cells) : les résultats sont rarement indépendants et leur combinaison offre toujours quelque chose à voir, mais rarement ce qu'on cherche.

La complexité peut être également qualitative, à cause de la description des événements exté-

rieurs dans la langue — "champ sémantique" — de l'expert.

On dit parfois qu'un système expert doit fonctionner comme un expert humain consulté par téléphone. Or l'expérience quotidienne montre combien la description téléphonique d'une image est fastidieuse et souvent incompréhensible. Elle doit se faire, pour partie dans un langage géométrique général, pour partie dans le champ sémantique de l'expert (sa base de connaissances).

Pour figurer dans la base, les événements possibles doivent pouvoir être décrits de manière symbolique. Pour être reconnus, les événements vus doivent être "appariés" sans ambiguïté avec ceux de la base.

Méthodes de reconnaissance automatique

— Approche anthropologique non finalisée.

Même si géométrie et sémantique d'une image sont fortement liées, les études physiologiques montrent que la vision humaine cherche spontanément à délimiter des objets, indépendamment de leur reconnaissance.

— Approches finalisées.

Si l'approche de Marr n'a abouti à aucun résultat utilisable, elle est en revanche générique d'un certain nombre de cas restreints qui ont abouti à des systèmes de vision.

Schéma du chemin physiologique (Berkeley)

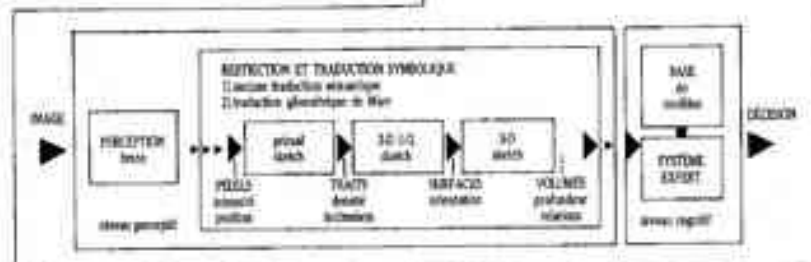
Des bâtonnets retiennent aux cellules ganglionnaires, il y a apparemment conservation des positions spatiales des stimuli, ainsi qu'une différenciation fréquentielle (haute fréquence foveale, basse fréquence périphérique).

Il y a succession temporelle d'information liée aux stimuli : d'abord l'intensité, puis la couleur, puis l'inclinaison des formes et leur courbure, ainsi que le mouvement (différences temporelles rapides).

Des processus décisionnels apparaissent précocement : repérage d'une forme donnée, découpage spatial du champ de vision.

Schéma de Marr (MIT 1977)

La simulation anthropologique de la vision a séduit divers laboratoires. En particulier les travaux de Marr, au Massachusetts Institute of Technology (MIT), à la fin des années 70, proposent une démarche complète pour une vision non finalisée, connaissant seulement la géométrie dans l'espace et les propriétés de l'éclaircissement.



Des images: pour qui? pour quoi?

• L'imagerie binaire possède un niveau perceptif simple: les objets (valeur 1, quels qu'ils soient) sont plans et s'opposent au fond (valeur 0). Ils sont décrits dans un formalisme bien maîtrisé: la morphologie mathématique qui offre de nombreux outils de reconnaissance des formes et de mesure. De nombreuses applications en découlent plus ou moins directement: reconnaissance de caractères imprimés et manuscrits, suivi d'un avion dans le ciel par caméra "asservie", classement de chromosomes sur caryotype, examen de structures cristallines, de coupes histologiques... reconnaissance de galaxies. Dans tous ces exemples, le niveau cognitif intervient sur les contraintes que doivent vérifier les objets pour leur interprétation, mais il intervient également de manière implicite sur le choix du "seuil" pour la binarisation (bonne séparation fond/objets).

• La segmentation spatiale découpe le plan en zones supposées homogènes, sans notion d'objet et de fond. La segmentation radiométrique est obtenue par des méthodes de classification, souvent multispectrale ou multitemporale, comme en télédétection, ou des méthodes dérivées de l'analyse des données (régressions, analyse en composantes principales). Le Ministère de l'agriculture américain, effectue de cette manière la prédiction annuelle agricole à l'échelle mondiale. La segmentation morphologique se fait par détection de contour, d'homogénéité, de texture, de connexité. Ces algorithmes sont d'autant plus efficaces que l'image est bien structurée au départ, ce qui soulève le problème fastidieux de la calibration de la perception. Les applications

de la vision à la robotique ou au tri industriel relèvent essentiellement de cette méthode.

— Les approches intégrant niveaux perceptif et cognitif

Le problème général de l'appariement entre un objet (niveau perceptif) et un modèle (niveau cognitif) peut se résoudre par des méthodes statistiques (corrélation objet-modèle, moments d'inertie...), de prédiction/vérification (calcul et comparaison de graphes ou des méthodes cumulatives (confirmations ou infirmations progressives au sens de la théorie des sous-ensembles flous).

Dans ces méthodes, le niveau cognitif utilise des informations non symboliques du niveau perceptif, pour influencer sur des paramètres: comme seuils de corrélation pour la reconnaissance de points de contrôle en imagerie aérospatiale; comme position des indices visuels sur une pièce d'automobile; comme intersection ou réunion d'ensembles flous pour la reconnaissance automatique du parcellaire agricole par télédétection.

Vers la vision artificielle

La difficulté des tâches décrites précédemment signifie qu'un système de vision universel est aussi irréaliste qu'un système expert universel. Il y a donc intérêt à passer par une phase préparatoire qui consiste à restreindre la classe d'image, la classe des traitements et la sémantique des modèles en imposant des contraintes déduites des objectifs et des conditions de l'observation (apprentissage). En d'autres termes, finaliser le système.

La deuxième phase consiste d'une part à exécuter en parallèle divers algorithmes du niveau perceptif, selon la méthode souvent citée, rarement réalisée, du "tableau noir" (blackboard); opérateurs de détection de contours, de texture, de connexité, de calcul statistique... qui créent, modifient ou suppriment des objets, indépendamment les uns des autres. D'autre part à cumuler de manière non destructive les résultats courants; combinaison floue pour confirmer des objets, règles géométriques pour découvrir des relations entre eux. Enfin à comparer les objets avec les modèles, vérifier les contraintes de cohérence entre objets, éliminer les objets reconnus avec une marge d'incertitude suffisante. La str-

ture de contrôle doit vérifier que le système converge. Les progrès actuels réalisés en bases de données ou en "bases de connaissances" (nouveau terme qui consacre le mariage entre système de gestion de bases de données et système expert), ainsi que l'utilisation de "langages orientés-objets", et particulièrement d'objets graphiques, permettent d'étudier de tels systèmes en laboratoire. Leur caractère parallèle permet d'envisager une réalisation viable dans un environnement multi-processeurs.



Exemple 2: Projet ROBIVIS (INRIA 1982)

Analyse d'un "vrai planaire" de pièces mécaniques qui se trouvent partiellement

Fig. a - Scène contenant 4 pièces de boiserie en vrai planaire (présence de bavures et de mousolètes).

Fig. b - Approximation polygonale des contours extraits (280 segments).

Fig. c - Modèles des pièces.

Fig. d - Identification et localisation des pièces de la figure a.

Extension au cas 3D: utilisation de boîtes au lieu de morceaux de droite.

Circuit INRIA tiré de la thèse de Dorian de Nédélec Ayache.

Exemple 1: ACRONYM (Stanford 1980)

Interprétation d'une scène d'aéroport

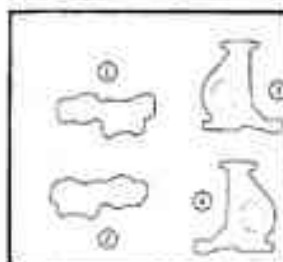
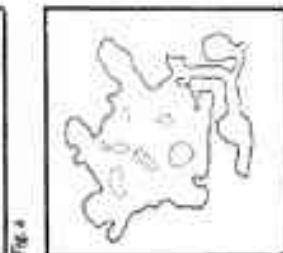
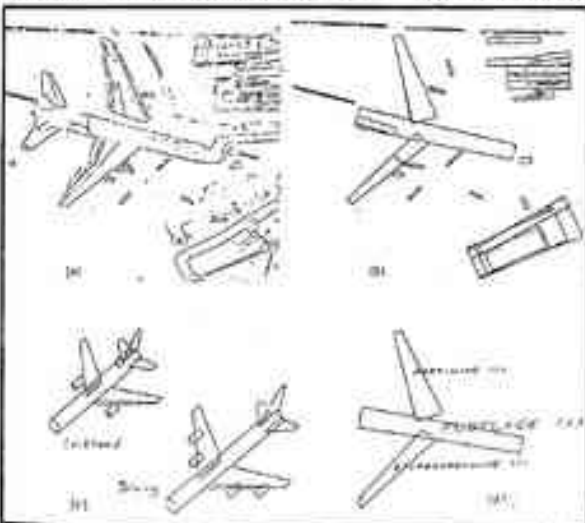
a) segmentation par détection de contours

b) approximation trapézoïdale (robust)

c) modèles construits sans référence avec les conditions de prise de vue.

d) interprétation par règles géométriques entre robustes et modèles.

L'extension au cas 3D utilise la notion de cylindre généralisé: engendré par une surface en translation sur un axe droit ou courbe, et affectée d'un coefficient d'homothétie variable. En France, des systèmes comme TRIDENT (CRN-Nancy) ou SACRO (CERFIA-Toulonnet) ont repris une approche voisine.



RECONNAISSANCE DE FORME DANS L'UNIVERS

Albert Bijaoui

L'un des aspects de la cosmologie observationnelle.

Les problèmes de reconnaissance de forme en astronomie sont très divers. Une des applications les plus importantes réside dans le comptage automatique des galaxies sur un cliché obtenu avec une des grandes caméras de Schmidt, comme celles du Mont Palomar, de l'Observatoire européen austral ou du Centre d'études et de recherches géodynamiques et astronomiques (CERGA) près de Grasse. Il s'agit d'images du ciel de plus de 5 degrés sur 5 degrés, avec une résolution d'environ 2 secondes d'arc pour les meilleurs clichés. Sur ces images dont la taille est un carré de 30 à 40 centimètres de côté, on peut compter de l'ordre de 1 000 000 à 10 000 000 d'objets, selon la direction galactique et la qualité du cliché. La mise en service de télescopes de très grande dimension, équipés de récepteurs d'image ultra sensibles n'a pas diminué l'intérêt de ces caméras, en raison d'un si grand champ accessible.

L'analyse visuelle des clichés a permis de très nombreuses découvertes astrophysiques, dont la mise en évidence de très nombreux amas de galaxies. Ces analyses, longues et pénibles, introduisant des erreurs difficilement estimables, laissent le pas aux analyses par ordinateur.

Les astronomes anglais et écossais ont joué un rôle de pionniers, en réalisant au début des années 60 la GALAXY, machine automatique mais non numérique, puis en mettant en service l'AFM, basée sur un balayage laser et la COSMOS, utilisant un flying spot. Le problème capital résidait dans la lecture complète, avec une précision photométrique et mécanique suffisante, de l'ensemble de l'image, correspondant à une matrice de 30 000 sur 30 000 éléments, avec un échantillonnage de 10 microns. La mise en service à l'Observatoire de Paris de la MAMA, analyseur à barrette de photodiodes, réalisé par la division technique de l'Institut national des sciences de l'Univers permet depuis peu aux astronomes français de posséder l'outil adéquat. Auparavant, on ne possédait que des analyseurs PDS, n'enregistrant que point par point, ne permettant que des analyses par petite région du cliché.

La procédure de traitement de l'image numérique est à peu près la même partout :

- 1/ correction de la non-linéarité de la photographie ;
- 2/ détermination d'une carte du fond de ciel, à partir de l'histogramme local ;
- 3/ soustraction de la carte du fond ;
- 4/ détermination du seuil de détection des éléments d'image correspondant aux objets astronomiques ;
- 5/ détection des objets soit avec les maxima locaux, soit par segmentation de l'image (détection des domaines connexes formés des éléments de l'image ayant un niveau supérieur au seuil) ;
- 6/ dans le cas de la segmentation, réduction des paramètres extraits en paramètres de forme (élongation, orientation, concentration, etc...) ;
- 7/ première classification et sélection des objets non stellaires en se basant sur ces différents paramètres de forme (aire, flux, intensité maximale, élongation, concentration, etc...) ;
- 8/ détermination des profils radiaux des objets sélectionnés ;
- 9/ nouvelle classification plus pertinente à partir de quantités déduites du profil radial (rayon équivalent, résidu de la comparaison à un profil stellaire, combinaisons empiriques diverses, etc...). Ces classifications ont pour but essentiel de confirmer la nature non stellaire de l'objet détecté, et d'en certifier l'existence.

Le résultat de cette longue analyse, nécessitant encore un fort contrôle humain, consiste dans des catalogues de candidats galaxies. Le taux de rejet est souvent assez faible (quelques pour cents). Les cartes de densité obtenues avant rejet sont assez proches de celles obtenues après rejet.

Cette analyse permet de mettre en évidence les structures à grande échelle de l'Univers, directe-

ment liées aux phénomènes physiques prédominant dans les premiers instants. Leurs études, engagées par ces comptages, doivent être poursuivies par des études spectrographiques afin de mesurer le décalage spectral, donc, grâce à la loi de Hubble, la distance. Les premières analyses 3D de l'Univers à grande échelle ainsi obtenues ont permis de confirmer une structure avec des grandes bulles, que l'on pouvait percevoir sur les cartes des comptages de galaxies. L'étude de ces structures constitue l'un des importants aspects de la cosmologie observationnelle.

Fig. 1 - Densité des galaxies, en visualisation fausse couleur, dans une zone de 5 degrés x 5 degrés dans la constellation de la Chevelure de Bérénice. On remarque la structure très granuleuse, avec de nombreuses petites condensations de galaxies.

Fig. 2 - Image basse fréquence de la distribution précédente, ne laissant percevoir que la structure à grande échelle formée de condensations de galaxies de dimension supérieure à un degré.

Fig. 3 - Visualisation d'une zone de 10 mm du cliché, compte tenu de l'échelle de la figure 1, cela ne représente qu'un 1/254^e de cette image.

Fig. 4 - Agrandissement d'un facteur 4 d'une partie de l'image précédente. On remarque le nombre élevé d'objets faiblement lumineux qui apparaissent.

Fig. 5 - Un exemple d'une galaxie de forme typique montrant l'extension importante d'un tel objet et l'existence de plusieurs objets brillants parasites dont il faut tenir compte lors du traitement. Le comptage concerne essentiellement des objets.

Ces figures proviennent d'un travail en collaboration avec Ch. Balkowski (Observatoire de Meudon), G. Mars et E. Slezak (Observatoire de Nice) sur un cliché obtenu avec la caméra de Schmidt du Mont Palomar.

Albert Bijaoui, astronome à l'Observatoire de Nice (INSU 4-UA 128), université de Nice, BP 139, 06003 Nice Cedex.

Des images : pour qui ? pour quoi ?

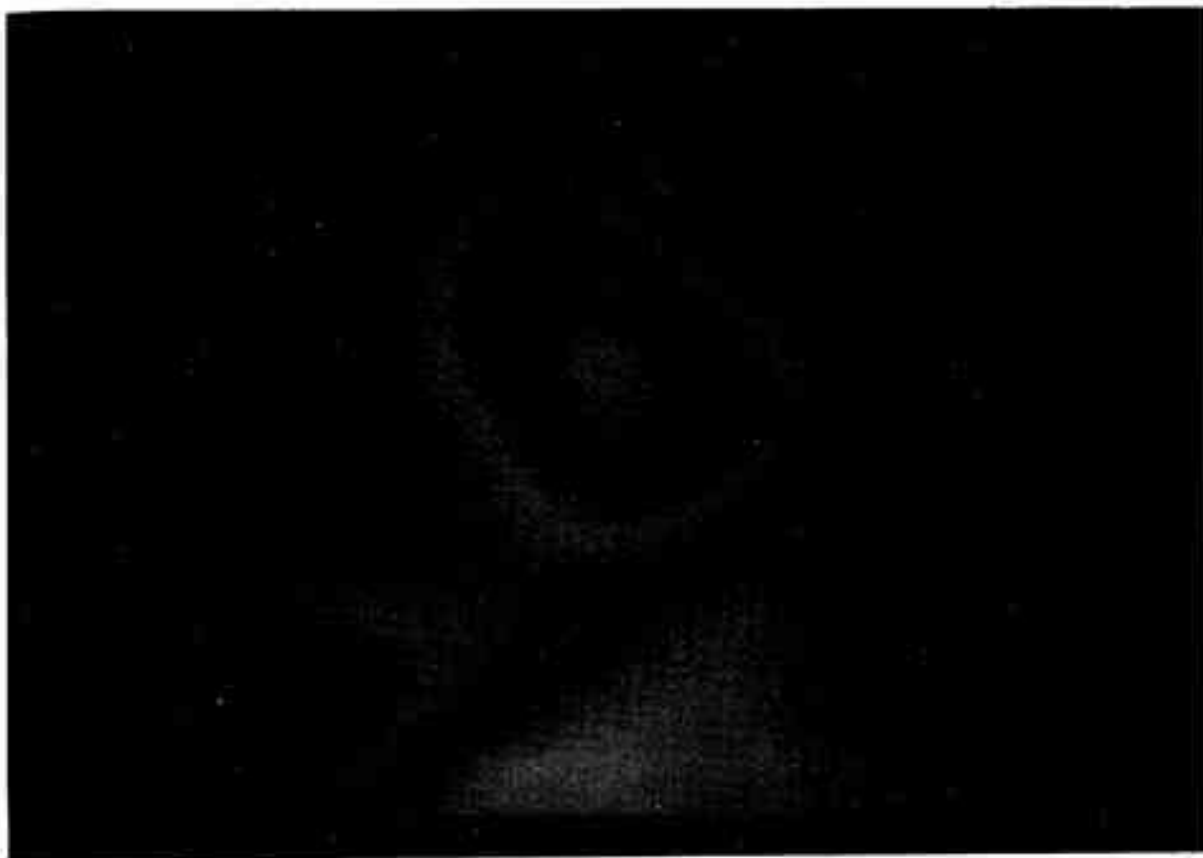


Fig. 2



Fig. 3

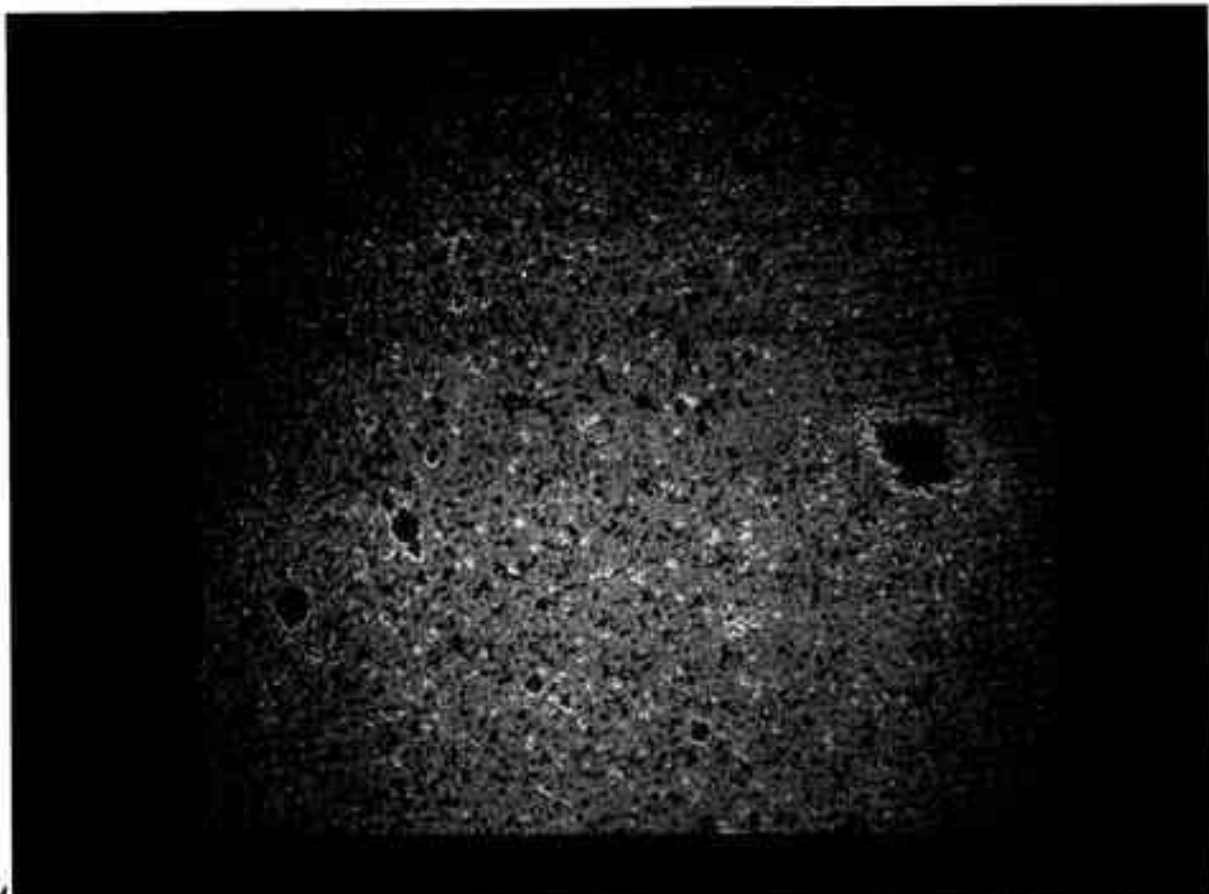


Fig. 4

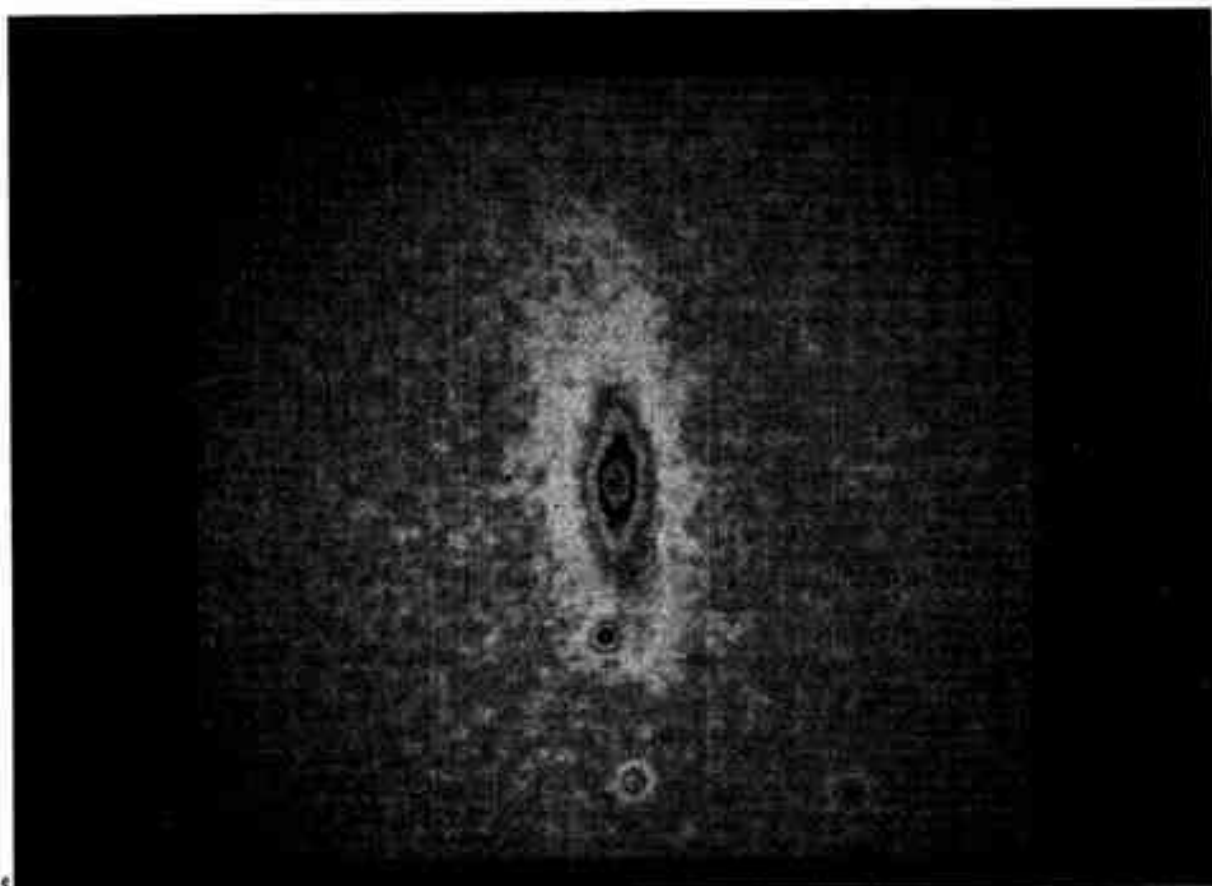


Fig. 5

Des images : pour qui ? pour quoi ?

INTERPRÉTATION ET UTILISATION DES IMAGES

LA CAMÉRA EXPLORE LE TEMPS

Daniel Charrault, Jacques Duvernoy, Louis Hay

Les manuscrits contiennent des informations invisibles révélées par l'optique et qui en disent long sur leurs auteurs.

L'écriture constitue une des grandes inventions de l'humanité qui lui doit sa mémoire à travers le temps et l'espace. Inscrite dans la longue durée, projetée dans l'avenir par ses nouveaux outils électroniques, l'écriture mobilise aujourd'hui un ensemble de travaux qui s'étendent de la neurophysiologie aux sciences de la communication et qui visent à mieux comprendre les mécanismes profonds d'un phénomène dont les enjeux théoriques et pratiques sont considérables. C'est dans ce cadre que prend place une approche de caractère à la fois fondamental et appliqué, portant sur l'analyse quantitative des écritures manuscrites, qui a connu en France des développements originaux grâce à la collaboration de deux formations qui associent les départements sciences physiques pour l'ingénieur et sciences de l'homme et de la société du CNRS.

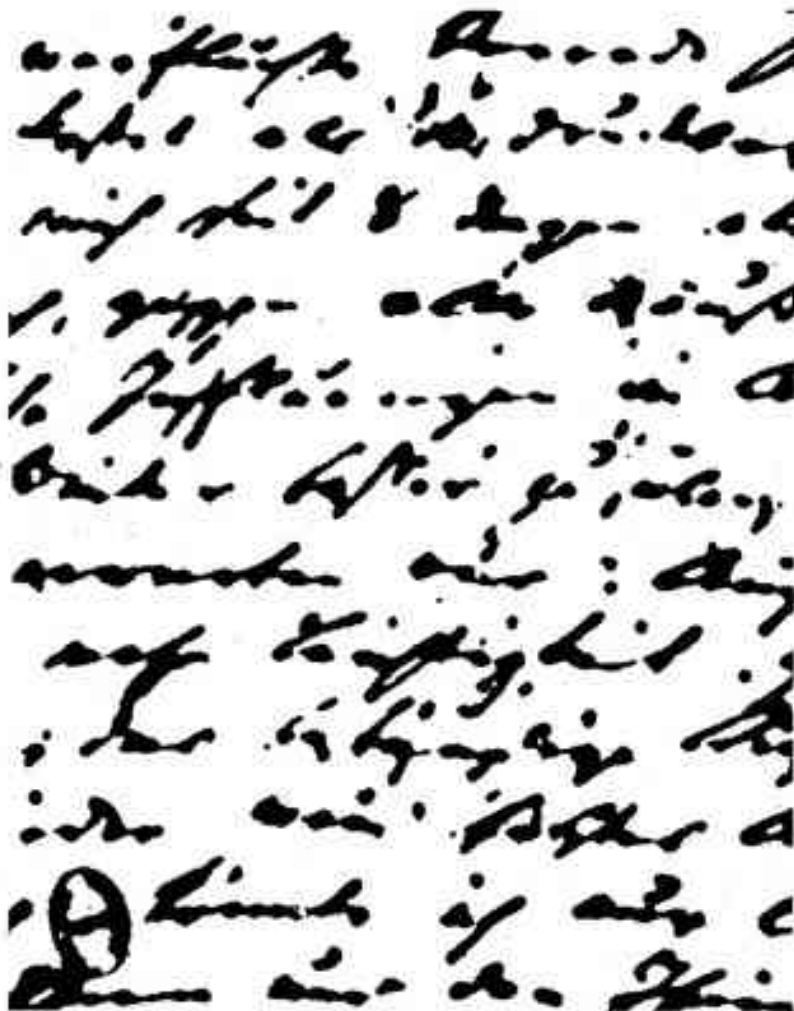
L'un des aspects de cette recherche met en œuvre des méthodes optiques ou numériques pour caractériser des tracés en cursive moderne et étudier leurs propriétés temporelles. Des études portant sur la reconnaissance d'écritures provenant de mains différentes, sur les rythmes à court ou à long terme de l'écrit, ont été réalisées sur des grands fonds de manuscrits de la Bibliothèque nationale et de l'Institut de France et ont contribué à éclairer les mécanismes de la genèse chez des écrivains comme Henri Heine, Gérard de Nerval ou Paul Claudel (voir encadré). Ils ont conduit à envisager des applications non prévues au départ, comme l'expertise judiciaire ou la rédaction assistée par ordinateur.

Le traitement optique de l'information

L'optique présente des avantages bien connus lorsqu'il s'agit de saisir de grandes quantités d'information et de les traiter en parallèle. Elle offre par

Daniel Charrault, chargé de recherche au CNRS, Institut des textes et manuscrits modernes - ITEM, et Laboratoire d'optique Pierre Michel Duffieux.

Jacques Duvernoy, directeur de recherche au CNRS, responsable du Laboratoire d'optique Pierre Michel Duffieux, (UA 214 CNRS), université de Besançon, Laboratoire d'optique, route de Gray, La Bouloie, 25030 Besançon Cedex. Louis Hay, directeur de recherche au CNRS, Institut des textes et manuscrits modernes - ITEM, (LP 7 du CNRS), 61 rue de Richelieu, 75004 Paris Cedex 02.



là un remarquable outil pour l'analyse des tracés manuscrits. L'emploi du laser, notamment, permet d'obtenir le spectre de diffraction d'une page et de réaliser ainsi cent millions d'opérations simultanées. Ce spectre regroupe l'ensemble des figures de diffraction produites par les contours des lettres. Il se présente comme une tâche lumineuse (figure 1) dont la forme, l'orientation et la périodicité sont déterminées par les propriétés géométriques des lettres et par leur distribution sur la page. Certaines caractéristiques de l'écriture peuvent y être observées directement ; la figure 1 montre à titre d'exemple la mesure de l'inclinaison moyenne des lettres sur la ligne et de la distribution des lignes sur la page. Des propriétés plus complexes de l'écrit, temporelles ou spatiales, peuvent être appréhendées en numérisant le spectre ce qui permet une exploitation plus poussée de l'information qu'il contient. En revanche, lorsqu'il s'agit de passer à l'exploitation de données sur grande échelle, il convient de se tourner vers des traitements optiques opérant en temps réel sur des images analogiques. C'est dans cette perspective

que nous avons notamment développé un système optique qui permet le traitement d'images vidéo pour la reconnaissance rapide de différentes écritures. Celui-ci calcule en temps réel les dix moments statistiques qui caractérisent chacune des pages et les transmet à un ordinateur qui les classe image par image.

Écriture et signal

Les physiciens intéressés par la théorie du signal cherchent à mieux comprendre ses propriétés statistiques, dont l'étude reste difficile en l'absence d'interlocuteurs compétents pour la validation des données. Pour leur part, les spécialistes de l'écrit visent des problèmes d'ordre historique qui demeuraient jusqu'alors hors de la portée des sciences de l'homme. Ils explorent en même temps une nouvelle voie d'accès sur l'étude de mécanismes neurophysiologiques qui s'articulent sur des processus cognitifs. Et ces recherches de caractère très fondamental débouchent à leur tour sur la mise en œuvre des technologies électroniques dans la production de l'écrit.

Des images : pour qui ? pour quoi ?

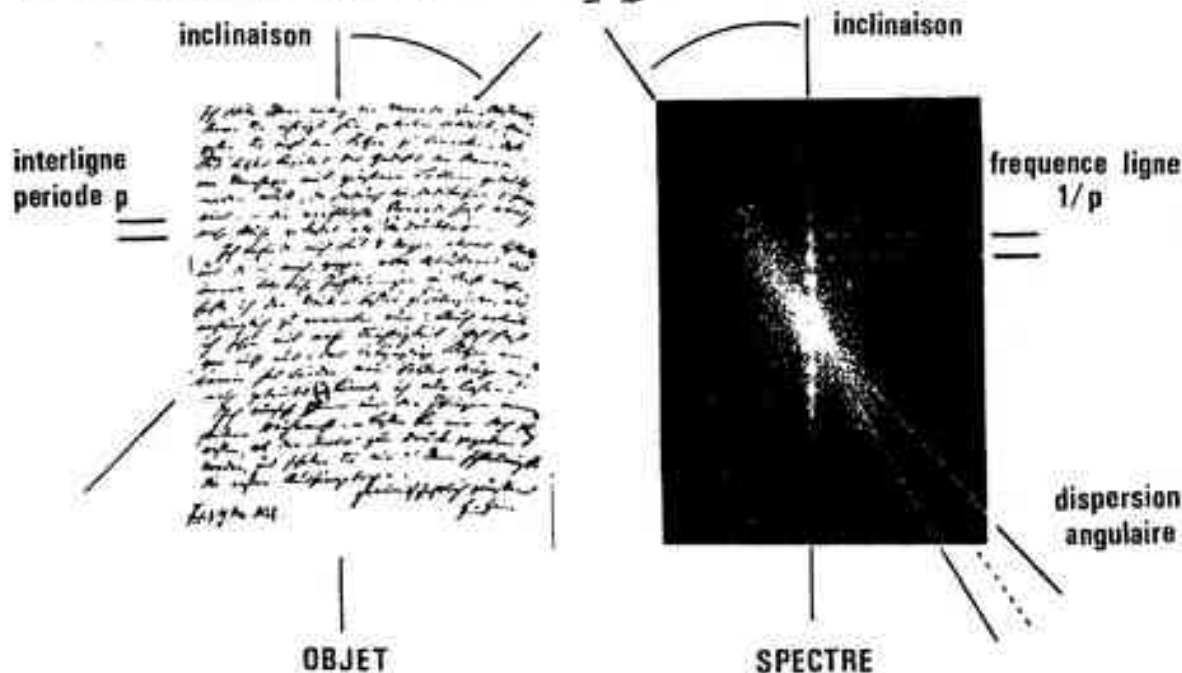
UNE MACHINE OPTIQUE À REMONTER LE TEMPS

Paul Claudel, Gérard de Nerval et Henri Heine. Trois auteurs passés au crible des sciences de l'homme et des sciences physiques pour l'ingénieur. Pour chacun d'eux un exemple (parmi d'autres) de l'éclairage que l'optique projette sur leur histoire. Le manuscrit *Voyage en Italie* a-t-il été écrit par

Paul Claudel au jour le jour, comme un carnet de voyage ou bien est-il, en réalité, une composition littéraire inspirée de notes de voyage ? C'est l'analyse optique et numérique de dix-sept pages de ce document qui a fourni des éléments de réponse à cette question. Ce n'est plus de statut mais de datation qu'il est question dans le cas du manuscrit d'un ensemble de poèmes de Gérard de Nerval connu sous le nom des *Autres chimères*. La comparaison des données

fournies par l'analyse du graphisme avec celles établies par les historiens a permis de déduire que l'œuvre datait de 1841 et non pas de 1853 comme l'estimait la critique. Henri Heine a-t-il eu un quatrième secrétaire ? La comparaison, par une méthode identique, de dix pages d'origine inconnue avec trois échantillons identifiés, a établi que les premières provenaient toutes d'une même main, celle d'un quatrième secrétaire oublié de l'histoire.

Fig. 1



JOUER, APPRENDRE ET DÉCIDER AVEC DES CARTES

Jean Varlet

Jusqu'à présent réservées aux milieux scientifiques, les images cartographiques doivent susciter l'intérêt du monde socio-économique.

La fonction esthétique d'une carte ("faire un beau dessin") n'est plus revendiquée. En revanche, il apparaît désormais clairement que la carte, outre sa fonction de représentation (localiser avec précision des éléments du paysage...), possède fondamentalement une fonction de production d'un savoir, d'une information, d'ordre spatial.

Jean Varlet, chargé de cours à l'université de Limoges, professeur à l'École normale de Tulle, boulevard de Marquissat, 19000 Tulle.

La carte est une image qui doit être construite avec rigueur. Elle associe deux éléments : un fond de carte figurant des points, des lignes et/ou des zones, c'est-à-dire des lieux d'implantation, et des données (chiffrées ou qualitatives) traduisant des relations de quantité, d'ordre, ou de différence (*). L'exploitation partielle du recensement de 1982, par exemple, permet de construire une carte pour chacun des douze critères démographiques retenus.

L'analyse de la distribution des valeurs relevées

pour un critère particulier dans les vingt-deux régions de France, sur un axe étalonné, permet de distinguer de façon visuelle (et non arbitraire) des classes homogènes de régions. Celles-ci étant ordonnées des valeurs les plus faibles aux valeurs les plus fortes, la carte doit transcrire cet ordre et utiliser des paliers visuels ordonnés respectivement du blanc au noir.

Ainsi construite, chacune des douze cartes à un caractère permet de voir des oppositions entre groupes de régions (les forts, les faibles...). L'œil perçoit l'ensemble avant le détail.

Jeux de cartes

Ces douze cartes peuvent donner lieu à diverses manipulations :

— leur regroupement par thèmes est la première

Des images : pour qui ? pour quoi ?

et la plus fréquente : mouvement naturel (natalité, mortalité, accroissement naturel), mouvements migratoires (solde, déficit), structures par âges (jeunes, vieux). Digne d'intérêt, cette démarche groupant les critères d'une régionalisation de la démographie française dans des rubriques pré-établies constitue cependant un classement *a priori*.

— une démarche plus visuelle consiste à classer des images, soit identiques (natalité, accroissement naturel, jeunes d'une part, vieux et mortalité d'autre part), soit opposées (jeunes et vieux), soit complémentaires.

— enfin ranger ces classes d'images dans un rec-

tangle selon un ordre spatial construit une nouvelle image, une collection de cartes (fig. 1) dont l'interprétation met en évidence les spécificités des grands ensembles régionaux, éléments d'une première synthèse (**).

De douze cartes d'analyse à une carte de synthèse

Pour qui veut définir des types de régions démographiques, une simple superposition des douze cartes ne peut aboutir, et il convient d'envisager un autre type de traitement graphique : un traitement matriciel.

La visualisation du tableau de données initial

(douze critères pour vingt-deux régions) par simple remplacement de la valeur chiffrée contenue dans chaque case du tableau par le palier visuel correspondant construit une *matrice ordonnée*, nouvelle image. Les permutations des colonnes et des lignes classent et rangent des images identiques ou opposées. La matrice ainsi ordonnée est interprétée (fig. 2) : des types de régions déterminés par des types de caractères sont définis et localisés sur une carte (fig. 3). Cette dernière image construite offre une remarquable vision de synthèse, enrichissant ainsi la connaissance sur l'espace français à savoir une zonation démographique : une France du Nord dynamique (sous

Fig. 1

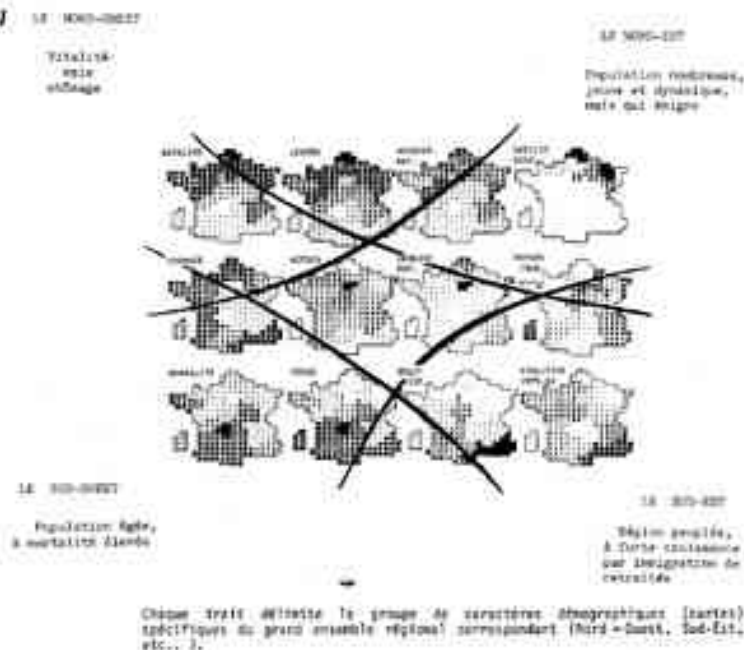


Fig. 2

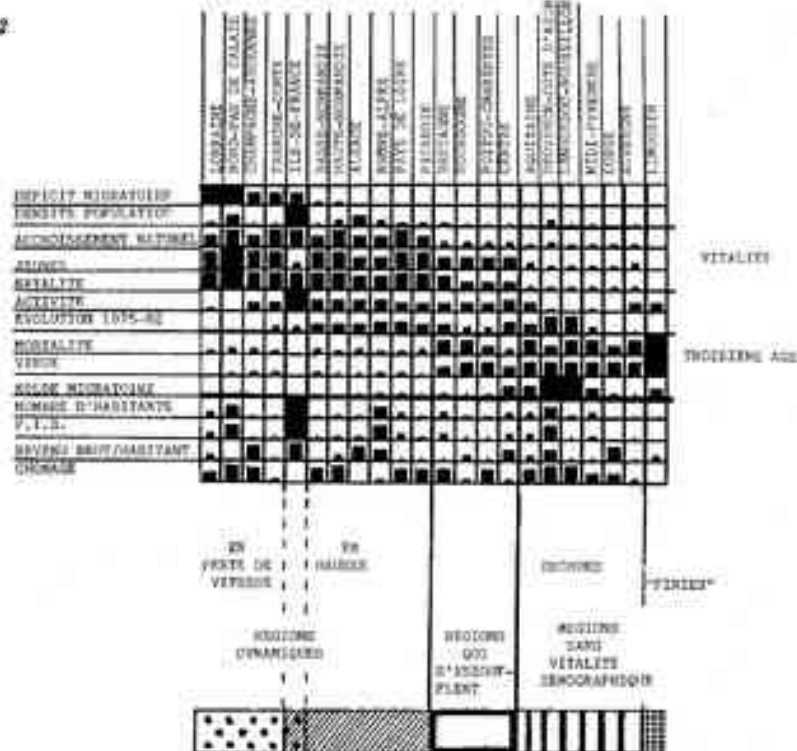


Fig. 3

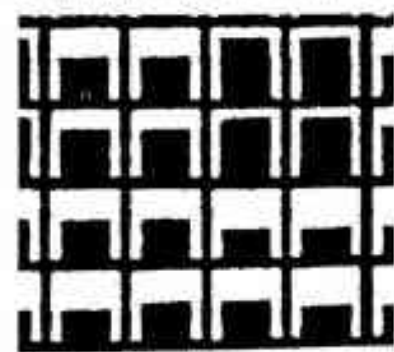
forme de croissant, avec des oppositions entre l'Est et l'Ouest), une France du Sud sans vitalité démographique, et une France médiane intermédiaire. Le langage verbal (oral ou écrit) s'intéresse d'abord au détail (lettre, mot) avant de cerner l'ensemble (phrase). Cartes et traitements matriciels sont régis par un langage visuel dont le processus de compréhension est inverse : c'est seulement après avoir pris connaissance du tout que l'œil voit ou cherche le détail. Voir n'est pas lire.

D'un grand intérêt dans l'acquisition de connaissances, à condition de respecter les règles de la sémiologie et de la statistique, ces images que sont les traitements graphiques représentent la forme visuelle de la réflexion logique(*). Encore trop confinées dans les milieux scientifiques, elles sont appelées à une large expansion dans le monde socio-économique, utiles alors pour apprendre et décider.

* Bertin (J.), *Sémiologie graphique*, Mouton/Gauthier-Villars, Paris, 1973. La *graphique* et le *traitement graphique* de l'information, Flammarion, Paris, 1977.

Boule (S.), *Initiation à la graphique*, Epi, Paris, 1975 et 1980.

** Le lecteur voudra bien excuser la localisation aberrante de la Corse et des contours trop géométriques imposés par les contraintes du logiciel CRECART (jeu de données) utilisable sur 100 ou Nanosystem. Un nouveau logiciel en cours d'élaboration (CARTAX) évite ce genre de localisation choquante.



DU LANGAGE A L'IMAGE

Philippe Quéau

La révolution des images numériques transforme notre culture scientifique et technique.

Depuis toujours, l'image inspire aux meilleurs esprits la plus grande méfiance. Les images sont trompeuses, dit Platon, elles ne sont que des fantômes des choses. Plus récemment, on a pu voir les physiciens abandonner tout espoir de représenter par des images précises et concrètes, les phénomènes microphysiques. Le pur formalisme mathématique ne laisse plus de place à l'intuition sensible. La théorie prime l'observation. Seuls les concepts, désormais, permettent d'organiser les expériences. Ce qu'on observe ce sont les conséquences des lois. Par exemple, le neutrino a été un être de raison bien avant de devenir un objet d'expérience.

Evidemment, le camp des défenseurs de l'image n'est pas désert. Pour St. Thomas d'Aquin, la connaissance obtenue par la raison requiert deux choses : des images reçues des sens et la lumière intelligible naturelle par la vertu de laquelle nous abstrayons de ces images nos conceptions intelligibles. Du côté des modernes, on trouve sous la plume de Louis de Broglie un vibrant appel en faveur d'un retour aux représentations concrètes : la représentation concrète de la réalité physique dans le cadre de l'espace et du temps a été à l'origine de tous les progrès de la science moderne : elle est conforme aux tendances profondes de notre esprit et nous cessons de bien comprendre si nous nous en écartons. Avant renoncé à maintenir ce genre d'images, il devient dangereux pour l'avenir de la physique qu'elle se contente trop facilement de purs formalismes, d'images floues et d'explications toutes verbales s'exprimant par des mots à signification imprécise. (1).

Comme on voit, l'image pose d'emblée de profonds problèmes épistémologiques. En effet, elle a évidemment partie liée, comme matière, et comme forme, à la question de la représentation.

Image-matière

Qu'est-ce qu'une image, en effet ? Physiquement, une image est le résultat de l'interaction d'une onde électromagnétique (la lumière du jour par exemple) avec une "onde matérielle" (l'objet). On connaît les aporismes cinglants de Baudelaire sur les photographes trop paresseux ou trop mal doués pour finir leurs études, qui se contentent de faire "travailler" la lumière du soleil.

(1) Louis de Broglie in *Logique et connaissance scientifique* - Paris.

Philippe Quéau ingénieur en chef, responsable du groupe "recherche image" à l'Institut national de l'audiovisuel (INA), direction de la recherche prospective, 4, avenue de l'Europe, 94360 Bry-sur-Marne.

Les physiciens aussi font "travailler" les ondes lumineuses ou électromagnétiques. Dans une photographie de franges d'interférences obtenue avec des photons ou des électrons, on peut déceler à la fois l'arrivée successive des corpuscules par leur impact dans la couche photosensible, mais aussi l'aspect ondulatoire du phénomène, rendu par le dessin des franges. L'image rend compte matériellement de la double nature corpusculaire et ondulatoire du phénomène. Cet exemple sert à illustrer la thèse de Louis de Broglie pour un retour possible aux représentations concrètes.

Image-forme

Cependant, l'image n'est pas seulement matière, elle est aussi "forme". Cette terminologie, qui remonte à Aristote, peut être modernisée par le mot "modèle".

Une forme "modèle" une matière. Dans le cas des images numériques, l'importance du "modèle" devient centrale. Les images du monde réel sont essentiellement le produit d'une interaction entre matière et énergie électromagnétique. Les images de synthèse sont d'abord des tableaux de nombres rangés dans des mémoires d'ordinateur. Elles font appel à une modélisation abstraite — purement conceptuelle. Ce n'est pas le soleil qui travaille, ce sont les mathématiques. Les informaticiens sont aussi paresseux que les photographes. Leurs images sont issues de modèles mathématiques plus ou moins présents, plus ou moins complexes. Traiter ou synthétiser une image avec un ordinateur revient à appliquer un modèle. Dans le cas du traitement, les données disponibles sont manipulées (filtrage, convolution, extraction, segmentation, corrélation...) puis restituées sous forme d'images. Dans le cas de la synthèse, les données déjà existantes sont peu nombreuses, et le modèle doit les "compléter" pour aboutir à l'image finale. Le traitement combine l'existant, la synthèse crée du nouveau.

Plusieurs niveaux de modèles sont utilisés en synthèse d'images et peuvent même coexister dans la même image. Les modèles géométriques permettent de définir directement et explicitement la forme des objets, à l'aide de coordonnées bidimensionnelles ou tridimensionnelles et de primitives graphiques. Les modèles algébriques codent l'information nécessaire à la synthèse de l'image de façon implicite, à l'aide d'équations mathématiques ou d'algorithmes. Les modèles symboliques utilisent les ressources des techniques de l'intelligence artificielle pour construire dynamiquement l'image. L'image est synthétisée après un échange de "messages" entre des "acteurs". Les "moteurs d'inférences" obéissent à des règles elles-mêmes contrôlées par des méta-règles.

Ces différents modèles permettent des types de contrôle et de manipulation très variés. La modélisation géométrique est très intuitive, puisqu'isomorphe à l'espace euclidien "naturel". La modélisation algébrique ou algorithmique peut réserver des surprises si l'on a affaire par exemple à des fonctions semi-calculables ou à des automa-

tes infinis. Dans le cas de la modélisation symbolique, on ne peut rien prédire a priori, puisqu'elle relève d'une démarche heuristique. Il s'agit en effet d'une modélisation ouverte, éventuellement soumise à une validation.

Image-simulation

L'image numérique, donc, offre la possibilité de construire, d'élaborer le modèle même qui préside à sa genèse. Cette action réflexive a pu être mise à profit pour la "conception assistée" désormais appliquée à de très nombreux domaines. En conception assistée par ordinateur (CAO), l'image sert de référence mobile et évolutive au processus de création. Ce qui est mis en valeur, en revanche, avec les modèles algébriques ou symboliques, c'est la fonction de simulation. Cette notion est au cœur de la révolution des techniques numériques de l'image. C'est la simulation qui est l'outil majeur rendant possible une nouvelle attitude vis-à-vis du "réel". C'est encore elle qui rend plausible l'émergence d'une nouvelle théorie de la connaissance. La simulation consiste essentiellement dans une "expérimentation symbolique" du modèle. Formellement, il s'agit d'explorer "l'espace des phases", la dynamique, de tous les états possibles du modèle. Ici, exploration veut dire recherche des propriétés cachées dans le réseau des relations algébriques ou logiques existant entre les différents paramètres et les différents "observables". Le modèle se comporte donc comme un "petit monde" dont il s'agit de tracer la carte et d'observer la "flore" et la "faune". En effet, les modèles peuvent se comporter comme s'ils étaient mus par une sorte d'autonomie, de "vie propre".

Comme disait Heinrich Hertz, on ne peut échapper au sentiment que ces formules mathématiques ont une existence indépendante et une intelligence propre, qu'elles sont plus sages que nous. Les images numériques introduisent une véritable coupure épistémologique dans l'histoire des moyens de représentation, précisément parce qu'elles héritent de cette "intelligence propre" des mathématiques. Jusqu'alors, l'image était trop concrète, limitée à l'enregistrement et à la copie du réel. Désormais, les images sont entièrement saisies par le langage formel des structures logico-mathématiques. Cet isomorphisme entre langage et image est la raison de la puissance des images numériques.

De ce fait, certaines des propriétés des langages symboliques peuvent s'appliquer aux images, et réciproquement les images projettent leur propre structure dans l'univers symbolique formel. Une image 3D évoluant dans le temps possède des caractéristiques topologiques isomorphes à un espace à quatre dimensions. Notre cortex visuel est donc capable d'appréhender "naturellement" par le biais d'images de synthèse animées, les relations les plus complexes pouvant exister dans un espace symbolique abstrait. Il suffit d'établir une correspondance entre "l'espace des phases" et les paramètres définissant l'image (objets, couleurs, textures...).

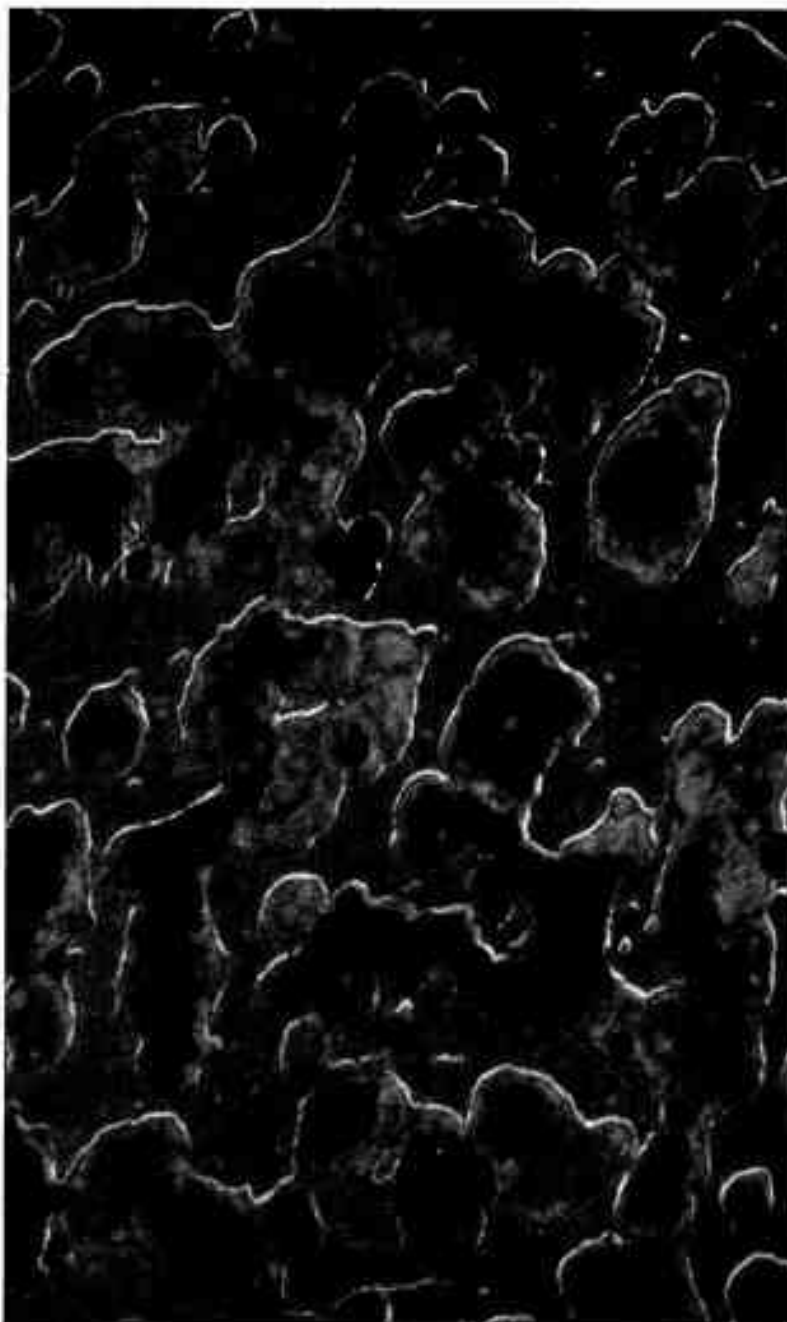
Image-représentation et métamorphose

L'image concrétise la représentation formelle que nous avons sur le monde, et surtout lui confère une "densité", une "réalité" susceptibles de favoriser des intuitions supplémentaires.

En effet, du point de vue de l'aide à la découverte, l'image offre des ressources sans équivalent. Tout d'abord, l'image est la projection visible d'un "espace". Elle hérite donc d'une topologie et des propriétés qui lui sont liées : notions de "frontière", de "limite", de "voisinage", de "distance".

D'autre part, l'image étant composée de "formes", on peut établir des "relations d'équivalence" entre ces formes, autrement dit, forger un concept de "ressemblance" qui, en fait, est une distance d'un type particulier. La manipulation des ressemblances est la base du jeu métaphorique et du "glissement fluide des concepts" qui font l'objet de recherches actuelles dans le cadre de l'intelligence artificielle. Enfin, la synthèse d'images animées nous offre le moyen, jusqu'alors inédit, de représenter les métamorphoses. La transformation des formes, c'est-à-dire l'union intime du temps et de l'espace, de l'embryogenèse à la dynamique des fluides, de la phylogénèse à la théorie des catastrophes, la transformation des formes est toujours restée un des phénomènes les plus rebelles à la représentation. En effet, les représentations classiques fixent ce qui peut être "sain" et laissent filer tout le transitoire, l'évanescence. Les formes prégnantes assoient l'autorité de leurs moments-clés et éclipsent ce qui, pourtant, les justifie, les explique, les génère. L'image de synthèse comme l'appartenance éminemment "plastique", cumulant l'accueil des formes et les ressources de leurs métamorphoses, apparaît comme l'outil idéal d'une philosophie bergsonienne par exemple.

L'équivalence symbolique entre le langage logico-mathématique et l'image rend donc possible un rôle complètement inattendu de celle-ci dans notre culture scientifique et technique. Alors que nous étions jusqu'alors enfoncés dans des débats schizophréniques entre pensée abstraite et représentation concrète, l'image numérique nous offre la chance historique de nous réconcilier en quelque sorte avec nous-mêmes.



LA REVANCHE

François Dagognet

L'image ne peut
laisser
indifférents
les philosophes.

L'image définit un moyen d'expression et de communication d'exception, encore que l'écriture l'ait vite éclipsé. Le "graphisme" ou la représentation visuelle convenait aux analphabètes ; les clercs s'en écartèrent. Il ne subsistait dans les premiers livres que sa manière réduite, en faveur de l'esthétique de l'initiale (les enluminures).

La surface bi-dimensionnelle déclassa l'image, alors que le langage écrit brilla par sa linéarité. Le principe "de la double articulation" qu'on a tant commenté permettait la construction illimitée des mots à partir de quelques unités seulement, d'où des expressions modulées et faciles à combiner.

De plus, l'écriture, — du fait de sa production facile —, peut être mécanisée et donc imprimée, alors que la gravure suppose toujours à son origine l'intervention laborieuse de l'artiste. On reprographie assurément le dessin (xylo- puis chalcographie, enfin lithographie) mais il faut commencer par graver le modèle. Tout semble donc desservir "la représentation figurative". Le texte semblait l'avoir emporté définitivement.

Le retour de l'image

Toutefois nous assistons à un retour du vaincu, pourquoi ?

Les disciplines expérimentales ont imposé l'idée d'un croquis ou d'un diagramme donnant plus d'informations sous un moindre volume (la compression des données) que le commentaire long et indirect. Rien ne vaut le graphe, sorte d'épure ou de silhouette architecturale.

Bi-dimensionnel assotement, plus étalé, mais le ruban de l'écriture, bien que mince, occupera plus de place. On connaît d'ailleurs l'adage selon lequel "un schéma l'emporte sur le long discours".

Les mots, la nomenclature, risquent d'enfermer de l'ambiguïté, voire de l'arbitraire, alors que le dessin structurel nous livre l'être relationnel, sa composition même, donc une expression universelle (comprise de tous) et nécessaire.

L'appellation d'un ensemble buissonnant, parce qu'elle linéarise, commence par un côté et s'achève par les autres, mais pourquoi débiter ici et non là ? On doit fixer des conventions, mais "l'écriture dans l'espace" (la formule dite développée) suppose moins de règles et surtout s'offre à nous dans "la simultanéité" (tout ensemble).

Ce qui a longtemps desservi l'image et ce qui expose son actuelle revanche vient de ce qu'elle a franchi l'obstacle qui la limitait : la mécanisation,

François Dagognet, professeur à l'université de Lyon, responsable de l'unité associée "Etude des systèmes", (UA 1144 CNRS), université de Lyon III, 74, rue Pasteur, 69007 Lyon.



l'enregistrement automatisé et la transmission à distance.

Sans perdre ses propres avantages, elle peut, en effet, être traduite et passer de la forme analogique à la numérique (binaire) qui permet de l'assimiler à une série de 0 et de 1. La technique moderne a su trouver ou créer les matériaux électroniques susceptibles de noter ainsi et de conserver l'information volumique. De même que l'imprimerie avait favorisé l'écriture, de même les composants modernes relèvent l'image de son infériorité séculaire. L'image, actuellement, s'émancipe et vole de succès en succès.

Évoquons-en deux :

• On lui a reproché de devoir se limiter aux surfaces. La tomographie la sauve de cette critique :



elle dépasse alors "la première couche" et peut même nous donner, à volonté, telle ou telle section. Sans d'ailleurs aller si loin, la seule radiographie met en lumière le caché, l'invisible.

Mais si une certaine substance échappe à la lecture aux rayons X ? Il suffit alors d'en connaître la composition. Il ne sera pas difficile d'insinuer dans sa trame les mêmes éléments, mais radioactifs. Ils marqueront alors la plaque photographique (méthode scintigraphique). L'imperceptible se révélera à travers un nuage de points.

• L'image reste cependant prisonnière de la perspective. Elle est enfermée, par principe, dans ses deux dimensions. Elle transforme le volume en sa projection plane. L'holographie récente permet de rébuter l'objection : le relief nous est rendu.

Image : représentation du réel ?

On ne manquera pas de nous objecter que le mot "arbre" par exemple (cinq caractères minuscules, quelle abréviation !) convient mieux à ce qu'il désigne que le plus cursif croquis, composé de plusieurs lignes qui occuperont plus de place. Surtout, ce qui perd le graphisme vient de ce qu'il ne crayonne qu'un "arbre particulier", non pas l'essence ou l'idée d'arbre. Le mot ne nous enlève pas dans l'individuel ou le contingent. Il exprime toutes les espèces qu'il transcende.

Tel est, en effet, le motif de la médiance : l'image nous plie au réel, tandis que le langage nous en délivre. Il dit "plus" avec "moins". Mais est-ce si sûr ?

Berkeley le philosophe a mis en garde contre ce que nous tenons pour un dérapage : dès que nous scrutons un peu notre substantif, nous discernons en lui "un arbre particulier". Le vocable semble ne pas s'y référer, parce qu'on ne le questionne pas, d'où, pour nous, le faux avantage de cette étiquette pseudo-générale.

Quant à l'image même, cessons de nous méprendre sur elle : elle expose des "relations". Elle tend toujours vers le diagramme, la carte ou le plan. Elle dévoile les agencements entre les fragments ou unités constitutives. Afin de la dévaloriser, on la tient trop pour une restitution du réel qu'elle se bornerait à redoubler.

Le dessin de l'arbre nous paraît s'attacher à la logique interne de ce végétal : des racines qui expliquent sa solidité, un tronc pour sa hauteur et surtout des ramifications irradiantes. Ce schéma dynamique a même servi de modèle aux classificateurs. Mais le méthodologiste ou l'historien des sciences soutiendra cependant que la connaissance même consiste à augmenter le savoir, non le voir, deux termes en opposition.

Nous le demandons : l'un peut-il dispenser de l'autre et même l'un ne sert-il pas à annoncer l'autre ? Ainsi, les molécules ou les atomes ou les particules du noyau ont d'abord été des hypothèses et des hypothèses seulement. Il fallut, tôt ou tard, ou les "réaliser" ou les "visualiser". La microscopie prend d'autant mieux le relais de la théorie qu'elle-même dépend de celle-ci et avance avec elle ou comme elle. La science exige donc la réconciliation du théorème et de sa concrétisation (d'où la visualisation). Il suffit d'enlever à l'image ce que les clercs lui adjoignent, afin de l'écartier : elle ne consiste point, en effet, en un relief mais se rapproche d'une construction "mi-concrète, mi-abstraite" (le dessin géométral). De même, le plan

Le scientifique interpellé par l'image

d'une ville n'en est pas la photographie. N'est-il pas son image — par excellence — la plus mise comme la plus riche d'indications ? Allons plus loin et proposons un "renversement", en ce sens que l'écriture s'essoufferait toujours à essayer de rejoindre une image qu'elle vise. L'œuvre littéraire tient souvent en l'effraction d'une géométrie secrète valorisée en une architecture, proche d'une "peinture abstraite".

Sous le texte, l'image...

Même le système philosophique complexe cache, dans ses lignes, la référence à une construction que le commentateur sait repérer. Bergson, assez hostile aux images, l'a reconnu : l'interprète recherche "une image qui est presque matière en ce qu'elle laisse voir et presque esprit en ce qu'elle ne se laisse pas toucher", — fantôme qui nous hante pendant que nous tournons autour de la Doctrine et auquel il faut s'adresser pour obtenir le signe décisif, l'indication de l'attitude à prendre et du point où regarder...

Force nous est de rétablir l'image intermédiaire sous peine d'avoir à parler de "l'intuition originelle" comme d'une pensée vague et "de l'esprit de la doctrine" comme d'une abstraction (l'intuition philosophique). Chez tel poète ou écrivain,

on doit surtout essayer de mettre en évidence des façons d'organiser, une technique "iconographique", des dispositifs spatiaux. Nous allons jusqu'à penser que le poète ou le philosophe cherche à rétablir les volumes à l'aide de la seule linéarité — à transgresser l'écriture avec et dans l'écriture.

Arbitraire ? Mais le philosophe n'a pas hésité parfois à glisser des "schémas" dans son argumentation (Bergson tout le premier) et le poète a pu verser dans la calligraphie, tel Apollinaire ou même Claudel — : l'emplacement et la longueur de ses vers représentent une "forme" (une maison ou un arbre) —. Il travaille alors sur un double registre. D'une autre façon, Henri Michaux a réuni la même performance : il commentait ses psychogrammes.

Les "figures du discours", pour nous, n'est pas là une expression à prendre à la légère ni métaphoriquement : la rhétorique consiste à apprendre à parler ou à écrire selon des constructions variées —. Ainsi, le volume ou la scène, — base du schéma — se trouve-t-il bien en filigrane sous ce qui l'abaissait ou lui déclarait la guerre, la file des mots et des phrases.

L'image survivait, tapie, chez les "emblématisés"



ou dans les échafaudages philosophiques — mais, actuellement, elle s'est réveillée : elle est sortie de l'ombre : elle rayonne — c'est pourquoi elle change notre société, et, sans en avoir l'air, modifie notre conduite comme elle bouleverse l'enseignement.

Un dernier indice, auquel nous tenons ? Il suffit d'ouvrir les livres d'il y a un demi-siècle : des manuels lugubres et iconoclastes, à peine y verrait-on une rare photographie ou un dessin surchargé. Ouvrons aujourd'hui le même traité, le texte recule à vue d'œil. Partout fleurissent les illustrations, les planches et les graphes. On y résume les principaux arguments sous forme de dioramas — la victoire, ou du moins la revanche, du vu sur le lu —.

IMAGE MENTALE ET PENSÉE SCIENTIFIQUE

Michel Denis

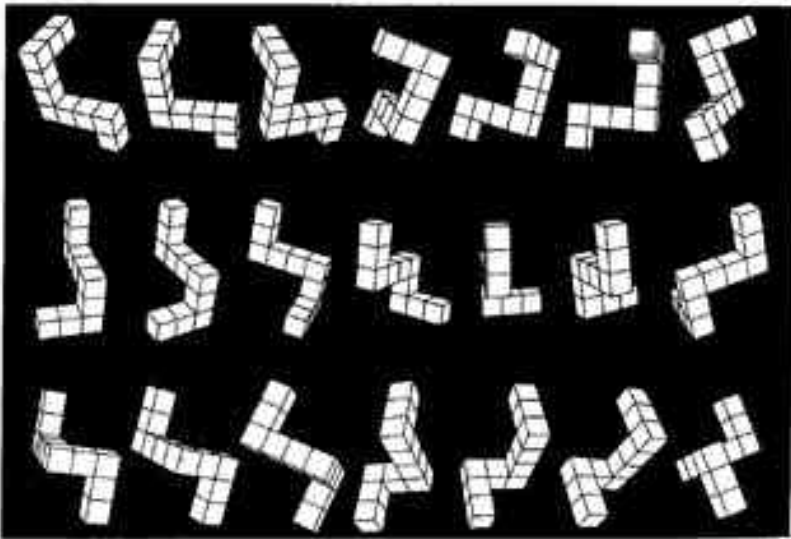
L'imagerie visuelle peut-elle servir certaines étapes de la créativité scientifique ?

L'image mentale constitue, dans le répertoire des aptitudes humaines, une capacité cognitive d'une haute valeur adaptative, en ce qu'elle permet à l'individu de traiter cognitivement d'objets ou de situations absents de son champ perceptif. L'image mentale permet d'évoquer une réalité absente déjà connue et de retrouver une information attachée à celle-ci. Si l'on nous demande par exemple de dire si les villes de Brest, Paris et Nancy peuvent être reliées par une ligne droite sur la carte de France, quelle autre forme de représentation mentale que l'image visuelle nous permet de répondre à une telle question ? L'image nous permet également d'évoquer des états hypothétiques, non encore réalisés, voire irréalisables, du monde. Par exemple, elle constitue un instrument cognitif privilégié lorsqu'il s'agit de se représenter, par anticipation, des agencements inédits de configurations. Y a-t-il assez de place dans mon bureau pour installer un classeur entre l'armoire et la fenêtre ? Plus généralement, l'image intervient dans de nombreuses formes de l'activité imaginative tournées vers la création et l'invention.

Michel Denis, directeur de recherche au CNRS, Centre d'études de psychologie cognitive (GS, 860 CNRS), université de Paris Sud, Bât. 335, 91405 Orsay Cedex.

Il existe bien des domaines scientifiques dans lesquels l'image mentale est de nature à fournir un support significatif au développement de la pensée et du raisonnement. Les mathématiciens font souvent témoignage du rôle de la visualisation au cours de certaines étapes de leur raisonnement, en particulier dans les problèmes impliquant le tra-

itement de configurations spatiales, mais aussi dans des formes plus abstraites de raisonnement. Dans un autre domaine, celui de la chimie organique, un cas souvent cité est celui de la découverte, par exemple de formes utilisées dans les expériences de Roger Shepard sur la "rotation mentale" (Science, vol. 171, n° 3972, 19 février 1971).

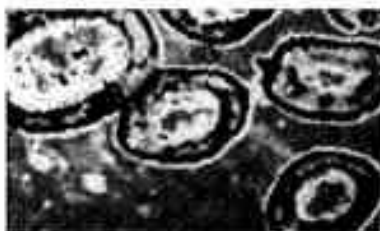


Le scientifique interpellé par l'image



Kekulé, de la structure de l'anneau du benzène, à partir de la visualisation des contorsions d'un serpent en train de se mordre la queue. La capacité qu'a l'image de figurer, sous forme analogique, une réalité non immédiatement accessible à la perception humaine est certainement à l'œuvre dans les situations de découverte et d'invention. En physique, il est établi que la découverte des relations gouvernant les champs électromagnétiques doit beaucoup à l'imagerie visuelle dont au XIX^e siècle Michael Faraday et James Maxwell étaient les adeptes. Mais, dans l'histoire de la physique contemporaine, le cas le plus illustre est assurément celui de la théorie de la relativité, dont la conception paraît avoir bénéficié de l'inclination particulière de son auteur pour l'élaboration et la manipulation des images et, plus généralement, pour les formes non verbales de la pensée. La reconstitution détaillée, par Max Wertheimer, des processus intellectuels qui ont conduit à la théorie de la relativité, complétée par les nombreux témoignages d'Albert Einstein lui-même, permettent d'assigner à l'imagerie visuelle un rôle authentique dans la genèse de la théorie. On se souviendra, à cet égard, que le problème de la "visualisation" des entités non accessibles à la perception humaine, comme l'atome, lut au cœur de la controverse théorique entre les tenants de la mécanique quantique et ceux de la mécanique ondulatoire.

Ces différents exemples, toutefois, ne doivent pas être vus comme soutenant une notion de l'image comme représentation imposant à un individu passif, par illumination, la solution d'un problème. Ils appuient plutôt l'idée de l'image comme modèle utilisable au cours du raisonnement, mais demandant, à certaines étapes, d'être relayé par des formes de représentation plus abstraites. Ils attestent en tout cas que certains "modes de pensée", comme l'imagerie visuelle, peuvent servir utilement certaines étapes de la créativité scientifique. Ils se trouvent corroborés par ce que nous savons, d'autre part, de l'efficacité de l'imagerie visuelle dans de nombreuses formes du raisonnement humain, qu'il soit tourné, par exemple, vers la résolution de problèmes ou encore vers la création d'objets techniques.



Si l'image a sa place dans les processus intellectuels qui guident la création scientifique, cette forme de représentation entretient avec la pensée scientifique d'autres sortes de relations qui valent d'être soulignées ici. L'image a constitué, depuis l'Antiquité, un objet très vil de préoccupation pour la pensée humaine, comme en atteste l'intérêt que lui ont porté de nombreux courants philosophiques. Cependant, comme c'est le cas pour la plupart des phénomènes de la vie psychologique, ce n'est que de façon relativement récente que l'image s'est trouvée "scrutinée", en tant qu'objet scientifique, par des approches utilisant la métho-

dologie expérimentale. Alors que l'idée que nous nous faisons jusqu'alors de ce phénomène ne reposait que sur la réflexion spéculative et sur l'analyse introspective, la psychologie scientifique, et plus spécialement la psychologie cognitive des vingt dernières années, a mis en œuvre un appareil méthodologique permettant d'établir, à propos de ces événements psychologiques essentiellement "privés" que sont les images, un corps de connaissances objectives sur leurs propriétés et leur fonctionnement.

Ainsi, l'efficacité des images visuelles dans le développement de nombreuses sortes d'activités psychologiques est aujourd'hui bien attestée, qu'il s'agisse, entre autres, de la compréhension de phrases, de la mémorisation de textes, de la résolution de syllogismes, etc... Lorsque des individus sont sollicités, par une consigne appropriée, à construire une représentation mentale figurant les données qui leur sont soumises sous forme verbale, leurs performances, mesurées par le nombre de réponses correctes ou encore par la durée d'exécution de la tâche, s'en trouvent significativement améliorées. Ainsi, lorsque les individus construisent mentalement un "modèle" spatial des objets ou des relations qui leur sont décrites, ces individus se trouvent dans une position privilégiée non seulement pour mémoriser les entités décrites, mais aussi pour tirer des inférences à leur sujet. L'efficacité fonctionnelle de l'image peut alors être rapportée à l'une de ses propriétés majeures, à savoir la relation d'analogie structurale qu'elle entretient avec les événements perçus. Cette analogie lui permet de supporter des opérations cognitives qui simulent étroitement les opérations qui seraient effectuées sur l'objet si celui-ci était présent dans le champ perceptif.

Les recherches expérimentales des dernières années ont mis en évidence l'isomorphisme structural de l'image visuelle à l'égard de l'objet que cette image évoque. Les études chronométriques sur l'"exploration mentale", notamment, appuient la thèse selon laquelle l'image possède une "métrique", par laquelle les relations spatiales caractérisant un objet se trouvent effectivement préservées au niveau de sa représentation interne. Les processus permettant de manipuler, d'enrichir, de transformer les images mentales ont été également étudiés. Les recherches de Roger Shepard montrent notamment que, lorsque des sujets doivent imaginer la rotation d'une configuration sur un certain parcours angulaire, la durée de la "rotation mentale" est proportionnelle à l'amplitude de la rotation. Les processus mis en jeu pour exécuter mentalement la rotation obéiraient donc à des contraintes très similaires à celles qui s'appliquent à la rotation physique d'un objet réel.

Parmi les orientations récentes de la recherche sur l'image, on signalera les efforts menés en vue de caractériser l'infrastructure nerveuse responsable de l'activité d'imagerie. L'hypothèse est faite notamment que l'imagerie visuelle met en jeu des mécanismes cérébraux similaires à ceux que recrute la perception visuelle. L'image mentale correspondrait alors, en l'absence d'un stimulus qui donne normalement lieu à une certaine image perceptive, à la mise en jeu des processus nerveux que l'individu mettrait en œuvre au cours de cette perception.

Interlocuteur
des professionnels
de l'image et du son

Interlocuteur
des chercheurs

Interlocuteur
des médias

25 étoiles par seconde

Formation

Une mémoire

Une dramaturgie

Diffusion

Des outils
pour la recherche

Production

Un réseau Une équipe
Des équipements
(films et vidéo)

CNRS AUDIO-VISUEL

27, rue Paul BERT 94204 IVRY

Tél. : 46.70.11.52.

cnrs audio-visuel

