

Le courrier du CNRS 77

Auteur(s) : CNRS

Les folios

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

124 Fichier(s)

Les relations du document

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

Citer cette page

CNRS, Le courrier du CNRS 77, 1991-06

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

Consulté le 17/12/2025 sur la plate-forme EMAN :

<https://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/166>

Présentation

Date(s)1991-06

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 pages53

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

LE COURRIER DU CNRS

DOSSIERS SCIENTIFIQUES

SIGNAUX ET IMAGES



LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET DE L'IMAGE

Une discipline a pour ambition de
maintenir la continuité de la chaîne qui
traite l'information, depuis l'acquisition
des signaux jusqu'à leur interprétation.
Une clé pour la médecine,
les télécommunications, la robotique,
l'acoustique, l'astrophysique...

N° 77 - 50 F - JUIN 1991

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE





COUVERTURE

Première étape du traitement du signal: l'acquisition de l'information. Le VLA (Very Large Array), radiotélescope interféromètre situé à Socorro, Nouveau-Mexique, est un bon exemple d'outil conçu pour s'adapter au type de signal émis par la source. Les vingt-sept antennes mobiles de vingt-cinq mètres de diamètre sont disposées sur les trois branches d'un immense Y. Développées au maximum, elles permettent d'observer à haute résolution des radiosources immenses; rassemblées au maximum, d'observer des sources étendues avec une grande sensibilité. (© Cliché Remneyer/Cosmos).

En 4 de couverture

A partir d'un objet dont on a mesuré la forme par triangulation active, il est aisé de reconstituer des vues sous différents angles. Ici, Victor Hugo. (Cliché F. Schmitt, Telecom-Paris).

LE COURRIER DU CNRS

DOSSIERS SCIENTIFIQUES

Directeur de la publication :
François Kourilsky

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

Direction : Bernard Hagene
Rédaction en chef : Sylvie Langlois
Rédaction : Pierrette Maissouet
Diffusion : Christine Girard
Secrétariat : Muriel Hourlier

COMITE SCIENTIFIQUE :

Coordinateur
Gérard Favier

Pierre-Yves Arquès
Albert Bijaoui
Jean Caelen
Jean-Marc Chassery
Georges Chevallier
Patrick Flandrin
Claude Guéguen
Jean-Louis Lacoume
Roger Mohr

COMITE DE LECTURE

Georges Chapouthier
Bernard Dormy
James Hiéblot
Serge Sarrazin

Ce numéro du *Courrier du CNRS* a été préparé sous la direction du département scientifique Sciences pour l'ingénieur du CNRS. Le *Courrier du CNRS* remercie les auteurs et les organismes qui ont participé à ce dossier.

Les titres, les chapeaux introductifs et les résumés ont été rédigés par la rédaction.

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

Prix : 50 francs. Vente au numéro : Presses du CNRS, 20-22, rue Saint-Amand, 75015 Paris- tél : (1) 45 33 16 00.

Fabrication

Coordination de la fabrication : J.O. - Communication, 10, avenue Bessière, 92130 Issy-les-Moulineaux
Direction artistique : Top Conseil, 18, rue Volney, 75002 Paris - tél : 42 96 14 56
Impression : Roto-France-Imprimerie, boulevard de Beaubourg, Emerainville, 77327 Marne-la-Vallée Cedex 2 - tél : 60 06 60 00
Commission paritaire : AD 303
ISSN : 0-153-985-X. ISBN : 2-222-04597-5

© Centre National de la Recherche Scientifique

Vous avez dit: "La recherche en Traitement du Signal et de l'Image" en 1991?



Jean-Claude Charpentier,
 Directeur scientifique du département des
 Sciences pour l'Ingénieur du CNRS

De l'infiniment petit - la matière et ses particules - à l'infiniment grand - l'univers et ses galaxies -, en passant par l'échelle humaine, "le mieux comprendre" nécessite de collecter l'information, de la transmettre, et bien entendu de la traiter et de l'interpréter, afin de décider et d'agir. Cette information, dont les signaux et les images sont les véhicules omniprésents et quotidiens, est le fil conducteur de notre compréhension du monde. Cette information, il faut donc la traiter et la discipline qui s'en charge se reconnaît sous l'intitulé **Traitement du Signal et de l'Image (TDSI)**. Au demeurant je ne devrais pas parler de discipline, mais de multidisciplines tant la recherche en TDSI fait appel aux mathématiques appliquées, à l'informatique, à l'intelligence artificielle et aux sciences cognitives, avec comme champs d'application privilégiés les télécommunications, la mécanique, l'acoustique, la robotique, la géophysique, l'astrophysique, la sismique ou le génie biomédical. Et quels champs d'application passionnants! Et les réalisations technologiques qui font appel aux méthodes de TDSI, parlons-en: elles sont tout aussi nombreuses que spectaculaires comme le montrent quelques exemples: le radio-téléphone mobile, le visiophone, la télévision haute définition TVHD, le jouet "Speak and Spell", les nombreux appareils médicaux tels l'échographie, l'électrocardiographie, l'électroencéphalographie, ou bien encore les sismographes, les radars, les sonars, les très grands télescopes, les satellites (METEOSAT, SPOT) sans oublier les systèmes de vision artificielle pour les robots mobiles des futures générations. Oui, ce sont le plus souvent de véritables défis pour repousser toujours plus loin les frontières de la haute technologie. Mais devant ces défis fascinants des sciences et technologies de l'information, que représente et comment se comporte la recherche scientifique française en 1991?

La réponse est simple: par son importance numérique, par sa présence et par le rôle qu'elle joue dans les manifestations internationales, la communauté française en TDSI occupe la deuxième place au monde après les Etats-Unis d'Amérique. C'est pourquoi, en 1988, il m'a semblé nécessaire de structurer cette communauté en mettant en place un Groupement de Recherche CNRS "Traitement du Signal et Images" qui coordonne les

activités scientifiques et technologiques d'environ 300 chercheurs en provenance de 50 laboratoires et de 20 entreprises. Ainsi, du plus cognitif au très appliqué applicable, le CNRS a mobilisé ses forces afin de promouvoir le TDSI et de lui donner son dynamisme. Pour le prouver, ce dossier scientifique du *Courrier du CNRS* présente un large aperçu, certes non exhaustif, des activités de recherche foisonnantes liées à la multidisciplinaire TDSI. Réalisé à l'initiative du Comité d'Objectif Scientifique et Technique "Traitement du Signal et Imagerie" du département SPI, il est de fait l'œuvre de la communauté française qui s'est totalement mobilisée pour sa parution.

Plus que sur les méthodes, ce sont sur les réalisations et sur certaines applications que sont focalisés les articles publiés. Beaucoup concernent notre vie quotidienne et témoignent à l'évidence de la place occupée aujourd'hui par le TDSI parmi les Sciences et Technologies de l'Information, place qui va encore prendre plus d'importance à l'approche du troisième millénaire où les enjeux de notre société seront plus que jamais le mieux comprendre pour le mieux vivre et son triangle d'or "santé, sécurité, confort".

Où, la recherche en Traitement du Signal et de l'Image en 1991 s'étend vraiment sur tous les champs scientifiques qui peuvent s'inscrire dans le continuum, capter, analyser, filtrer, exploiter, pour interpréter, reconnaître, comprendre, décider et agir, mais ce, aujourd'hui, dans un esprit de système intégré.

Jugez-en à la lecture des pages qui suivent...

Le mieux comprendre pour le mieux vivre

SOMMAIRE

Avant-propos

- Le traitement du signal
et de l'image : de l'observation
à la prise de décision
*Signal and image processing : from
observation to decision*
Gérard Favier 6
- Le traitement du signal :
une discipline « ancillaire »
*Signal processing : an « ancillary »
discipline ?*
Bernard Picinbono 8

Capter et mesurer

- Introduction
Georges Chevallier 10
- Percept et la fusion multicapteur
*Percept or the necessity of
experimental verification of
emerging theories on multisensor
fusion*
Olivier Dessoude
Bertrand Zavidovique 12
- Pour observer l'intérieur
de l'océan
*Measurement of time delays for
ocean acoustic tomography*
Geneviève Jourdain 13
- Imagerie acoustique pour
machines silencieuses
Acoustic imagery for silent machines
Bernard Béguet 14
- Les signaux de la parole ne sont
pas que du son
Speech signals are not only sounds
Tahar Lailouache
Bernard Teston 15
- Tomographie ultrasonore par
diffraction et diagnostic médical
*Ultrasound diffraction tomography
and medical diagnosis*
Bernard Duchêne
Dominique Lesselier
Walid Tabbara 17
- L'imagerie par résonance
magnétique nucléaire
Nuclear magnetic resonance imaging
Michel Sauzade
Geneviève Guillot
Patrick Gonord 17
- Suivre le cœur en mouvement
Visualizing the beating heart
Isabelle Magnin 19
- Imagerie CCD de l'Univers
lointain
CCD imaging of very deep Universe
Bernard Fort 19

- La Mama
*MAMA : computer processing of
astronomical photographs*
Jean Guibert 20
- Les images des sondes Voyager
The Voyager images
Bruno Sicardy 22

Modéliser et analyser

- Introduction
Patrick Flandrin
Jean-Marc Chassery 23
- Comment fonctionne le système
auditif ?
Hearing and perception models
Jean-Luc Schwartz
Pierre Escudier 25
- Modélisation des bruits en
acoustique sous-marine
*Noise modelling in underwater
acoustics*
Pierre-Yves Arqués
Jean-Pierre Le Cadre 26
- Analyse spectrale de signaux
stationnaires
Spectral analysis of stationary signals
Nadine Martin 27
- La vitesse du sang
Ultrasound Doppler velocimetry
Guy Demoment
Alain Herment 28
- Signaux non-stationnaires,
temps-fréquence et ondelettes
*Nonstationary signals, time-fre-
quency and wavelets*
Patrick Flandrin
Yves Meyer 29
- Caractérisation fine de bruits
moteur
Engine noise characterization
Monique Chiollaz
Bernard Favre 30
- Jouer sur le temps, jouer sur
la fréquence
*Modifications of sound signals
through linear time-frequency
representations*
Daniel Arbib
Richard Kronland-Martinet 31
- La structure du plasma de
l'ionosphère
*Ionosphere plasma structure studied
by wavelet analysis*
Jean-Claude Carisler
Bruno Forget
Dominique Lagoutte
Jean-Paul Vilain 33

- Images : représentations et
modèles
*Images : modelling and
representation*
Jean-Marc Chassery 34
- La distribution des galaxies dans
l'Univers
*Galaxies distribution and wavelet
analysis*
Albert Bijaoui
Eric Slezak 35
- Le traitement des objets
Object processing
Henri Maître 36

Coder et transmettre

- Introduction
Claude Guéguen 38
- Codage et cryptographie ou
comment protéger la transmission
de l'information
*How to protect information
transmission*
Jean-Claude Bie 40
- Traitement adaptatif du signal en
transmission
*Adaptive signal processing in
transmission*
Odile Macchi 42
- La radio de qualité laser dans la
voiture, c'est pour demain
*Digital sound broadcasting to mobile
receivers*
Bernard La Floch
Damien Castelain 43
- Images des grands fonds par
canal acoustique
*Image transmission on underwater
acoustic channel*
Alain Glavieux
Joëlle Labat 45
- Les systèmes optiques cohérents
Coherent lightwave techniques
Yves Jaouan
Claude Chabran 46
- La télévision du futur
Future TV
Claude Labit 47
- Images comprimées pour grand
débit
Image data compression and coding
Ramy Prost
Ahila Baskurt
Robert Goutta 48

Ondelettes et compression
numérique des images
*Wavelets and digital compression of
images*
Michel Barlaud
Marc Antonini
Pierre Mathieu

50

La compression d'images en
télédétection
*Image compression and remote
sensing*
Corinne Mailhes

51

La parole comprimée
Compressed speech
Denis Rochette

52

Filtrer et synthétiser

Introduction
Jean-Louis Lacoume

53

La restauration des vieux
enregistrements
Old recording restoration
Jean-Christophe Vialère
Sylvio Montrésor
Jean-François Allard

55

Acoustique sous-marine :
comment réduire le bruit ?
*Noise reduction in underwater
acoustics*
Christine Servière
André Silvent
Daniel Baudols

56

Les courants faibles au secours
du courant fort
*From eddy currents probe to
electricity : weak signals help power
generation*
Bruno Georget

57

Du signal sismique à la structure
du sous-sol
*From seismic signal to underground
structure*
François Gélangeaud

58

Lissage adaptatif de potentiels
évoqués
*Adaptive smoothing of evoked
potentials*
Christian Doncarli
Pierre Guiheneuc

59

Réduction de bruit en
audioconférence ou dans les mobiles
*Noise reduction for audioconference
or in mobile vehicles*
Yves Grenier

60

Les problèmes inverses
Inverse problems
Guy Demoment
André Lannes

61

La tomographie ultrasonore en
réflexion
Ultrasonic reflection tomography
Jean-Pierre Lefebvre

62

L'intérieur du corps en trois
dimensions
*Reconstructing the three-dimensional
internal structures of human body*
Pierre Grangeat

63

Synthèse d'ouverture et très
haute résolution
Aperture synthesis methods
André Lannes

64

La modélisation du conduit vocal
Vocal tract modelling
Louis-Jean Boë
Shinji Maeda
Pascal Perrier

64

La génération d'un signal
spécifique : la parole
*The generation of a specific signal :
speech*
Gérard Bailly

66

Simuler l'espace sonore subjectif
Simulate auditory space
Georges Canévet

67

Des images 3D en microscopie
électronique
*Three-dimensional reconstruction
and image processing of randomly
oriented particles in electron
microscopy*
Jean Lamy

69

Analyse multivariée en imagerie
spectroscopique
*Multivariate statistical analysis of
sequences in spectroscopic imaging*
Noël Bonnet
Pierre Trebbia

70

L'infographie au service
de la vision par ordinateur
*Using infography to enhance vision
techniques*
André Gagalewicz

72

Décider et contrôler

Introduction
Pierre-Yves Arguès
Gérard Favier

74

Structures mécaniques :
surveiller les vibrations
*Model based monitoring and
diagnosis : case studies in vibration
mechanics*
Michèle Basseville
Albert Benveniste

76

A l'écoute des engrenages
Early detection of faults in gears
Ménad Sidahmed

77

Interpréter l'activité électrique
du muscle
*Aided diagnosis by surface recorded
EMG signals*
Francis Castanié

78

L'électrocardiographie à haute
résolution
High resolution electrocardiography
Hervé Rix
André Varenne

79

Nécessité de l'analyse en
imagerie médicale
*The usefulness of medical image
analysis*
Anne-Marie Laval-Jeantet
Maurice Laval-Jeantet

80

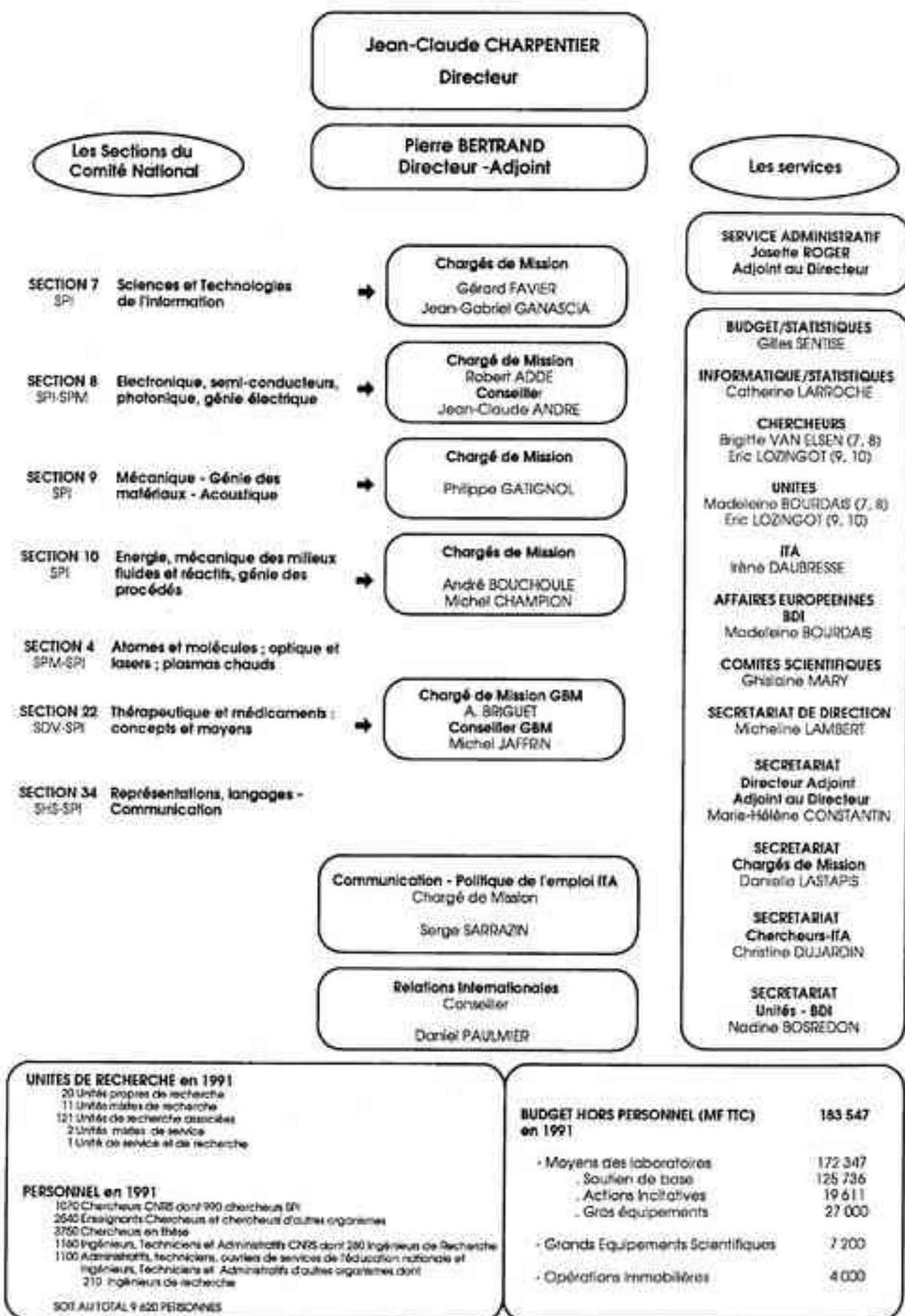
Imagerie médicale et infographie
*The contribution of infography to
medical imaging*
Jacques Chambron

81

SOMMAIRE

Le phonème : onde ou corpuscule ? <i>Phoneme, wave or particle ?</i> Jean Caelen Paul Déglisse	83	Interpréter et reconnaître	De l'image à l'intervention chirurgicale <i>Computer assisted medical interventions</i> Jacques Demongeot Stéphane Lavallo Philippe Cinquin	106
Le goniomètre adaptatif <i>The adaptive goniometer</i> Laurent Kopp	84	Introduction Jean Caelen Roger Mohr	Les irrégularités de la rotation terrestre <i>The Earth's rotation irregularities disentangled</i> Martine Feissel Daniel Gamble	107
Le sonar et la fonction de pistage <i>Sonar and tracking functions</i> Georges Thomas Claude Jauffret	85	Peut-on entendre les formes du conduit vocal ? <i>Can we hear the shapes of the vocal tract ?</i> Christian Abry Gang Feng	95	
Systèmes de veille et fusion de données <i>Survey systems and data fusion</i> Bernard Lachèse Pierre-Yves Arques	86	Reconnaissance acoustique en sonar passif <i>Acoustical recognition in passive sonar</i> Christian Plumejeaud	96	Les oscillations de la surface du Soleil <i>Solar surface oscillations</i> Eric Fossat Gérard Grec Bernard Gelly François-Xavier Schmider
Classification d'objets en imagerie sonar <i>Object classification in sonar imaging</i> Benoit Zerr Jean-Pierre Kamin	87	Segmentation d'images <i>Image segmentation</i> Jean-Pierre Coqueret	97	La morphologie des granules solaires <i>Solar granulation</i> Thierry Roudier
Le traitement du signal et le pêcheur <i>Signal processing and fisher</i> Roland Person	87	De l'image animée à la mesure du mouvement <i>From image sequence to motion analysis</i> Patrick Bouthemy Georges Tzirtas	98	L'activité solaire sous analyse <i>Analysis of solar activity from spectroheliograms</i> Elisabeth Ribes Pierre Mein
Problématique de la détection de contours <i>Problems in edge detection</i> Djemel Ziou Brigitte Wrobel-Dautcourt	89	Vision par ordinateur : comment interpréter les images <i>The role of recognition in image interpretation</i> Gérard Giraudon Monique Thonnat	99	Circuits et systèmes de reconnaissance vocale <i>Circuits and systems of speech recognition</i> Joseph Mariani Christian Gagnoulet
Le terrain et sa représentation numérique <i>Digital terrain models from airborne or satellite images</i> Guy Ruckebusch	90	L'œil du robot <i>Robot's eye</i> Marc Richetin Michel Dhome	101	Evolutions techniques et développement des systèmes <i>Impact of technology on the development of signal processing system</i> Johi Le Roux
« Scidar » pour cartographier la turbulence atmosphérique <i>Atmospheric turbulence profiling by the Scidar technique</i> Jean Vernin	91	Vision et robotique mobile <i>Vision and mobile robot</i> James L. Crowley Roger Mohr	102	Index thématique
		Le robot aux champs <i>The agricultural robot</i> Gilles Rabatel Pierre Baylou	103	Subject index
		Le robot dans la mine <i>Computer vision applied to selective cutting in a potash mine</i> Jean-José Orleu Maurice Briot	105	Index auteurs

LE DEPARTEMENT SCIENCES POUR L'INGENIEUR au CNRS



Le traitement du signal et de l'image : de l'observation à la prise de décision

■ Gérard Favier

Apprendre, communiquer, raisonner, décider et agir sont les principales facultés qui confèrent à l'homme son intelligence. Ces facultés, l'homme s'est fixé comme objectif de les transmettre aux systèmes artificiels. Ainsi, après avoir conçu l'outil qui prolonge le geste, puis la machine devenue robot qui effectue ce geste de façon automatique, son ambition aujourd'hui est de doter les systèmes artificiels d'une intelligence qui les rende autonomes.

Ce défi technologique, certainement l'un des plus audacieux de cette fin de siècle et du siècle prochain, pourra être relevé grâce aux progrès considérables réalisés en électronique et en informatique, et à l'arrivée des futurs ordinateurs neuronaux.

De façon générale, doter d'intelligence les machines (ordinateurs, robots) et les matériels (capteurs, appareils médicaux, systèmes de surveillance...) relève des sciences et technologies de l'information : informatique, automatique et traitement du signal. Ainsi, l'intelligence artificielle intervient pour introduire les facultés d'apprentissage et de raisonnement ; le traitement du signal et de l'image (TDSI) contribue à apporter aux systèmes leur capacité de communication et d'aide à la décision ; l'automati-

que, science de l'action, fournit les outils et les méthodes pour le contrôle/commande.

D'un point de vue systémique, ces différentes facultés d'apprentissage, de communication, de raisonnement, de décision et d'action concourent toutes à un traitement de l'information ; et en particulier, c'est une véritable chaîne de traitement qui permet d'effectuer le passage de l'observation à la prise de décision.

Ce dossier scientifique a été conçu de façon à présenter le traitement du signal et de l'image à travers les différents maillons de cette chaîne de traitement.

En effet, en TDSI, le point de départ est toujours l'observation et l'acquisition de mesures délivrées par un ou plusieurs capteurs (antenne, télescope, sismographe, appareil médical, caméra vidéo...). Ces mesures qui se présentent sous la forme de signaux ou d'images, sont numérisées avant d'être transmises à l'ordinateur pour être traitées. Ce sont ces signaux et ces images qui véhiculent l'information utile pour prendre une décision.

Dans le cas des communications, l'observation effectuée au niveau du récepteur résulte d'une source signal ou image, transmise par un émetteur via un canal de transmission, après codage, compression et éventuellement protection contre les intrus.

Le traitement proprement dit com-

mence en général par une phase d'analyse ayant pour objet de dégager les principales caractéristiques des signaux et des images dont on veut extraire le contenu informationnel.

L'étape suivante consiste à les mettre en forme, dans le sens d'une réduction des parasites, appelés aussi bruits, qui se sont introduits au niveau des capteurs ou lors de l'étape de transmission. On dit aussi que l'on cherche à augmenter le rapport signal/bruit.

L'étape ultime du traitement consiste alors à extraire l'information utile contenue dans les signaux et les images. Cette extraction de l'information s'accompagne d'une phase d'interprétation qui fait appel au raisonnement humain et s'appuie sur l'expertise disponible relativement à l'application envisagée. Cette interprétation peut être effectuée soit directement par l'utilisateur au vu de représentations graphiques, soit à travers un dialogue homme/machine ; le système de traitement joue alors le rôle d'un système d'aide à la décision grâce à la capacité de raisonnement dont on l'a doté en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle et plus particulièrement des systèmes experts.

Six chapitres ont ainsi pu être dégagés, de manière un peu artificielle il est vrai, tant est forte l'interdépendance entre les différentes étapes du traitement qu'ils renferment.

— « Capter et mesurer » : c'est la phase

d'observation et d'acquisition des signaux et des images à l'aide de capteurs. – « Modéliser et analyser » : c'est l'étape d'analyse au cours de laquelle les principales caractéristiques des signaux et des images sont mises en évidence, à l'aide d'une représentation non paramétrique (analyse spectrale ; analyses temps/fréquence et temps/échelle) ou paramétrique, appelée aussi modèle, et en prenant en compte l'information a priori dont on dispose vis-à-vis du phénomène étudié. Le rôle de ces représentations est crucial puisqu'elles conditionnent le type de traitement aval.

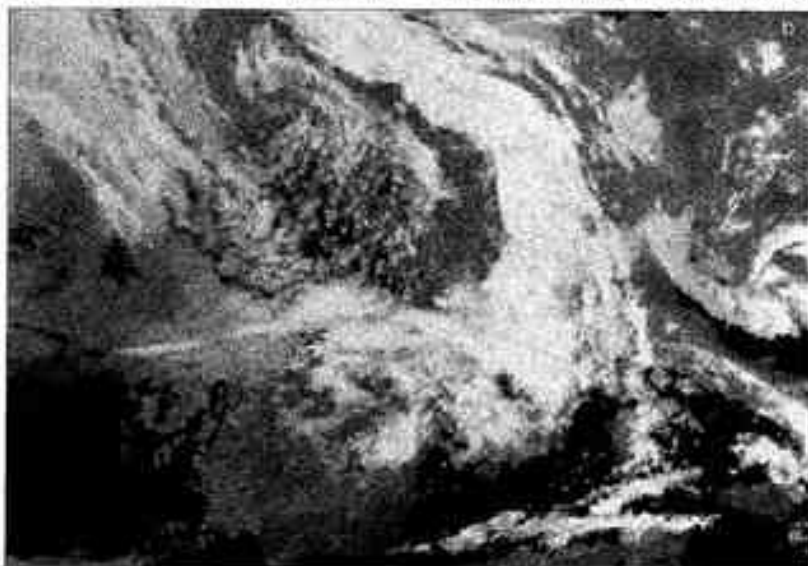
– « Coder et transmettre » : c'est l'étape de transmission et de stockage de l'information, avec comme objectifs d'augmenter la capacité des canaux de transmission, en utilisant des liaisons

correspondant au chapitre :

– « Décider et contrôler » : Cette étape consiste à déterminer des paramètres caractéristiques du système ou du phénomène étudié, à l'aide d'outils du type détection/estimation/classification. Il s'agit par exemple d'estimer les modes de vibration d'une structure ou d'une machine pour en assurer la surveillance et le contrôle, ou d'estimer la dynamique d'une cible pour en effectuer la poursuite ; ou encore de détecter les contours ou les régions dans une image, afin d'y localiser des formes ou des objets, comme par exemple une tumeur dans un organe, ou un obstacle dans l'environnement d'un robot mobile.

– « Interpréter et reconnaître » : c'est la dernière étape du traitement qui correspond à une phase d'interprétation des

Ceci explique l'importance accordée au développement de logiciels de CIAO (conception intelligente assistée par ordinateur) pour la conception et la mise au point de la chaîne de traitements, l'intelligence artificielle intervenant ici au niveau du pilotage de ces traitements. D'autre part, la mise en œuvre de ces méthodes nécessite des temps de calcul qui sont souvent incompatibles avec les contraintes de temps réel imposées par les applications. Une solution consiste alors à concevoir des circuits spécifiques.



De l'observation terrestre par le satellite Météosat (a) à l'interprétation de l'image transmise (b) en terme de carte météorologique (c). (Clichés Météo France)



optiques cohérentes par exemple, de transmettre les sources à débit réduit et sans perte d'information, grâce aux techniques de codage et de compression, et éventuellement d'assurer la confidentialité de cette information grâce à la cryptographie.

– « Filtrer et synthétiser » : c'est l'étape de mise en forme des signaux et des images au sens de la réduction (on parle aussi de filtrage) des bruits, de la restauration des informations (pour pallier les déformations introduites par les instruments de mesure ou le milieu de propagation), de la reconstruction 3D des objets, et enfin de la création de signaux (parole, musique) ou d'images synthétiques à partir de modèles.

Les deux derniers chapitres concernent l'extraction de l'information utile. Cette extraction est tout d'abord composée d'une phase d'exploitation des signaux et des images, de type essentiellement numérique et algorithmique,

signaux et des images, en vue d'une prise de décision puis d'une action. Elle est fortement imbriquée avec la précédente qu'elle vient compléter dans un but de reconnaissance, de classification et, de manière plus générale, de compréhension automatiques des phénomènes étudiés. C'est le cas par exemple de la reconnaissance de la parole, de l'écriture manuscrite, de caractères dactylographiés (saisie automatique de données pour les informatiser), de signature sur un document (chèque, bordereau), de signature acoustique pour l'identification de navires, du visage ou d'empreintes digitales pour l'authentification d'un individu, et aussi de la vision artificielle (ou vision par ordinateur) dont seront dotés les futurs robots mobiles d'intervention.

Bien entendu, les méthodes de TDSI permettant de réaliser les traitements mentionnés ci-dessus sont de plus en plus nombreuses, diverses et complexes.

adaptés à des tâches bien précises comme la reconnaissance de mots par exemple, ou à utiliser de nouvelles architectures de machines (processeurs vectoriels, calculateurs parallèles, réseaux connexionistes).

En conclusion, de l'observation à la prise de décision, via une approche intégrée, donc pluridisciplinaire, le traitement du signal et de l'image est au service d'une grande variété de champs d'application comme en témoignent les articles de ce numéro.

■ Gérard Fournier, chargé de recherche au CNRS, chargé de mission au département Sciences pour l'ingénieur.

Le Traitement du Signal : une discipline « ancillaire » ?

■ Bernard Picinbono

Dans son livre « De la Physique avant toutes choses », A. Abramovitch évoque « la divine surprise de voir le phénomène prévu par le calcul apparaître là où on l'a prévu, tel qu'on l'a prévu », et parlant d'une expérience particulière indique quelques pages plus loin que l'observation du phénomène s'est faite par « un renversement du signal », conformément aux prévisions. Ainsi le signal, bien mis en forme et correctement observé, est l'intermédiaire obligé de la plupart des grandes découvertes expérimentales. Pour s'en convaincre, il suffit d'observer les monumentales expériences de physique des particules où la complexité des appareils de mesure est un passage indispensable pour obtenir des résultats significatifs. Dans cette perspective, le traitement du signal, aussi sophistiqué soit-il, apparaît comme un ensemble de moyens théoriques et techniques au service d'une autre discipline (ancilla, servante).

Comme en écho à cette vision, P. Aigrain, un autre grand physicien français, préfacant un ouvrage sur le traitement numérique du signal écrit : « Lorsque Kepler tira les lois du mouvement des planètes des séries d'observation de son beau-père Tycho-Brahé, c'est à un véritable traitement numérique du signal qu'il se livrait ». Ici aussi le traitement du signal est au service d'une autre discipline, l'astronomie, et apparaît de plus comme une méthode à la fois très ancienne et indispensable dans toute recherche expérimentale.

Si tout expérimentateur fuit du traite-

ment du signal, même sans le savoir ou le dire, peut-on alors parler d'une spécificité ou d'une existence comme discipline autonome ? Avant de répondre à cette question, on peut immédiatement noter que le traitement du signal n'est pas isolé dans cette situation. Le plus bel exemple est donné par les mathématiques dont personne ne conteste la spécificité et l'autonomie, mais qui pourtant sont aussi au service des autres disciplines et souvent bien au-delà d'une simple technique. Ainsi la liste est longue de recherches purement mathématiques suscitées par des questions provenant de leur usage dans d'autres disciplines.

De la grandeur du service

Une discipline ne peut que se réjouir d'être au service de nombreuses autres, même si elle a parfois le sentiment de perdre sa spécificité. Il suffit de parcourir le sommaire de ce numéro pour se convaincre de la multiplicité des champs d'application du traitement du signal. On peut même ajouter que le chemin qui va du développement théorique aux applications n'est jamais tracé d'avance : de même que les spécialistes de théorie des groupes ne savaient pas qu'ils forgeaient des outils indispensables à certains développements de la mécanique quantique, de même ceux qui ont développé la théorie des codes ignoraient qu'ils s'appliqueraient dans un produit d'usage courant tel que le disque compact. Et l'on pourrait sans peine multiplier les exemples, au risque de lasser le lecteur. La diffusion du traitement du signal dans de vastes secteurs de l'économie peut se mesurer au nombre des offres d'emploi exigeant des

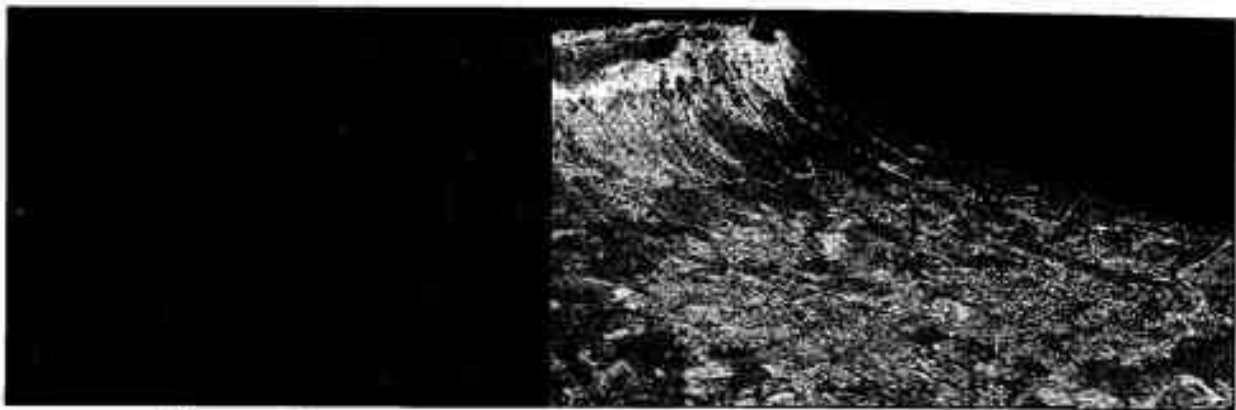
compétences dans ce domaine. En général, on ne recherche pas des spécialistes pour contribuer uniquement au développement de leur technique, mais surtout pour diffuser et appliquer leur savoir-faire dans de vastes projets aux finalités très variées. Mais ceci n'épuise pas la réalité du traitement du signal.

Le traitement du signal comme discipline

Plutôt que de tenter de définir l'objet et les frontières de cette discipline, il paraît préférable d'indiquer les principales caractéristiques de ce qu'on appelle une discipline et de voir comment elles s'appliquent au traitement du signal.

On peut tout d'abord parler d'une communauté de ceux dont l'activité principale est centrée sur le traitement du signal. En matière de recherche, cette communauté existe incontestablement. À l'échelon français, on la trouve au CNRS, dans les établissements d'enseignement supérieur et dans de grands organismes de recherche nationaux. La communication interne s'établit par le biais de grands journaux scientifiques spécialisés en traitement du signal et par de grands congrès internationaux. La communauté internationale est aujourd'hui suffisamment vaste pour réaliser ce jugement par les pairs à la base de la qualité des grandes publications.

On peut parler ensuite d'un langage forgé par un enseignement rodé aux normes internationales. L'enseignement du traitement du signal sous toutes ses variétés est en France très largement assuré au niveau des maîtrises, des éco-



Représentation graphique (à gauche) et projection perspective (à droite) d'une vue aérienne sur un modèle numérique de terrain restauré par reconstruction tridimensionnelle à partir de fusion d'images, issues d'un couple stéréoscopique, observées avec une résolution de 10 m. (TIM 3-IMAG, UJF-INPG Grenoble).

les d'ingénieur et du DEA.

On peut enfin parler d'un *état d'esprit*. Les recherches en traitement du signal s'inspirent largement des résultats d'autres disciplines mais leur impriment une marque spéciale. Prenons par exemple la théorie du signal. Dans le cas déterministe, l'analyse de Fourier est un des outils de base, mais tous les résultats sur la transformée de Fourier discrète et les algorithmes rapides sont directement issus de l'essai de travailler si possible en temps réel, et donc d'augmenter par tous les moyens la vitesse des calculs. De même, dans le cas des signaux aléatoires, l'esprit traitement du signal introduit une perspective nouvelle par rapport à une vision purement mathématique. Par exemple, le problème de la prédiction, capital dans bien des domaines, peut être posé abstraitement, mais tous les travaux sur les algorithmes de prédiction rapides et adaptatifs s'inspirent directement de l'esprit traitement du signal.

Une discipline en évolution

Il serait très intéressant de donner quelques idées sur les principales évolutions qui ont jalonné l'histoire du traitement du signal au cours des trente dernières années. Les contributions constituant ce numéro donnent des indications sur l'état actuel, mais ne permettent pas toujours d'apprécier les transitions qui ont permis d'y arriver. Disons simplement que, comme dans toutes les disciplines, l'évolution s'est faite soit par accumulation patiente de résultats contribuant à une nouvelle vision des choses, soit par des transitions marquées. A ce dernier titre, on peut men-

tionner que l'invasion du traitement numérique a entièrement transformé le paysage. Ainsi les concepts de récursivité, à la base de tant d'algorithmes de traitement du signal, ou d'adaptativité ne pouvaient guère se concevoir lorsque le signal se présentait sous forme d'une fonction continue du temps. Mais plus récemment bien des idées nouvelles ont surgi, et parfois il est encore trop tôt pour prévoir si elles tiendront toutes leurs promesses dans l'avenir. De façon non limitative, on peut mentionner l'apparition des réseaux neuronaux, des ondelettes, de la morphologie mathématique ou des statistiques d'ordre supérieur.

L'évolution s'est accompagnée d'une démultiplication des centres d'intérêt. On peut ainsi évoquer les relations avec le *traitement des images*. Au départ le concept d'image était relié au domaine de l'optique, mais on avait depuis longtemps noté les nombreuses analogies entre un système optique et un système agissant sur des signaux temporels. Ceci a permis de transposer très rapidement à l'optique toute une série de méthodes comme celles de filtrage pour l'extraction dans un bruit. Puis l'image est devenue un objet autonome et la discipline traitement des images s'est renforcée en développant ses propres méthodes qui à leur tour viennent utilement enrichir celles appliquées en traitement du signal par un incessant mouvement d'aller et retour.

Une discipline carrefour

Il apparaît à l'évidence dans les textes qui suivent que le traitement du signal n'est pas une discipline fermée par des

frontières infranchissables. Comme il est difficile d'isoler un signal sans parler des systèmes qui le traitent, les liens avec l'automatique (*science des systèmes au sens large*) et avec de larges secteurs de l'informatique sont évidents. De même, un signal servant souvent à véhiculer une information pertinente, la théorie de l'information et l'ensemble des sciences de communication ont un lien privilégié avec le traitement du signal. Enfin comment ne pas mentionner toutes les interactions avec de nombreuses branches de la physique. Ainsi les communications optiques conduisent rapidement à s'interroger sur le bruit quantique et à étudier son influence sur les récepteurs optimaux de transmission.

Après ce panorama beaucoup trop succinct, souhaitons au lecteur une promenade instructive dans tout ce que vont lui présenter les pages qui suivent.

■ Bernard Picinbono, directeur général de l'Ecole supérieure d'électronique.

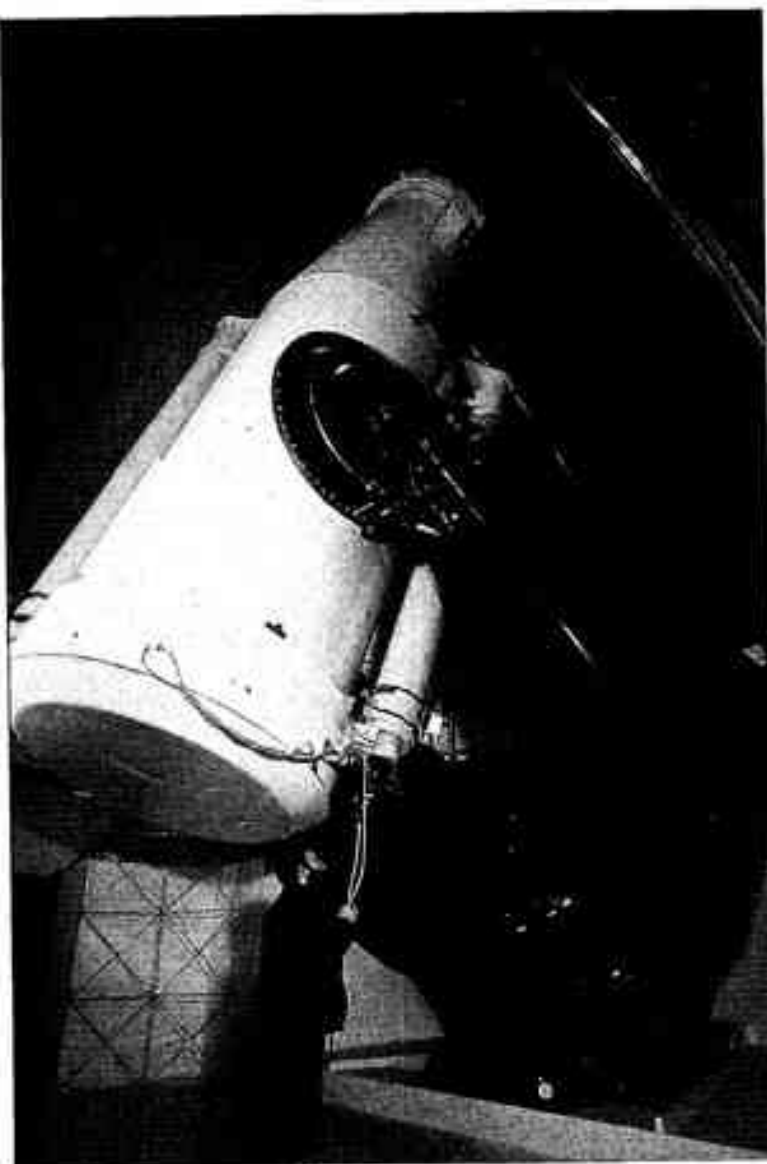
CAPTEUR ET MESURER

Capter et mesurer constituent la phase d'acquisition de l'information qui, quelle qu'en soit la forme, est bien davantage que la simple observation passive.

L'information à acquérir est en fait un phénomène physique, chimique ou biologique, dont l'interprétation est souvent très complexe. Le signal utile peut être soit émis directement par le système à observer (par exemple le rayonnement infrarouge émis par une étoile), soit résultant d'une excitation externe dont on a la maîtrise comme c'est le cas avec les mesures par ultrasons, soit enfin mixte, comme en imagerie par résonance magnétique (IRM), où l'on détecte des basculements de moments magnétiques internes sous l'action d'un champ extérieur.

En pratique, le spécialiste du traitement du signal ou de l'image prend en charge de l'information disponible au niveau du capteur. Les articles de ce dossier ne donnent qu'une faible idée de la richesse des types de capteurs exploitables et le choix de l'un d'eux est une décision capitale pour la suite, puisque toute information déjà perdue à ce niveau ne pourra jamais être restituée.

Supposé bien choisi, le capteur délivre souvent un signal sous la forme d'une tension. Si tel n'est pas le cas, on s'empresse de le faire par diverses techniques : ainsi, une



Le télescope de Schmidt du plateau de Calern (Alpes-Maritimes). (© CNRS-CERGA).

photographie aux sels d'argent sera transposée en grandeur électrique par une caméra vidéo. Mais ces informations sont encore en général sous la forme analogique : la grandeur électrique varie

de manière continue dans le temps. La phase d'acquisition comporte la transformation de ces signaux analogiques en signaux numérisés, c'est-à-dire échantillonnés dans le temps et quantifiés en

amplitude. Le signal temporel est alors codé et s'exprime en octets prêts à être traités par des moyens informatiques après une mise en forme adéquate (le "formatage"). Pour les images, un découpage analogue conduit à traiter des éléments appelés pixels ("picture element") avant de traduire ceux-ci en octets. La phase d'acquisition est terminée une fois transmise l'information vers le calculateur aval.

On conçoit qu'il ne peut exister d'acquisition pure, c'est-à-dire totalement neutre vis-à-vis de l'information. Le capteur ne s'intéresse qu'à un aspect limité de la réalité, même sur le paramètre qu'il est censé suivre – la température, l'intensité d'un son, le pH... – il n'est pas lui-même parfait car il favorise telle ou telle gamme, et enfin il recueillera des signaux parasites sans pouvoir les discriminer, en y ajoutant même son bruit propre appelé bruit de mesure.

Toujours par comparaison anthropomorphique, on voit se poser le problème de l'observation des volumes (tomographie) qui nécessite au moins deux capteurs dont le traitement est coordonné. Plus généralement, la fonction de localisation, que ce soit de sources sonores ou de robots mobiles autonomes, nécessite de faire appel à un ensemble de capteurs. Ainsi, la localisation des sources de bruit dans un moteur automobile, ou la détection, la localisation, et le suivi de bancs de poissons ou de sous-marins, s'effectuent à partir d'un réseau de capteurs appelé aussi antenne acoustique (ou encore sonar, pour le

deuxième type d'application). De même, dans le cas de la surveillance aérienne ou des systèmes de perception dont seront dotés les futurs robots mobiles, divers types de capteurs sont utilisés délivrant chacun une information qui est exploitée à travers une étape de fusion de données (fusion multicapteur).

Très vite, on découvre le réel problème du volume de données disponibles mais pas nécessairement utiles. Une image d'astronomie se compose d'un milliard de pixels. Un examen médical par IRM donne lieu à deux millions de pixels qu'il faudra stocker pendant dix ans. C'est pourquoi il est tentant, dès la phase d'acquisition, de faire un prétraitement avec les méthodes classiques décrites par ailleurs (transformation de Fourier, ondelettes...) pour extraire dès cette phase l'information utile.

Sous-jacents se trouvent évidemment de grands progrès technologiques pour faire l'acquisition la plus ra-

pide possible – on parlera de temps réel – de manière à pouvoir suivre, en particulier, des mouvements. Cette rapidité s'accroît grâce à une optimisation de l'architecture de l'interface (multiplexage) associée à une amélioration des logiciels de traitement dont l'algorithme de Cooley et Tuckey, pour la transformée de Fourier, est l'illustration la plus classique.

Le lecteur sera peut-être perplexe devant la diversité des approches des articles proposés dans ce chapitre: elle montre qu'au-delà de certains aspects théoriques (théorème de Shannon par exemple) et de certains aspects pratiques de réalisation d'interfaces, l'acquisition de l'information utile ne peut être traitée qu'en interaction forte avec la transmission et surtout l'interprétation. C'est une illustration du proverbe: "Bien mal acquis, ne profite jamais".

Georges-Michel Chevallier,
professeur des universités



Dispositif de microscopie électronique avec visualisation de la surface du matériau analysé (Laboratoire de technologie des surfaces © CNRS-Ph. Pailly).

Percept et la fusion multicapteur

Une plate-forme robotique originale a été développée à des fins de vérification expérimentale de théories émergentes en fusion multicapteur.

— Olivier Dessoude,
Bertrand Zavidovique

Les recherches actuellement menées sur l'autonomie des robots font d'autant plus ressortir l'importance des problèmes de perception que l'on envisage leur intervention dans des environnements non contrôlés, voire hostiles. Une gestion dynamique des capteurs et des traitements de données est alors nécessaire pour maîtriser la complexité des fonctions de perception, les incertitudes et les changements de contexte. Dans l'état actuel des modèles envisageables, ces objectifs de robustesse requièrent au moins un traitement de données « efficace », dont découlera donc un élément de décision, pour chaque tâche envisagée (détection, localisation, classification) et pour chaque type de conditions, un mécanisme de décision reconnaissant les changements de conditions, coordonnant les traitements appropriés, et les paramétrant correctement.

De façon schématique, le problème de la perception suppose donnés les modèles de l'univers et de son évolution, des capteurs, des traitements et de leur contrôle, des performances désirées.

Associer des techniques diverses

La plupart des systèmes actuels exploitent des résultats connus d'automatique, dont deux principaux défauts vont se manifester sur les systèmes futurs : un manque de souplesse et le mépris d'une question préalable à l'optimisation d'une commande, celle tout simplement de la faisabilité de la tâche visée. Un système complet de contrôle perceptif aura donc recours à des techni-

ques d'intelligence artificielle de représentation de l'univers (objets et attributs), de contrôle proprement dit (planification, contrôle symbolique) et d'intégration des résultats de plusieurs traitements (blackboard), associées à des techniques intelligentes de prise de décision ou de traitement du signal plus quantitatives, destinées au traitement de l'incertain (contrôle stochastique, bayésien ou non).

Un système avancé de perception

L'avancement relatif de la théorie en la matière fait donc que le Laboratoire « système de perception » s'est doté d'une plate-forme multicapteur, *Percept*, support privilégié indispensable d'une démarche expérimentale complémentaire, qui préfigure les systèmes de perception autonomes du futur. *Percept* se présente comme une plate-forme robotique pouvant supporter un ensemble évolutif de capteurs (caméras, antenne acoustique, télémètres) et a fait l'objet d'un brevet. Son axe central, véritable colonne vertébrale, conduit à la fois les signaux issus des capteurs et un réseau de communication interne. Sur cette colonne sont montés des actionneurs rotatifs supportant les capteurs, contrôlés par des processeurs locaux. Le tout repose sur un socle qui renferme une station de travail, répartissant les ordres reçus, et qui peut recevoir des automates programmés ou câblés de traitement. Des choix technologiques ont amené une grande sophistication des aspects électro-mécaniques (asservissement réparti), des capteurs disponibles (capacités de traitement locales) ou de l'informatique de contrôle (système d'exploitation temps réel Chorus). Ainsi, pour son utilisateur, *Percept* se comporte comme une banale station, lui permettant de contrôler en boucle ouverte ou fermée un parc de capteurs et de traitements et ses multiples degrés de liberté.

Le premier problème abordé est celui de la gestion bayésienne d'une fenêtre d'observation, mais la plate-forme doit ensuite permettre de mener des expérimentations au réalisme accru, faisant



La plate-forme expérimentale *Percept*.

appel tant aux ressources de la robotique, du traitement du signal et de l'intelligence artificielle, qu'à terme au savoir-faire de spécialistes d'un domaine d'application particulier.

Percept or the necessity of experimental verification of emerging theories on multisensor fusion — The study of perception, an essential function for autonomous robotics, has led to new developments in the fields of modelization, stochastic data processing, and control. Percept, the platform described here, is an experimental set-up, which has become necessary in order to validate these techniques in a realistic environment.

— Olivier Dessoude, ingénieur de l'armement, Établissement technique central de l'armement, Centre de recherches et d'études d'Arcueil, Laboratoire « système de perception », 16 bis, avenue Picot de la Côte d'Or, 94114 Arcueil Cedex.

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

Pour observer l'intérieur de l'océan

L'intérieur de l'océan peut maintenant s'observer en tomographie acoustique. Ceci n'est possible que par une totale maîtrise des mesures d'écart temporels des signaux qui s'y propagent.

Geneviève Jourdain

Pour observer l'océan et comprendre par exemple ses interactions avec le climat, il faut connaître la vitesse du fluide, sa densité, sa température, à des échelles de temps allant du jour à la décennie, et à des échelles d'espace allant de 10 à 10 000 km, afin de déterminer les déplacements de masses d'eau et les flux de chaleur.

Les premières méthodes d'investigation sont celles in situ : bathysondes ou courantomètres, flotteurs de surface. Un deuxième type d'observation, l'observation satellitaire, fournit la topographie de surface (après soustraction du géoïde).

La tomographie est une méthode complémentaire d'observation globale de l'intérieur de l'océan, basée sur des mesures de retards de propagation de l'onde acoustique dans l'océan. L'onde acoustique est le type d'onde qui se propage le mieux dans l'eau ; cette propagation se fait par multiples trajets entre l'émetteur et le récepteur par suite de la non-homogénéité en profondeur de la vitesse de propagation de l'onde (Fig. 1). De la mesure des retards entre les différentes arrivées de l'onde, on peut déduire les propriétés physicochimiques (température, salinité) du volume d'océan traversé (d'où le nom de tomographie).

Measurement of time delays for ocean acoustic tomography - Ocean acoustic tomography is a global method of investigation of the ocean. It is based on the measurements of travel times of acoustic waves transmitted from emitters to receivers through multiple acoustic paths. Signal processing consists of choosing the best emitted signal, and performing very precise measurements of the time delays. This last point analysed here leads to a large improvement of the method: some arrival times can be now used in the inverse techniques to estimate the physical parameters of the ocean.

Proposée à la fin des années 70 par une équipe américaine (Munk et Wunsch), la faisabilité de la tomographie acoustique a été démontrée par plusieurs séries d'expériences depuis la première en 1981. L'intérêt principal est que cette méthode nécessite relativement peu d'instruments : typiquement un volume d'océan de 300 km x 300 km de surface peut être sondé à l'aide d'une dizaine d'instruments émetteurs/récepteurs.

Mesurer des écarts de temps

Le principe de la mesure consiste à faire une identification active de la réponse du canal de transmission que constitue le volume traversé par l'onde. Les signaux utilisés sont large bande ($W = 100$ Hz autour de 400 Hz ; modulation biphase par une séquence de longueur maximale de durée T de l'ordre de 10 s). L'intercorrélation du signal reçu avec une copie du signal émis autorise une première séparation des trajets et permet de gagner un rapport signal à bruit de l'ordre de 30 dB (si $WT = 100$). Souvent l'émission (et donc l'intercorrélation) sont répétées (~ 20 fois) et on obtient alors une première allure brute

de la réponse cherchée du canal, au cours du temps (Fig. 2a).

Il faut alors améliorer cette image et extraire les paramètres intéressants : dans les pics apparents sont confondus des retards très proches, non mis en évidence dans le premier traitement. De nouvelles méthodes, dites de « super résolution temporelle », basées sur la théorie de l'estimation non linéaire de paramètres, permettent d'identifier au sein d'un paquet des trajets sous-jacents. On peut de plus, utiliser les différentes réponses successives de la figure 2a pour améliorer l'estimation.

La figure 2c donne le résultat final : deux nouveaux trajets sont décelés, et peuvent être pris en compte dans le processus global d'inversion des données, ce qui permet d'améliorer l'estimation des paramètres physicochimiques du milieu.

Améliorer la connaissance de l'océan

Les performances de la tomographie sont d'abord liées à l'instrumentation (positionnement précis des émetteurs/récepteurs, ≤ 1 m ; chronométrie fine, avec une précision de l'ordre de la milliseconde sur 1 an ; enregistrement de grandes quantités de données in situ...), ainsi qu'aux méthodes d'inversion finale des données.

La part du traitement du signal est aussi très importante : choix du signal à émettre, choix des traitements temporels et spatiaux in situ, extraction et suivi des paramètres.

Enfin, ceci doit être mené de pair avec la connaissance et la modélisation de la propagation acoustique en milieu hétérogène. L'avancée conjointe de toutes

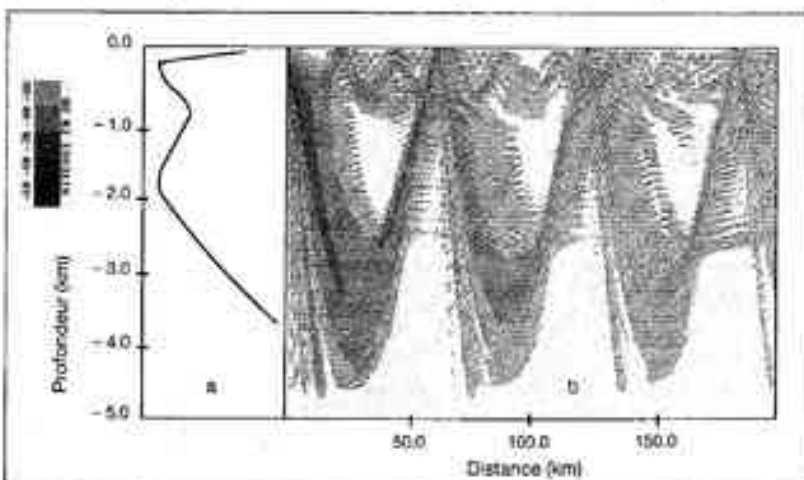


Fig. 1 - Propagation acoustique sous-marine : le profil de célérité (a) entraîne l'existence de zones de convergence et de zones d'ombre, (b) à partir de l'émission faite en un point, l'onde sonore se propage par plusieurs trajets.

Imagerie acoustique pour machines silencieuses

En évoluant de la simple écoute du bruit à la vision d'images acoustiques, l'acousticien se met à la portée du concepteur de machines.

□ Bernard Béguet

Concevoir des objets peu bruyants est devenu un impératif dans la construction électromécanique (normes pour automobile, spécifications pour machines industrielles). La réduction des niveaux sonores n'est cependant pas aisée, compte tenu du fait que l'énergie acoustique est infime par rapport à l'énergie mécanique en jeu, et même faible par rapport à l'énergie vibratoire de la structure. Pour aider l'industriel dans la conception de machines silencieuses, la panoplie des outils expérimentaux a considérablement évolué avec l'arrivée des techniques d'imagerie, ou holographie acoustique de champ proche.

Une antenne permet d'estimer le champ sonore...

La mesure dans une zone proche de la machine considérée permet d'opérer en site industriel, en s'affranchissant des autres bruiteurs. En contrepartie, cette zone est perturbée par des ondes, dites évanescentes ou non rayonnantes, provoquant des suppressions locales. L'exemple du diapason qui n'est audible que dans une zone très proche malgré des niveaux vibratoires élevés est illustrant de ce propos. L'obtention d'informations quantitatives nécessite alors de faire des mesures en un ensemble de points, par des réseaux de microphones appelés antennes acoustiques. Le traitement de ces données permet de quantifier le bruit de la machine et d'en donner une « image » visant à localiser les sources sonores prépondérantes. La quanti-

fication couvre l'estimation de la puissance totale émise, obtenue par une technique intensimétrique, et sa répartition spatiale ou diagramme de directivité. La détermination de celui-ci est basée sur le principe de Huyghens.

En utilisant des géométries particulières (plan, cylindre...), on peut réaliser cette opération en décomposant le champ acoustique sur la base d'ondes associées à la géométrie de mesure.

Prenons l'exemple d'une antenne plane. La sommation des capteurs de l'antenne permet de sélectionner l'onde plane parallèle à celle-ci et ainsi d'esti-

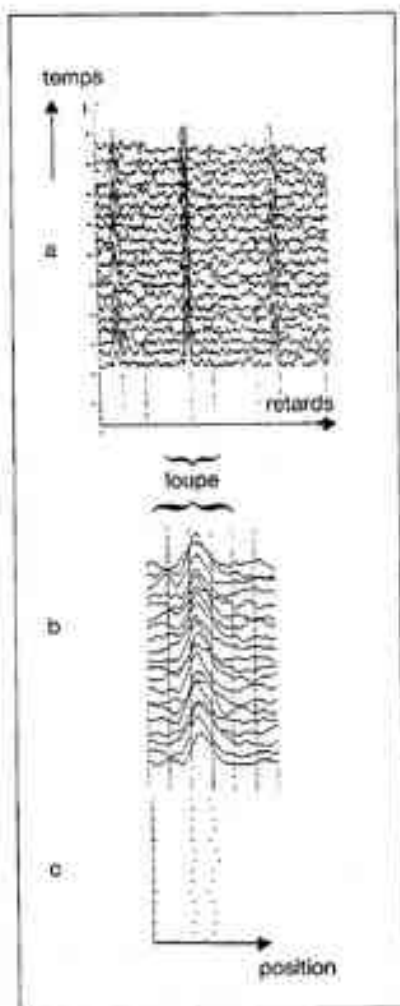


Fig. 2 - Extraction de retards proches : en (a) la réponse du canal acoustique montre trois trajets principaux (pics). En fait, au sein d'un pic se trouvent plusieurs trajets non résolus. On a isolé le deuxième pic (b) et on cherche à identifier au mieux, à l'intérieur, des trajets multiples. En optimisant un algorithme d'estimation non linéaire, on met en évidence deux trajets dont les positions au cours du temps sont données en (c).

ces techniques doit permettre une véritable mise en œuvre de la tomographie acoustique océanique, en même temps que l'amélioration de notre maîtrise et connaissance de l'océan.

Geneviève Jourdain, professeur à l'École nationale supérieure d'ingénieurs d'électiciens de Grenoble, directeur du Centre d'études des phénomènes aléatoires et géophysiques (URA 346 CNRS), Institut national polytechnique de Grenoble, BP 46, 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex.

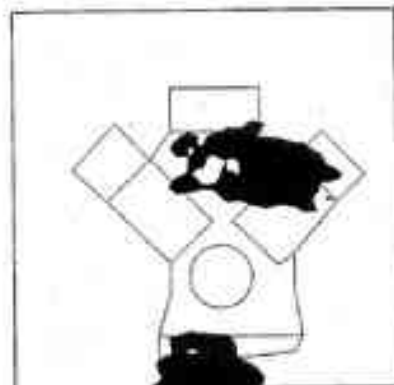


Fig. 1 - Localisation des sources de bruit sur un moteur automobile.

mer le champ lointain sur sa normale. La pression rayonnée dans d'autres directions est obtenue en introduisant des retards entre les capteurs de l'antenne. En théorie du traitement du signal, ces opérations ne sont autres qu'une transformée de Fourier spatiale des signaux.

...et un logiciel de localiser les bruits

Une fois le niveau sonore quantifié, le logiciel de traitement permet la localisation des sources de bruit. Une première image, représentant la répartition des niveaux de pression sonore mesurée sur l'antenne peut être visualisée. Pour localiser plus précisément les sources de bruit (rendre l'image plus nette), une distribution de sources sur la surface de la machine est recalculée. Le traitement des données, analogue à la notion de

Acoustic imagery for silent machines - The on-site quantification of noise emitted by a machine, and the generation of an image representing the sources of this noise are permitted by the use of a nearfield acoustic imagery. This imagery is based on data acquisition with an acoustic antenna and the dedicated processing. This technique is then widely used to decrease the noise level of machines.



Fig. 2 - Mesure à l'aide d'une antenne acoustique du bruit émis par le TGV.

focalisation en optique, suit les séquences suivantes :

- décomposition sur la base d'ondes de la géométrie de mesure par transformée de Fourier spatiale,
- séparation des ondes propagatives et évanescentes,
- rétropropagation de chaque onde vers le bruiteur,
- réaddition de toutes ces ondes pour chaque point de la structure par transformée de Fourier inverse.

En résumé, l'imagerie acoustique permet de trier la part rayonnante des champs acoustiques et de donner une image des sources de bruit permettant la localisation des zones émettrices prépondérantes. Ces images sont un support privilégié d'échanges entre l'acousticien et le concepteur car ce dernier est à même de les interpréter dans sa logique de conception, et de définir des actions de réduction appropriées.

□ Bernard Béguet, ingénieur ECAM, directeur de la Division études, METRAVIB R.D.S., 64, chemin des Mouilles, BP 182, 69132 Ecully Cedex.

Les signaux de la parole ne sont pas que du son

L'homme parle, et ce qu'enregistre le microphone est simplement « le signal de parole ». Par quel processus ce signal est-il produit ? Pour le comprendre, il nous reste à saisir et à traiter beaucoup d'autres signaux en amont du son.

□ Tahar Lallouache,
Bernard Teston

Comment avoir accès au comportement des articulatoires, sachant que le langage est d'abord une gestuelle sonore qui, chez l'homme - contrairement à la plupart de ses autres comportements moteurs -, se présente de manière fortement internalisée ?

La capture du mouvement

Le plus inaccessible fut paradoxalement le plus tôt observé : dès 1847 le miroir de Garcia permit à tout un chacun de voir les cordes vocales en vibra-

tion. Songer que de nos jours encore, il n'est pas courant de pouvoir disposer de caméras vidéo rapides qui atteignent des cadences suffisantes (5 000 à 10 000 images/s) pour pouvoir visualiser précé-

Speech signals are not only sounds - Vocal fold behavior has been observable since the last century. Technical evolutions (photography, film, radiography, EMG...) have permitted increasingly fine analysis of articulator movements. The observation of speech remains, nevertheless, a difficult task, and all the more so since the signals broadcast in speech are optical as well as acoustic.



Fig. 1 - Traitement d'images pour extraire les paramètres du visage parlant : ici, les lèvres et les dents (d'après T. Lallouache, 1990).

sément ce phénomène : la source vocale. Les lèvres, les plus visibles, furent d'abord dessinées - puis photographiées et cinématographiées - pour servir à l'enseignement des sourds-muets.

Et puis on les oublia, semble-t-il, jusqu'à ce qu'un regain d'intérêt se fasse jour, dans les années 60 aux États-Unis, pour mesurer leurs formes. Mais aujourd'hui encore on peut dire que, pour les grandes langues du monde, il a été tourné davantage de films radiocinématographiques que de films scientifiques sur les lèvres (Fig. 1).



Fig. 2 - Explorateur du voile du palais (d'après P. Rousselot, 1924).

Il existe actuellement sur le marché et dans les laboratoires de nombreux systèmes pour suivre en temps réel les mouvements des articulatoires. Certains sont parfois simplement les héritiers, plus sophistiqués, de machines d'âge respectable (Fig. 2). Celles-ci étaient généralement affublées d'un nom en -graphie : l'ancêtre en est le kymographie de Ludwig perfectionnée par Marey (intensivement utilisée par l'abbé Rousselot dès la fin du XIX^e) ; et l'on construit encore, ici ou là, différents transducteurs pour suivre la mandibule, les lèvres, et même le voile du palais, comme c'est le cas du vélotrace.

La radioscinématographie, qui a longtemps été la plus globale des méthodes d'observation en phonétique, est maintenant de plus en plus « surveillée » : l'exposition aux rayons X reste dangereuse. Le suivi en 3D, par des micro-luiscanux (système microbeam mis au point par les Japonais), de petites pastilles collées sur les articulatoires, ne peut donner tout le profil du conduit vocal ; il en va de même pour les méthodes magnétiques qui sont actuellement en concurrence avec ce système. Sur la dimension horizontale, l'électropalatographie (EPG) délivre en principe la géographie des points de contact de la langue sur le palais (Fig. 3). Reste à observer les cordes vocales par endoscopie, grâce aux fibres optiques, et à faire simultanément la prise de vue du visage du locuteur pour disposer à peu près d'une vue d'ensemble de l'« orchestre de la parole ».

Dans l'avenir, une méthode d'observation complète en 3D du conduit vocal – nécessaire pour pouvoir en calculer l'acoustique – sera sans doute la RMN (résonance magnétique nucléaire), lors-

qu'une nouvelle génération d'appareils pourra suivre les cadences nécessaires pour la parole, actuellement observée statiquement. En attendant, l'échographie donne des images en mouvement qui sont exploitables, en particulier pour connaître les formes transversales de la langue, mais sans pouvoir délivrer la configuration des parois internes de tout le conduit. Il faut donc se rendre à l'évidence : observer la parole reste une tâche difficile qui nécessitera encore la mise au point d'un matériel spécialisé, et cela plus encore que pour d'autres activités humaines.

Écouter avec les yeux

Nous terminerons ce tour d'horizon sur l'acquisition et le traitement des signaux non sonores dans la production de la parole, en rappelant que tous les signaux qui proviennent des systèmes périphériques et centraux ne sont pas, bien entendu, que des signaux de mouvement. Physiquement, plusieurs phénomènes aérodynamiques qui se produisent dans le conduit vocal – et qui donnent les conditions nécessaires de l'émission des sons – peuvent être enregistrés avec des sondes de pression et de débit. Physiologiquement, l'activité électrique des muscles (EMG) peut être captée par des électrodes. Et à plus haut niveau encore, le traitement des signaux électroencéphalographiques (EEG), et maintenant magnétoencéphalographiques (MEG) – mieux que la tomogra-

phie à émission de positons (PET-SCAN) – permet d'avoir accès à l'activité cérébrale en temps réel. On attend beaucoup de ce dernier domaine pour l'avancement des connaissances en production. Mais déjà pour la perception, on vient d'assister à une première, réalisée par des chercheurs finlandais : la mise en évidence d'une activité spécifique de l'aire auditive lorsque les sujets doivent intégrer un stimulus auditif et un stimulus visuel, pour prendre une décision phonémique. C'est un type de décision que nous sommes amenés à prendre tous les jours, sans le savoir, lorsque nous écoutons notre interlocuteur tout en fixant son visage : et c'est l'un des atouts majeurs qu'aura le visiophone sur le téléphone, tant il est vrai que les signaux émis dans la parole sont aussi bien optiques qu'acoustiques...

Tahar Lallouache, chercheur à l'Institut de la communication parlée (URA 268 CNRS), Université Stendhal, Domaine universitaire, BP 25 X, 38040 Grenoble Cedex.

Bernard Teston, ingénieur de recherche au CNRS, Unité « parole et langage » (URA 261 CNRS), Institut de phonétique, 29, avenue Robert Schuman, 13621 Aix-en-Provence Cedex.

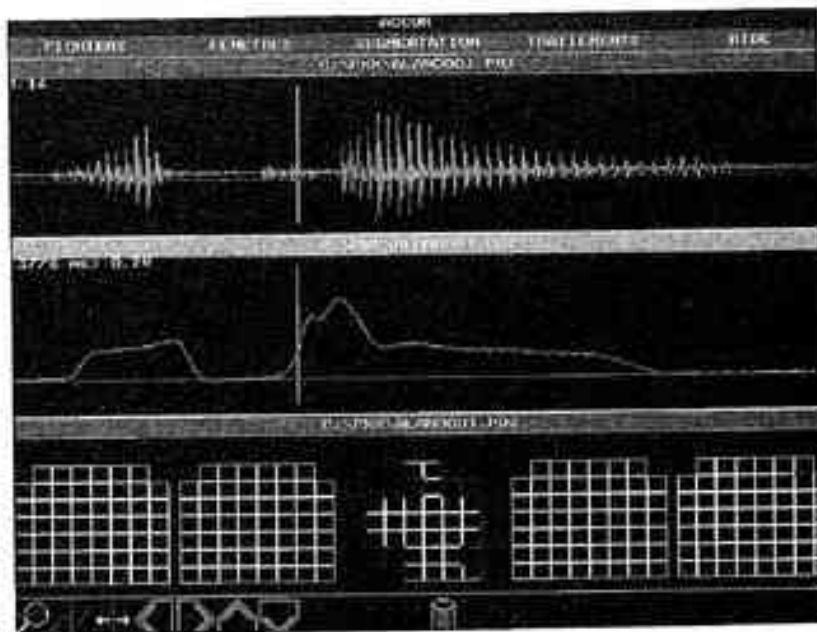


Fig. 3 - Signal de parole « AKLI » avec (en bas) la représentation des zones de contacts de la langue sur le palais et (au centre) le débit d'air aux lèvres. (d'après B. Teston et B. Galindo, 1990).

Tomographie ultrasonore par diffraction et diagnostic médical

Dans l'arsenal des procédés d'imagerie appliqués à l'aide au diagnostic médical, le scanner à ultrasons paraît très prometteur.

■ Bernard Duchêne,
Dominique Lesselier,
Walid Tabbara

Le scanner à rayons X est devenu un outil courant dans la «trousse à outils» du médecin. Il permet de réaliser des images de coupes (tomie) du corps humain. Le procédé présenté ici en est très proche. Les rayons X sont remplacés par des ultrasons (en principe inoffensifs) émis par une source piézoélectrique. L'onde ultrasonore traverse le corps à imager et est reçue par une série de capteurs disposés suivant une ligne dans le plan de la coupe souhaitée, l'énergie mesurée par chaque capteur étant stockée dans un ordinateur. Nous obtenons ainsi une vue de cette coupe. L'étape suivante consiste à faire subir solidement à la source et à la ligne de capteurs une rotation d'un angle donné, puis à mesurer à nouveau l'énergie transmise, d'où une deuxième vue. Après avoir répété cette procédure *n* fois, un algorithme traite les mesures contenues dans les *n* vues pour produire l'image de la coupe. La figure présentée est un exemple typique des possibilités de ce procédé, c'est une coupe d'un cœur de lapin obtenue à partir de 32 vues. La petite cavité est le point d'entrée d'un vaisseau sanguin, la grande correspond à une oreillette. Les dimensions sont reproduites avec fidélité. Quelques minutes suffisent pour obtenir une image au moyen d'un micro-ordinateur.

Pourquoi tomographie par diffraction? Dans un scanner, les rayons X se propagent en ligne droite entre la source et le capteur. Leur longueur d'onde est



Tomogramme d'un cœur de lapin. Cette image est construite à l'aide d'un algorithme de tomographie tenant compte des phénomènes de diffraction importants pour les ondes ultrasonores se propageant dans les milieux biologiques. La résolution sur cette image, obtenue à une fréquence de 2 MHz, est de l'ordre de 0,4 mm.

si petite qu'ils ne sont pratiquement pas déviés par les milieux traversés. Les ultrasons, avec des longueurs d'onde 10^3 à 10^6 fois plus grandes, sont diffusés dans toutes les directions: il y a diffraction. D'où la nécessité d'un traitement différent de celui des scanners pour les mesures.

D'un autre côté, l'utilisation des ultrasons permet d'accéder à des paramètres du milieu traversé, telle la densité ou la vitesse du son, qui dépendent fortement de l'état physiologique de celui-ci. D'où l'application au diagnostic à partir d'une image représentant une carte de l'un de ces paramètres.

■ Bernard Duchêne, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire des signaux et systèmes (UMR 14 CNRS - ESE).

■ Dominique Lesselier, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire des signaux et systèmes (UMR 14 CNRS - ESE).

■ Walid Tabbara, professeur à l'Université Paris VI, directeur adjoint du Laboratoire des signaux et systèmes (UMR 14 CNRS - ESE), Ecole supérieure d'électricité, Plateau du Moulin, 91192 Gif-sur-Yvette Cedex.

Ultrasonic diffraction tomography and medical diagnosis - An ultrasound imaging technique similar to X-ray tomography is presented. Taking into account all diffraction phenomena, it provides accurate images of cross-sections of inhomogeneous objects, in particular in biomedical applications.

L'imagerie par résonance magnétique nucléaire

L'IRM initialement utilisée dans le diagnostic médical étend son champ d'action à d'autres domaines. C'est la conséquence du perfectionnement des techniques et des méthodes.

■ Michel Sauzade,
Geneviève Guillot,
Patrick Gonord

L'imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM) permet de visualiser dans un échantillon la répartition des noyaux et la manière dont ils sont influencés par leur environnement. Pour être mis en évidence, le signal détecté doit être suffisamment intense, ce qui limite pratiquement l'emploi de cette technique aux noyaux des atomes d'hydrogène qui présentent la meilleure sensibilité en résonance magnétique et sont relativement libres de leurs mouvements. Les atomes d'hydrogène entrant dans la composition de petites molécules, et en particulier ceux de l'eau, remplissent bien cette dernière condition. C'est la raison pour laquelle l'IRM est largement utilisée pour l'étude des tissus vivants qui contiennent de 70 à 80 % d'eau.

La technique de résonance magnétique nucléaire (RMN) consiste à faire résonner des noyaux placés dans un champ magnétique statique en les excitant par un champ électromagnétique radiofréquence. Sous l'effet du champ statique, les axes de rotation des noyaux s'alignent suivant l'axe du champ. Une impulsion du champ électromagnétique, dont la fréquence est caractéristique du noyau et de la valeur du champ statique, les entraîne dans un mouvement de précession autour de l'axe du champ. A la fin de l'impulsion, les noyaux continuent leur mouvement de précession tout en revenant lentement à leur position initiale. Pendant cette période de relaxation, ces noyaux émettent un signal dont la fréquence est proportionnelle à l'intensité du champ statique auquel ils sont soumis.

CAPTER ET MESURER

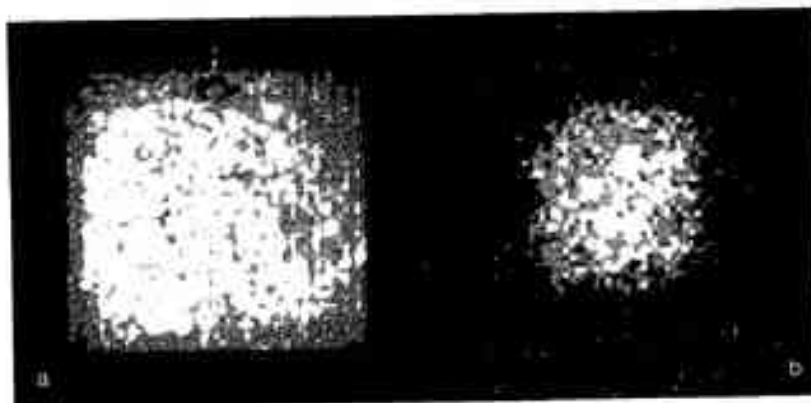


Fig. 1 - Séchage de la pierre de Caen : images RMN de l'eau dans une pierre calcaire de porosité 25 % en cours de séchage. La pierre est un cube de 10 cm de côté. Elle est saturée en eau puis progressivement séchée et examinée par imagerie RMN. Entre les deux images, les conditions d'acquisition sont identiques sauf la saturation en eau $S = 33\%$ (figure a) et $S = 4\%$ (figure b). Les images représentent une tranche d'épaisseur 8 mm, et elles montrent que la répartition de l'eau dans le cube reste quasi uniforme pour $S = 33\%$ tandis que pour $S = 4\%$, l'eau résiduelle est concentrée au centre de la pierre. Ceci s'explique par la valeur relative de S par rapport à la saturation irréductible qui est de l'ordre de 20 %. Pour $S = 33\%$, la phase liquide a une bonne connectivité dans le matériau poreux qui maintient une perméabilité élevée donc une répartition rapide de l'eau malgré l'évaporation à l'extérieur de la pierre. Par contre, en dessous de la saturation irréductible, la perte de connectivité de la phase liquide empêche la réuniformisation de la distribution de l'eau. (La résolution dans le plan de l'image est $2 \times 2 \text{ mm}^2$. Le temps d'acquisition est de 15 minutes environ). (D'après G. Guillot, A. Trokner, L. Darrasse et H. Saint-Jalmes)

La faible intensité du signal de RMN ($\approx 10^{-22} \text{ W par nm}^3$) limite la résolution spatiale et conduit à des temps d'exposition relativement longs. Toutefois, les progrès accomplis ces dernières années par l'adoption des nouvelles méthodes d'imagerie, la réalisation d'une instrumentation extrêmement complexe et l'introduction de traitements numériques de données et d'images particulièrement puissants ont permis d'améliorer les performances de l'IRM et d'étendre ses applications à de nouveaux domaines.

Les photos présentées illustrent deux applications récentes : l'une a trait au séchage d'un matériau poreux, l'autre se rapporte à l'étude d'insectes. Il ne fait aucun doute que les améliorations encore possibles étendront le champ d'application de cette technique.

Michel Sauzade, professeur à l'Université Paris-Sud, Institut d'électronique fondamentale (URA 22 CNRS).

Geneviève Guillot, chargée de recherche au CNRS, Institut d'électronique fondamentale (URA 22 CNRS).

Patrick Gonord, maître de conférences à l'Université Paris-Sud, Institut d'électronique fondamentale (URA 22 CNRS), Université Paris-Sud, Bât 220, 91405 Orsay Cedex.

Une reconstitution en 3D

Pour réaliser une image, on superpose au champ statique des gradients de champ qui font varier linéairement la fréquence de résonance le long de leurs directions d'application. La fréquence de résonance des différents éléments de l'objet varie proportionnellement à la distance et permet d'identifier leur position à la fin d'une série d'expériences pendant lesquelles des gradients de différentes intensités sont appliqués suivant trois directions orthogonales.

L'ensemble des données acquises pendant la série d'expériences permet, par le calcul d'une transformée de Fourier tridimensionnelle, de reconstituer l'objet et d'obtenir des images de coupes suivant n'importe quelle direction de l'espace.

Nuclear magnetic resonance imaging - Large progress has been made in nuclear magnetic resonance imaging (MRI) during last few years by introducing new imaging methods, sophisticated instrumentation, and powerful processing for data and images. These improvements allowed us to extend the MRI usefulness to new scientific fields.



Fig. 2 - Image d'une mouche *Drosophila* : coupe de la mouche avec un contraste en densité de noyaux d'hydrogène. L'épaisseur de la coupe est de $40 \mu\text{m}$, la résolution dans la coupe est de $27 \mu\text{m}$ en horizontal et de $17 \mu\text{m}$ en vertical. 40 coupes sont acquises simultanément. On distingue les détails de la tête (yeux), située en bas à gauche, et du corps (abdomen ou pattes), situé en haut et à droite de la photo. La résolution obtenue permet l'étude in vivo des organes de reproduction de l'insecte.

Suivre le cœur en mouvement

Isabelle Magnin

L'imagerie cardiaque constitue un enjeu important pour les dix années à venir. En effet, une meilleure connaissance du mouvement 3D d'un cœur sain, liée à une mesure réellement tridimensionnelle de ce mouvement chez l'homme, permettrait de réaliser des progrès considérables dans les domaines diagnostique, thérapeutique et également interventionnel de la cardiologie.

Cette connaissance passe par :
- le développement de scanners réellement tridimensionnels capables d'acquérir des informations anatomiques et fonctionnelles

Visualizing the beating heart - Diagnosis and therapy in cardiology could be greatly improved if the dynamic behaviour of the beating human heart was better known. Development of real time 3D cardiac imaging systems associated with new theoretical models will make it possible in the near future.



Représentation approchée du mouvement 3D (déplacement global + déformation locale) du ventricule gauche d'un cœur humain au cours d'un cycle cardiaque moyen par une méthode de codage OCTAVE du volume; (a) ventricule normal : la quantité de mouvement est à peu près homogène dans tout l'espace; (b) ventricule pathologique : on observe une absence de mouvement, qui se traduit par un trou dans le volume visualisé, localisée dans la région ischémisée de la paroi ventriculaire. Ce résultat est probablement dû aux effets conjoints d'une anomalie locale de déformation associée à une compensation du mouvement par effet antagoniste. (Clichés D. Frihoulet, Ch. Mathieu et D. Revel, URA 1216 CNRS).

précises du cœur pendant son mouvement ;

- des études à caractère fondamental destinées à modéliser le mouvement (mouvement des parois, dynamique de flux) du cœur normal et pathologique. Il s'agit d'un domaine fort complexe compte tenu de la nature élastique de cet organe, très difficile à observer *in vivo* ;

- la mise au point d'algorithmes performants de visualisation interactive 3D du cœur ou d'images de synthèse, permettant de présen-

ter, d'une manière parfaitement interprétable par le cardiologue, des paramètres de mouvement ou encore la localisation dynamique des lésions ou la matérialisation des flux à l'intérieur même des cavités.

Isabelle Magnin, chargée de recherche à l'INSERM, Unité « Traitement du signal, imagerie numérique et ultrasons » (URA 1216 CNRS), Institut national des sciences appliquées de Lyon, 20, avenue Albert Einstein, 69621 Villeurbanne Cedex.

Imagerie CCD de l'Univers lointain

La puissance de détection des télescopes est décuplée par l'emploi des méthodes d'imagerie utilisant des détecteurs CCD. Ainsi s'ouvre le champ de l'astronomie ultraprofonde, au-delà des dix milliards d'années-lumière.

Bernard Fort

En dix ans, l'usage des détecteurs CCD (du nom anglais Charge Coupled Devices) s'est banalisé sur les télescopes optiques implantés au sol. Ce succès vient de leur facilité d'emploi dans l'environnement informatique actuel et de leurs qualités ex-

ceptionnelles : bruit de lecture proche de zéro, rendement quantique voisin de l'unité, excellente linéarité, et stabilité géométrique parfaite.

La puissance de détection des télescopes s'est trouvée décuplée et on leur doit une bonne part des avancées récentes de l'astronomie.

Avec ces détecteurs, le rapport signal sur bruit croît théoriquement comme la

CCD imaging of very deep Universe - How the light gathering power of very large optical telescopes and the perfect mastering of CCD imaging techniques allow the probing of the very deep Universe of young galaxies located at distances larger than 10 billions light years.

racine carrée du nombre de photoélectrons détectés (le détecteur est dit fonctionner en régime de bruit de photons). La dynamique est telle qu'avec des temps de pose suffisamment longs, il devrait être possible de détecter des objets célestes dont la brillance de surface représente moins d'un millième du fond du ciel. Le flux lumineux de l'objet pourrait être de l'ordre de 0,02 photon/seconde/pixel, noyé dans un fond de ciel de 50 photons/seconde/pixel.

La MAMA

Jean Guibert

De par l'énorme volume d'information qu'elles permettent d'enregistrer (jusqu'à un gigapixel par cliché), de par le fait qu'il en existe datant de plusieurs dizaines d'années, voire d'un siècle, les plaques photographiques restent un support irremplaçable pour l'analyse des grands champs et l'étude des phénomènes variables dans l'espace et le temps.

Conçue, développée et mise en œuvre par l'Institut national des sciences de l'Univers pour l'exploitation informatisée des clichés astronomiques, la MAMA (Machine Automatique à Mesurer pour l'Astronomie) est installée dans les locaux de l'Observatoire de Paris. Il s'agit d'un microdensitomètre qui tire sa vitesse de numérisation de la présence d'un capteur multivoie (RETICON à 1024 photodiodes). Cet ensemble autorise l'analyse en quelques heures, avec un pas de 10 micromètres, d'un cliché de 35 cm de côté. Cette vitesse n'est cependant pas acquise aux dépens de la qualité des mesures. La MAMA possède en effet une répétitivité géométrique de 0,2 micromètre, une précision absolue de 1



Amas globulaire Messier 5 : la calibration photométrique des clichés photographiques repose souvent sur l'utilisation de séquences d'étoiles situées dans le voisinage d'amas. (Cliché Schmidt O.C.A., numérisation MAMA).



Galaxie spirale du ciel austral : auprès de la MAMA sont entreposées les copies sur verre des relevés du ciel sud, réalisés avec un filtre rouge à l'Observatoire européen austral, et avec un filtre bleu à l'Observatoire britannique de Siding Springs (Australie). Les régions d'hydrogène ionisé par les étoiles chaudes récemment formées sont bien visibles le long des bras spiraux de cette galaxie photographiée à Siding Springs et numérisée avec la MAMA.

micromètre, et, dans certaines conditions, sa précision photométrique peut atteindre 5 centièmes de magnitude, c'est-à-dire 5 %.

L'ensemble de ces performances la place au tout premier rang au plan international. L'éventail des domaines de l'astrophysique couverts par les utilisations de la MAMA est extrêmement vaste. Il concerne le domaine extragalactique, avec la détection de candidats quasars par la photométrie multicolore, l'étude des galaxies à raies d'émission ou à sauts de formation stellaire, ou la relation morphologie-environnement. Il concerne également le domaine galactique avec l'étude des populations stellaires, et le système solaire avec l'astrométrie des satellites faibles de Jupiter. Les images du Soleil sont aussi analysées. Une demande forte existe pour la recherche et l'étude des contreparties optiques de sources détectées en radio, dans l'infrarouge ou le domaine X. Pour tous ces programmes, des logiciels spécifiques ont été construits pour l'analyse des images et la réduction des données obtenues.

MAMA: computer processing of astronomical photographs. - MAMA is a fast microdensitometer. It analyses in a few hours, with a step of 10 micrometers, a 350 mm square photograph, with a very high accuracy. It's used in astrophysics for studies of the solar system, stellar populations and extragalactic objects.

Jean Guibert, astronome à l'Observatoire de Paris, Centre d'analyse des images, INSU, Division technique, 77, avenue Denfert-Rochereau, 75014 Paris.

► Augmenter la précision photométrique

Singulièrement, les astronomes qui tentèrent de telles observations découvrirent que l'accroissement du temps de pose n'augmentait pas le niveau de détection des lors que le niveau du signal dépassait 10 000 électrons/pixel, soit moins d'un vingtième de la dynamique. Les pixels du CCD fournissaient une réponse stable à quelque dix millièmes près, mais la précision photométrique

après calibration du composant restait limitée au pour cent.

L'origine de cette limite est multiple : calibration imparfaite de la réponse des pixels, prélèvements de charge du signal lors de transferts, franges d'interférence d'égale épaisseur extrêmement ténues, etc. Tous ces effets sont trop faibles pour se manifester dans l'utilisation standard d'un CCD, mais sont préjudiciables à beaucoup d'observations astronomiques. Pour contourner cette difficulté, les astronomes reviennent aux

techniques de composite d'images utilisées autrefois en photographie. Elles permettent effectivement de dépasser des rapports signal à bruit de l'ordre de mille.

L'imagerie ultraprofonde

Pour l'imagerie astronomique ultraprofonde, une technique utilise un grand nombre de poses courtes qui correspondent chacune au temps juste nécessaire pour atteindre cette précision

Les Arcs d'Einstein

L'imagerie CCD ultraprofonde employée sur de grands télescopes vient de révéler, sur des champs présumés vides, une population abondante de galaxies bleues réparties uniformément dans le ciel et dont la brillance de surface est inférieure au centième du fond du ciel (Fig 2). Leur petite dimension et leur couleur suggèrent une distance de plus de 10 milliards d'années-lumière. Cette hypothèse est vérifiée par la découverte récente des « arcs d'Einstein » (Fig 1). Ces arcs bleus détectés dans les amas de galaxies correspondent aux images de ces galaxies déformées par le potentiel gravitationnel de l'amas deflecteur. Ce nouveau phénomène de lentille gravitationnelle provoque des grandissements et des distorsions d'images qui sont maintenant utilisés pour sonder l'Univers lointain et pour cartographier la matière invisible qui constitue plus de 90% de la masse de l'Univers.

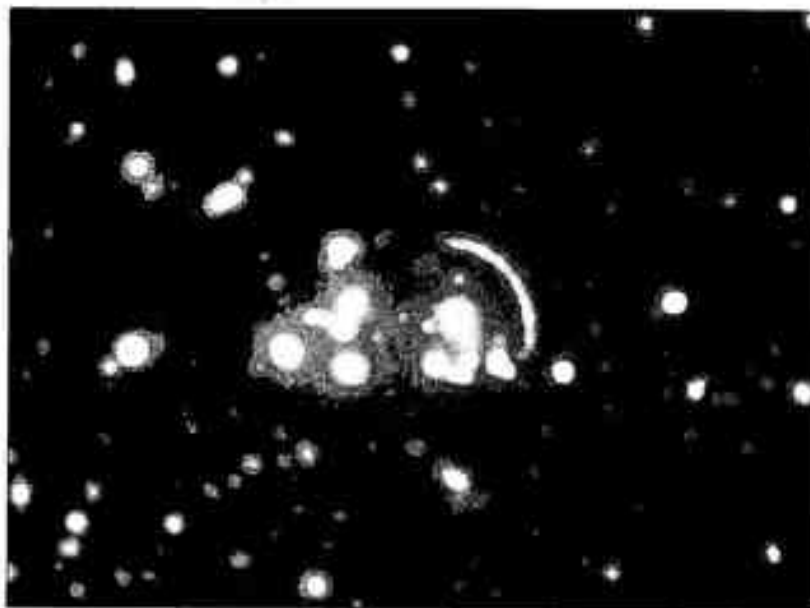


Fig. 1 - Image CCD ultraprofonde dans le centre de l'amas C2244. Pour la population de galaxies bleues, la composante de matière invisible et de nature inconnue qui domine le potentiel de l'amas, forme des arcs gravitationnels sur le plan du ciel (cliché CFHT, octobre 1990).

photométrique de l'ordre du pour cent. Pour toutes ces poses, le champ astronomique observé est positionné différemment sur le CCD avec des décalages tels que les erreurs systématiques résiduelles puissent être traitées comme des variables aléatoires centrées pour un

pixel donné. L'image composite s'obtient en additionnant les images intermédiaires préalablement recentrées avec des repères stellaires du champ. Comme chaque image élémentaire est obtenue en régime de bruit de photons, l'image finale est aussi limitée par ce

bruit. Avec un grand nombre de poses courtes, la nouvelle précision de mesure dépasse le millième. Cette procédure est malheureusement complexe et nécessite un protocole d'observation et de traitement des images rigoureux. Pour les CCD de grands formats, elle nécessite aussi de puissantes stations de traitement d'images sur le site du télescope. Elle s'impose cependant par les preuves éclatantes de son efficacité. On lui doit en particulier la découverte d'une nouvelle classe d'images gravitationnelles : les arcs d'Einstein (voir encadré).

Des procédures similaires sont maintenant mises au point pour la spectroscopie. Elles sont cruciales pour les télescopes de l'an 2 000 comme le « Very Large Telescope » (VLT) qui sera implanté par l'Europe dans l'hémisphère austral. Une partie des observations pour lesquelles est conçu ce télescope ne pourront être réalisées qu'en conjuguant sa puissance de collection de photons à une parfaite maîtrise des techniques les plus avancées en matière d'imagerie CCD.

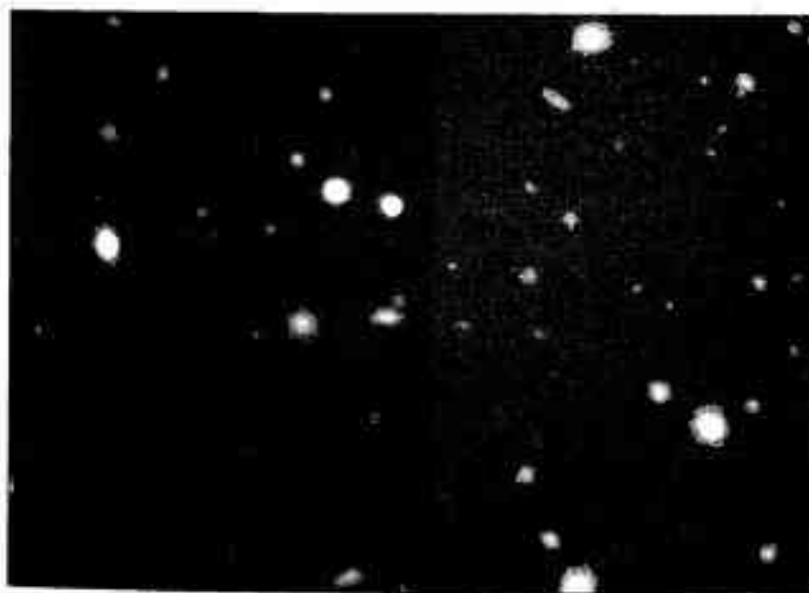


Fig. 2 - Image CCD ultraprofonde d'un champ présumé vide d'objets sur le Palomar sky survey. On y distingue la population de galaxies bleues distantes de plus de dix milliards d'années-lumière dont la brillance est inférieure au centième du fond du ciel (cliché CFHT, octobre 1990).

Bernard Fort, directeur de recherche au CNRS, directeur du Laboratoire d'astrophysique de Toulouse (URA 285 CNRS), Observatoire Midi-Pyrénées, 14, avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse.

Les images des sondes Voyager

■ Bruno Sicardy

Après plus de douze ans de route dans le système solaire, la sonde *Voyager 2* a terminé avec Neptune sa magnifique mission vers les planètes géantes. Survolant successivement Jupiter et Saturne (1979-1981), les deux sondes *Voyager 1* et *2* se sont séparées. *Voyager 1* est sortie du plan de l'écliptique et *Voyager 2* s'est dirigée vers Uranus (janvier 1986), puis vers Neptune, la « planète bleue » (août 1989). Une partie de notre patrimoine culturel s'est ainsi enrichi de nouvelles images (plus de cent mille!) de planètes, de satellites et d'anneaux.

La moisson scientifique apportée par ces images a été prodigieuse. De simples points de lumière dans le ciel, les planètes sont devenues dans nos télescopes de petits disques résolus avec des détails de quelques centaines ou quelques milliers de kilomètres. En quelques jours, les sondes *Voyager* nous ont révélé des détails dont certains sont inférieurs à dix kilomètres. La cratérisation et la morphologie des surfaces des satellites nous permettent de lire l'histoire de ces corps. L'évolution des atmosphères planétaires en temps réel nous renseigne, d'autre part,



sur les phénomènes de circulation. Enfin, les détails des anneaux nous ont révélé des phénomènes dynamiques jusque-là insoupçonnés dans les disques.

L'image de Neptune présentée ici a été prise en août 1989 par la sonde *Voyager 2*, qui se trouvait alors à six millions de kilomètres de la planète. La dominante bleue est due, d'une part, à la diffusion de la lumière solaire par les molécules de l'atmosphère neptunienne (un phénomène qui explique aussi la couleur de notre ciel), et d'autre part, à la présence de méthane, qui absorbe fortement le rayonnement proche infrarouge. On distingue au milieu du cliché la « Grande Tache Sombre », surplombée de son nuage clair de cristaux de méthane. Cette tache est sans doute le siège de gigantesques mouvements tourbillonnaires,

dont l'origine est encore inconnue. On distingue également une autre tache plus petite en bas à gauche, ainsi que de nombreuses formations nuageuses qui évoluent sur des échelles de quelques minutes. Le suivi de plusieurs images montre enfin que la planète ne tourne pas de manière uniforme en surface : les nuages mettent 18 heures pour faire le tour de l'équateur, alors qu'il leur faut à peine 16 heures pour contourner le pôle.

The Voyager images - More than twelve years after its launch, the Voyager 2 spacecraft ended its dramatic exploration of the giant planets with Neptune. This image was taken in August 1989, while the probe was six million kilometers away from Neptune. The blue color is due to diffusion of sunlight by the Neptunian atmosphere, as well as to absorption by methane. Large features like the "Great Dark Spot" are indicative of a highly turbulent atmosphere.

■ Bruno Sicardy, professeur à l'Université Paris VI, Observatoire de Paris, Laboratoire d'astrophysique extragalactique et de cosmologie (URA 173 CNRS), Observatoire de Meudon, Département d'astrophysique fondamentale, 5, place Janssen, 92195 Meudon Cedex.

MODELISER ET ANALYSER

Un signal ou une image est le support physique d'une information. Comme tel, il peut être d'origine très variée : acoustique, radioélectrique, optique, mécanique... Au-delà de cette diversité, un point commun : pour les signaux, c'est généralement l'évolution *temporelle* d'une grandeur (le plus souvent électrique) recueillie à la sortie d'un (ou plusieurs) capteur(s) qui constitue la matière première à partir de laquelle le traiteur de signal cherche à extraire l'information qu'il juge utile. En ce qui concerne les images, la situation est analogue, mais l'échelle temporelle est remplacée par la résolution *spatiale* et, pour les images statiques (les plus courantes en opposition aux images dynamiques de mouvement), l'information disponible pour l'utilisateur est représentée par une projection de la scène observée.

Si, dans les deux cas, l'information cherchée est là et toute là, on conçoit aisément que la facilité de son extraction et de sa manipulation dépendra de sa lisibilité. Quitter l'espace de représentation immédiat, qui est celui des données brutes, pour passer à un espace transformé contenant la même information répond alors au souci de mettre en évidence des caractéristiques spécifiques du signal, de le "regarder" sous un angle particulier. Le choix d'une représentation est crucial car, si l'on considère l'ensemble d'une chaîne de traitement, sa pertinence se mesure à sa capacité à fournir

des descripteurs se prêtant bien, par exemple, à des tâches ultérieures de décision : détection, estimation, classification, reconnaissance...

En ce qui concerne l'image, elle constitue un support de représentation qui doit permettre à un observateur de découvrir et reconnaître l'environnement associé à la scène dont elle est issue. De cette représentation bidimensionnelle, l'observateur exploite des modèles liés aux éléments constitutifs de la scène et, par reprojection de ces modèles dans le monde des images, il va réaliser un appariement (une mise en correspondance), de façon à percevoir ce qui peut lui servir pour justifier son modèle et évoluer dans son interprétation. La définition d'un environnement de représentation induit un ensemble propre de méthodes d'exploitation de l'information : un article de ce chapitre illustrera différents types de modes de représentation adaptés à l'interprétation. Le problème

de la représentation et du traitement des objets en 3D sera également abordé dans le dernier article de ce chapitre.

Du point de vue de l'analyse, une représentation est destinée à apprendre à un utilisateur quelque chose quant à la constitution d'un signal. Dans la mesure où l'on dispose de peu d'*a priori* sur cette dernière, il est souhaitable que soit forcé le moins possible un type de structure prédéterminé. Cette situation correspond en général à des méthodes *non-paramétriques* pour lesquelles l'espace transformé peut éventuellement être significativement plus grand que l'espace de départ, l'augmentation de redondance étant contrebalancée par une meilleure structuration *a posteriori* de l'information. Si par contre on dispose d'indications quant à des structures possibles, il est clair qu'incorporer ces connaissances *a priori* dans le choix de la représentation permet de mieux cer-



Transformée en ondelettes d'un signal turbulent. (Collaboration J.-F. Colonna, LACTAMME et M. Holschneider, Centre de physique théorique © CNRS-LMD-M. Farge-J.-F. Colonna).

ner les caractéristiques du signal. Ceci conduit le plus souvent à des méthodes *paramétriques*, dans lesquelles usage est fait de *modèles* dont l'ajustement des paramètres (si possible en petit nombre) permet de rendre compte au mieux des observations.

L'importance que peuvent revêtir de tels modèles de connaissance est illustrée dans les deux premiers articles du chapitre. Pour le premier, c'est la biologie qui, en apportant des informations quant au fonctionnement du système auditif, permet de progresser sur la modélisation de la perception de la parole. Pour le deuxième, c'est la physique du problème qui, en fournissant des éléments de modélisation pour les bruits rencontrés en acoustique sous-marine, permet d'en accroître la détection ou d'en diminuer le rôle perturbateur.

Que les approches soient déterministes (décompositions sur des bases de fonctions) ou statistiques (le signal étant vu comme la sortie d'un système à entrée aléatoire), représentation et modélisation sont en interaction étroite. Pour les signaux tout comme pour les images, un exemple typique et fondamental est fourni par l'analyse spectrale. Celle-ci cherche à mettre en évidence des structures fréquentielles (composantes harmoniques, modes vibratoires...) dans la description des signaux et s'adapte également à des situations spatiales en traitement d'antenne (localisation de sources). Si cette approche a longtemps reposé sur l'analyse de Fourier (qui demeure un outil privilégié),



Représentation des courbures maximales estimées sur une forme tridimensionnelle échantillonnée par un système de triangulation active. L'objet (un buste de femme) est représenté sous la forme d'une image de profondeur en coordonnées cylindriques. (Cliché H. Maître, Telecom Paris).

cette dernière présente cependant deux grandes classes de limitations. La première est d'avoir une faible résolution, limitée par la durée ou la taille des observations, la deuxième étant de faire implicitement une hypothèse de stationnarité ou de régime permanent sur les données, ce qui est conflictuel avec une idée intuitive de localisation (temporelle ou spatiale) d'événements. Ces dernières années ont vu le développement d'outils nouveaux pour dépasser ces difficultés, soit en augmentant la résolution par l'introduction de modèles appropriés ou l'adaptation de l'analyse à l'objet étudié (méthodes "haute résolution"), soit en rendant l'analyse spectrale dépendante du temps ou de l'espace de façon à lui permettre de rendre compte de phénomènes non-stationnaires et/ou localisés (temps-fréquence, ondelettes).

Ces deux aspects sont abordés dans les articles qui suivent, où l'on montre en outre que la multiplication de points de vue différents sur un même signal enrichit considérablement la connaissance que l'on peut en avoir. Les quelques exemples présentés sont issus de domaines très différents (biomédical, mécanique, acoustique, électromagnétisme, cosmologie) et illustrent l'étendue des champs d'application offerts à ces nouvelles techniques. Si beaucoup d'outils complémentaires sont maintenant disponibles, le problème est davantage de les faire coopérer efficacement et d'en superviser l'utilisation.

Au-delà de la représentation, la prise en compte des non-stationnarités revient à rendre explicite le rôle du temps dans les transformations affectant les signaux, les généralisations de l'analyse spectrale consistant à inclure cette dépendance temporelle dans la représentation (ou le modèle). Un autre point de vue est de l'introduire dans l'algorithme élaborant la transformation. Ceci ouvre le champ aux techniques dites *adaptatives* en ce sens qu'elles sont susceptibles de faire varier leurs paramètres en fonction des évolutions du signal sur lequel elles opèrent. Là encore, les applications, effectives ou potentielles, sont multiples. Ceci ouvre la voie aux développements de concepts d'apprentissage, de stratégies de traitement et d'environnements de contrôle.

Patrick Flandrin,
chargé de recherche au CNRS
Jean-Marc Chassery,
chargé de recherche au CNRS

Comment fonctionne le système auditif ?

Les mécanismes biologiques de traitement du signal sonore par le système auditif sont maintenant mieux connus. Ceci permet d'envisager des progrès d'importance pour la modélisation de la perception de la parole.

■ Jean-Luc Schwartz,
Pierre Escudier

Le système auditif résout les problèmes d'accès à une information extérieure à partir des ondes acoustiques captées par les deux oreilles, en s'appuyant sur des principes généraux de traitement biologique de l'information (extraction en parallèle de paramètres de complexité croissante à partir de processeurs simples ou de réseaux) et sur des outils classiques (filtrage, cartes, détecteurs spécialisés).

Le voyage du signal acoustique

Le signal acoustique arrivant sur une oreille est d'abord conduit par l'oreille externe vers le tympan, puis converti par un sas ou adaptateur d'impédance, l'oreille moyenne, en excitation hydrodynamique dans les liquides cochléaires de l'oreille interne. Là, la membrane basilaire, dont les caractéristiques d'inertie croissent progressivement de la base à l'apex, assure une analyse spectrale complète et une conversion dite « tonotopique » entre paramètre physique (fréquence) et paramètre positionnel (abscisse). Les résultats de cette analyse sont transférés par des capteurs, les cellules ciliées, vers les neurones du nerf auditif, où ils sont encodés sous forme de variation d'activité nerveuse (influx nerveux) en fonction du temps et de la fréquence caractéristique des neurones, qui traduit leur position de rattachement sur la membrane basilaire.

Hearing and perception models - Auditory processing of sounds by vertebrates is based on a general biological principle - elaboration of a number of representations of increasing complexity by small circuits or large neural networks - and on classical tools, such as filters, maps and specialized detectors. However, speech processing must involve specific constraints on the acoustic objects produced by the human phonatory system.

Le traitement du signal par les neurones

La commencent les traitements neuronaux, qui s'effectuent en parallèle à travers les architectures complexes et encore imparfaitement connues des centres auditifs, jusqu'au cortex. La tonotopie - sélectivité fréquentielle plus ou moins fine des neurones et organisation géographique selon la fréquence caractéristique - est partiellement conservée tout au long des traitements. Le système auditif dispose donc, comme le système visuel, de véritables cartes du signal analysé. Un des enjeux majeurs de la physiologie et de l'anatomie de l'audition est de déterminer les paramètres d'organisation autres que la fréquence d'analyse et le rôle de ces cartes dans la formation des représentations auditives de haut niveau. Ainsi on a pu localiser, dans le système auditif de divers types de vertébrés, des neurones répondant préférentiellement à certaines fréquences de modulation autour de la fréquence caractéristique, potentiellement utiles pour l'estimation de la hauteur (fréquence fondamentale) d'un son complexe ou le regroupement de composantes spectrales coordonnées pour l'identification des sources sonores. On a pu également montrer, chez la chouette effraie, l'existence de véritables cartographies des différences interaurales de phase ou d'intensité, convergeant à plus haut niveau vers une carte complète de neurones « récepteurs de position » permettant à ce prédateur nocturne de localiser très précisément sa proie au moyen de ses seuls capteurs acoustiques.

Modéliser la perception de la parole

Le traitement humain de la parole doit être envisagé à la lumière de ces principes généraux de fonctionnement. On sait ainsi qu'il existe, à bas niveau, de bonnes représentations du spectre instantané sur de larges dynamiques d'intensités, mais aussi des neurones spécialisés dans le traitement du temps, et capables de signaler précisément

l'instant d'apparition d'un changement spectral rapide. A plus haut niveau, il existe des neurones répondant sélectivement à des stimuli plus complexes (bruits à large bande, spectres à plusieurs pics, consonnes particulières), mais les principes d'organisation de ces « représentations intermédiaires » (déjà complexes, mais pas encore complètement décodées) restent très mal connus. C'est probablement en s'appuyant sur la « boîte à outils » biologique générale que fournit le système auditif chez les vertébrés, mais aussi sur les contraintes propres aux objets acoustiques produits par le système phonatoire humain, que l'on pourra progresser significativement sur la modélisation de la perception de parole.

■ Jean-Luc Schwartz, chargé de recherche au CNRS, Institut de la communication parlée (URA 368 CNRS).

■ Pierre Escudier, directeur de recherche au CNRS, Institut de la communication parlée (URA 368 CNRS), Institut national polytechnique de Grenoble, 46, avenue Félix Viallet, 38031 Grenoble Cedex.

CNRS - AUDIOVISUEL

1, place Aristide-Briand 52105 Meudon Cedex

THÉMISTOCLE COMMENT DÉTECTER LES GAMMAS DE L'UNIVERS ?

L'expérience Thémistocle est le fruit d'un long effort impliquant des techniciens, des ingénieurs et des physiciens : son but est de mieux connaître et utiliser les gammas, particules cosmiques venant des profondeurs de l'Univers. Ils ont dessiné, construit et mis au point tous les matériels et appareils nécessaires, conçus pour détecter les gammas : dix-huit télescopes fonctionnent dans le Languedoc-Roussillon, sur le site de l'ancienne centrale électro-solaire EDF-Thémis.

Auteurs scientifiques :
Claude Ghesquière et Philippe Roy
Réalisateur : Serge Guyon
et Philippe Roy

Co-production : CNRS Audiovisuel et Université Paris-Sud - 18 minutes - 1990

Modélisation des bruits en acoustique sous-marine

La modélisation des bruits apparaît comme une composante fondamentale des systèmes sonar.

■ Pierre-Yves Arquès,
Jean-Pierre Le Cadre

Les systèmes sonar et les systèmes associés ont pour but général la description du milieu sous-marin, et ce, par réception des ondes sonores se propageant dans ce milieu. Cette description ne peut donc se faire qu'en terme de bruiteurs, de réflecteurs ou même d'obstacles interrupteurs d'ondes acoustiques.

Mais, d'une part, le milieu marin est – sur le plan acoustique – un milieu très bruyé. D'autre part, ce bruit est constitué de composantes d'origines diverses (bruits ambiants naturels ou de trafic, bruits rayonnés par les navires, bruit propre du bâtiment porteur...), difficilement isolables. Enfin, certains bruits particuliers sont porteurs d'une ou de l'information importante, information recherchée par l'observateur. Il en résulte que la modélisation des bruits d'acoustique sous-marine apparaît comme un élément fondamental de la conception des systèmes sonar et systèmes analogues ou associés.

Trois types de modélisation

La connaissance des bruits d'acoustique sous-marine est une activité importante relevant de plusieurs secteurs : l'océanographie, la connaissance acoustique des navires, la conception des systèmes de communication sous-marins. Dans ce dernier secteur, de type traitement du signal, on peut répartir les modèles (qu'ils soient de représentation, de connaissance, expérimentaux, ou opérationnels) en trois grandes catégories. Les modélisations descriptives considèrent le bruit à traiter comme somme de composantes, modélisées chacune avec une paramétrisation physique ; la valeur des paramètres est classiquement déduite de manière directe des conditions

momentanées (état de la mer, saison, vitesse...). Les modélisations globales considèrent le bruit à traiter comme un tout, avec une paramétrisation non significative (modèles ARMA, de mixture...); les paramètres sont identifiés au moment du traitement sur une ou des réalisations reçues. La modélisation mixte correspond à l'identification globale d'une combinaison de modèles descriptifs à éventuelle paramétrisation physique mesurable.

L'adéquation modèle-traitement

Du point de vue du traitement du signal, les modélisations de bruit utilisées se doivent d'être adaptées aux traitements effectués sur les signaux reçus ; en effet, les interactions entre traitements et modèles des bruits (et signaux) sont fortes et les résultats obtenus peuvent dépendre de manière importante du type et de la qualité de la modélisation utilisée. De plus, les problèmes d'identification, rencontrés dans le cadre des modélisations globales, conduisent au développement de méthodes spécifiques, en particulier parce que sont susceptibles d'être présents, superposés au

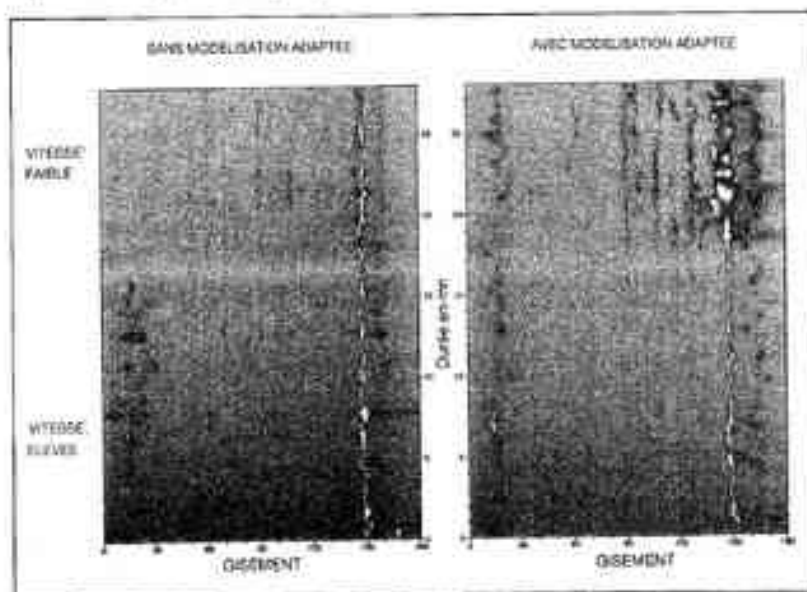
bruit, un nombre, pouvant être important, de signaux engendrés par des sources cohérentes.

Un exemple d'impact de la modélisation sur les résultats pratiques apparaît sur la figure : on peut constater l'influence de l'utilisation d'un modèle permettant la prise en compte des propriétés spatiales du bruit dans l'application du goniomètre (« MUSIC ») aux sorties d'une antenne linéaire remorquée. Dans la première partie de l'expérimentation, la vitesse de remorquage de l'antenne est élevée, le bruit reçu (d'écoulement turbulent) est important et à corrélation courte (quasiment blanc spatialement), et l'influence du blanchiment apparaît minime. Dans la seconde partie de l'expérimentation, la vitesse de remorquage de l'antenne est faible, le bruit (d'écoulement laminaire) est faible devant le bruit ambiant, et l'ensemble est fortement corrélé spatialement ; l'influence du blanchiment est alors très visible et permet de continuer à « voir » le bâtiment porteur (dont le niveau a diminué) proche de l'axe de l'antenne et de détecter divers autres bruiteurs.

■ Pierre-Yves Arquès, professeur à l'Université de Toulon et du Var, directeur scientifique du Groupe d'études et de recherche de détection sous-marine à la Direction des constructions navales de Toulon, La Brède, 83140 Six Fours.

■ Jean-Pierre Le Cadre, chargé de recherche au CNRS, Institut de recherches en informatique et systèmes aléatoires (URA 227 CNRS), Campus de Beaulieu, BP 25, 35042 Rennes Cedex.

Noise modelling in underwater acoustics – The place occupied by underwater acoustic noises, and the importance of their modelling in the design of sonar systems are shown. An example of the modelling impact on practical results is presented.



■ Influence du modèle de bruit sur les résultats du goniomètre.

Analyse spectrale de signaux stationnaires

Les traditionnelles techniques d'analyse harmonique ne sont plus seules pour estimer le spectre d'un signal stationnaire. Toute une panoplie de méthodes rend possible une analyse fréquentielle haute résolution de signaux de courte durée.

 Nodine Martin

L'origine de l'analyse spectrale remonte au XVII^e siècle lorsque Newton observa la décomposition de la lumière en différentes couleurs à travers un prisme. Les premiers outils mathématiques nécessaires furent aussi introduits par Newton, qui formula les observations empiriques de Pythagore sur la périodicité du mouvement des ondes. Au XVIII^e siècle, la solution à l'équation d'onde pour une corde vibrante fut développée par Bernoulli puis étendue par Fourier. C'était la naissance de l'analyse harmonique suivie de nombreuses applications notamment la mesure des marées et l'étude de l'activité des taches solaires.

Schuster proposa alors de tracer le module au carré des coefficients de la transformée de Fourier. Il nomma la méthode le périodogramme, de nos jours méthode de base de l'estimation spectrale, dite classique. Schuster décrit les problèmes principaux de l'analyse par transformée de Fourier, soit la nécessité d'un moyennage sur les données et l'influence de la durée finie du signal. Malgré ses conseils et aussi à cause des moyens informatiques de l'époque, le périodogramme simple n'apporta pendant plusieurs décennies que des désempolements : des fluctuations trop importantes sur le spectre estimé empêchèrent toute mesure correcte.

Dans les années 50, le périodogramme fut enfin moyenné par différentes techniques. Une de ces méthodes, l'estimateur de Welch, est dans la classe du périodogramme l'une des plus robustes pour une grande classe de signaux. Parallèlement, l'analyse spectrale marqua un point décisif avec les travaux statistiques de Wiener sur l'analyse harmonique.

De là découle une autre classe d'estimateurs de densité spectrale de puissance (DSP), appelée le corrélogramme, où la DSP est calculée par transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation. De nombreux essais d'unification

de ces deux grandes classes (périodogramme et corrélogramme) ont été tentés dans la littérature.

Un compromis entre résolution et variance

Toutes ces approches de l'analyse spectrale classique basées sur la transformée de Fourier ont pour objectif un compromis entre une résolution la plus haute possible et une variance la plus faible possible, sachant que l'une de ces propriétés s'améliore au détriment de l'autre.

L'apport de l'intelligence artificielle

Depuis une vingtaine d'années, des nouvelles méthodes d'analyse spectrale, issues d'un principe fondamentalement différent, ont été développées afin d'améliorer sensiblement la résolution. Ces techniques dites à haute résolution s'appuient sur un modèle mathématique du signal.

L'analyse spectrale n'a jamais été une science exacte de par sa définition. Elle s'est transformée ces dernières années en une science complexe, sophistiquée et surtout empirique.

L'expérience est, en effet, un alibi indispensable pour conduire une analyse complète autant au niveau du choix d'une méthode, du choix des paramètres de traitement que de l'interprétation des résultats suivant le domaine du signal traité. Nous arrivons ainsi tout naturellement aux techniques d'intelligence artificielle qui consacrent leurs objectifs à traiter des problèmes pour lesquels aucune méthode de résolution directe et assurée n'est connue.

La philosophie d'un tel système, analyseur de spectre unifié et intelligent, consiste à caractériser le signal dans le domaine fréquentiel en

Spectral analysis of stationary signals
- After long success with Fourier transform, spectral analysis has increased its performances with the development of high-resolution methods based on mathematical modellings. These new techniques could be transferred to industry if complete and self-governing systems combine these new algorithms, directions for use and principally expert knowledge.

Parallèlement aux approches type périodogramme, un statisticien anglais, Yule, eut l'idée de modéliser une série temporelle par une auto-régression linéaire afin de retrouver des périodicités dans le signal. Ces méthodes ont très vite eu un intérêt croissant grâce à l'amélioration de la résolution spectrale par rapport aux techniques de Fourier. En effet, la modélisation des données par un processus qui peut être vu comme une prédiction linéaire du signal, permet de prolonger les données en dehors de l'intervalle d'observation. Ainsi, la limite de résolution de Fourier, inmanquablement liée à cette durée finie d'observation, pouvait être dépassée. ▶

confrontant en parallèle un choix de techniques adaptées au type de signal (les connaissances a priori) et à l'objectif visé. Une représentation statique de la connaissance sera couplée à une représentation dynamique ou base de règles qui contiendra toute la richesse du système : les réflexes des experts face à une situation donnée.

Une stratégie d'analyse fidèle au comportement d'experts face à l'analyse de signaux réels exploitera la base de connaissances pour choisir les méthodes et leurs paramètres, pour interpréter les spectres obtenus, pour affiner l'analyse jusqu'à l'obtention d'une conclusion relative à l'objectif fixé par l'utilisateur.

Il apparaît ainsi clairement la nécessité, d'une part, de maîtriser chaque méthode face à des cas typiques, d'autre part, de rendre accessibles les techniques de pointe à des utilisateurs non spécialistes. La problématique de ce système dépend finalement, comme dans tout problème équivalent d'intelligence artificielle, de l'évaluation et de la reproduction du cheminement de la pensée d'un expert...

► Néanmoins cette amélioration est obtenue au détriment d'algorithmes simples et robustes.

Les principaux modèles ont dès lors suscité de nombreuses études qui aboutissent à divers algorithmes.

Estimer les caractéristiques du signal

Jusqu'à ce point, toutes les techniques, quelle que soit leur origine, étaient des estimateurs de DSP. Vers les années 1970, d'autres approches firent un pas dans l'estimation spectrale. En effet, la recherche n'est plus uniquement axée vers l'estimation de la DSP, mais vers l'estimation des caractéristiques spectrales du signal. La porte est alors ouverte à toute une batterie de méthodes où l'espace des données est divisé en deux sous-espaces, l'un décrit un espace dit signal que l'on cherche à estimer, l'autre un espace dit bruit qui perturbe l'information. Une haute résolution fréquentielle a fait le succès de ces méthodes basées soit sur l'exploitation de l'espace signal, soit sur l'exploitation de l'espace bruit.

Le domaine de l'analyse spectrale s'est étoffé ces dix dernières années de nombreux outils mathématiques qui rendent l'analyse très performante, mais aussi très vulnérable : les hypothèses d'applicabilité deviennent multiples et rétrécissent dans chaque cas les domaines de validité. Une approche intéressante consiste alors à extraire un certain nombre de classes de signaux représentatifs de phénomènes naturels et de considérer les résultats obtenus par les techniques spectrales. Ceci afin d'enrichir la connaissance sur les hypothèses liées à chaque technique et surtout d'appréhender le comportement d'une technique lors d'hypothèses présentes non adéquates.

La plupart des méthodes spectrales ont un pendant dans l'analyse temps-fréquence des signaux non-stationnaires et dans l'analyse spectrale bidimensionnelle.

■ Nadine Martin, chargée de recherche au CNRS, Centre d'études des phénomènes géologiques et géophysiques (URA 346 CNRS), Domaine universitaire, BP 46, 35402 Saint-Martin-d'Hères Cedex.

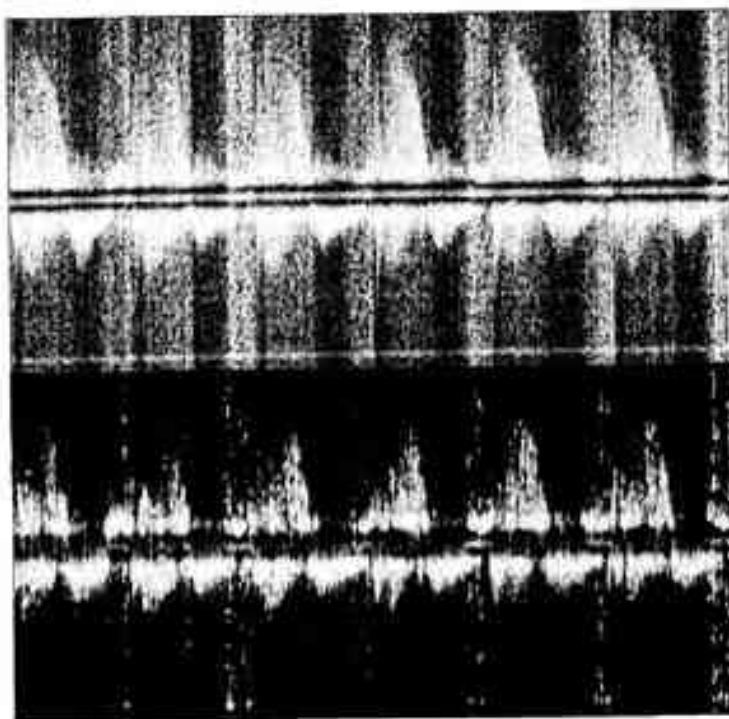
La vitesse du sang

■ Guy Demoment,
Alain Herment

Les nouvelles méthodes d'analyse des signaux non-stationnaires permettent d'effectuer un diagnostic plus précis de certaines maladies cardiovasculaires.

Ici on peut voir l'analyse de l'écoulement dans la valve tricuspide d'un patient. L'axe horizontal représente le temps s'écoulant durant quelques cycles cardiaques. L'axe vertical correspond aux différentes vitesses présentes dans l'écoulement. Enfin, la densité de puissance du signal Dop-

pler ultrasonore, qui représente le nombre d'hématies se déplaçant aux vitesses considérées, est traduite en échelle de gris logarithmique. Les caractéristiques de l'écoulement varient très rapidement au cours de l'éjection cardiaque, et une analyse de Fourier fournit de médiocres résultats : manque de résolution, variance excessive (partie haute de la figure). L'emploi d'un modèle paramétrique et de techniques d'estimation adaptatives permet de mieux prendre en compte les non-stationnarités du signal (partie basse de la figure). Le suivi de la vitesse maximale dans l'écoulement, qui est un élément important du diagnostic d'une valvulopathie, est facilité par une meilleure résolution spectrale et une bonne séparation entre l'information utile et le fond uniforme de l'image.



Ultrasound Doppler velocimetry - Better images of blood flow distribution in cardiac cavities and main vessels are obtained with new real-time signal processing techniques. They provide a finer diagnosis of some cardiovascular diseases.

■ Guy Demoment, professeur des universités, Laboratoire des signaux et systèmes (UMR 14 CNRS), Ecole supérieure d'électricité, Plateau de Moulon, 91192 Gif-sur-Yvette Cedex.

■ Alain Herment, directeur du recherche à l'INSERM, Laboratoire d'instrumentation et dynamique cardiovasculaire (U256 INSERM), Hôpital Broussais, 75674 Paris Cedex 14.

Signaux non-stationnaires, temps-fréquence et ondelettes

De nouvelles méthodes permettent de dépasser l'analyse de Fourier : elles mesurent l'évolution fréquentielle instantanée d'un signal non-stationnaire ou ses propriétés de régularité locale.

■ Patrick Flandrin,
Yves Meyer

La nécessité de s'intéresser aux signaux non-stationnaires (c'est-à-dire à ceux dont les propriétés statistiques, le contenu fréquentiel et, plus généralement, tout ou partie des caractéristiques évoluent au cours du temps) résulte d'un paradoxe : d'une part, un très grand nombre de travaux à long terme ont été consacré au cas stationnaire qui est aujourd'hui bien connu d'un point de vue théorique et pour le-

quel beaucoup d'outils performants sont disponibles ; d'autre part, il s'avère que les signaux rencontrés dans des situations concrètes sont dans leur immense majorité non-stationnaires, une part importante de l'information qu'ils véhiculent étant, de plus, précisément portée par les non-stationnarités (début ou fin d'événements, dérives, ruptures, modulations...).

Cette double constatation a conduit à développer, ces dernières années, des outils spécifiques adaptés aux signaux non-stationnaires. Parmi ceux-ci émergent deux classes importantes : les mé-

Nonstationary signals, time-frequency and wavelets - Efficient methods have recently appeared for analyzing and processing nonstationary signals. Introduced for overcoming some limitations of the classical Fourier analysis, they provide an accurate instantaneous description of a signal regarding either its frequency content (time-frequency analysis) or its behaviour at different observation scales (« wavelets »).

thodes temps-fréquence, qui prennent explicitement en compte une possible évolution temporelle du contenu fréquentiel d'un signal, et les méthodes temps-échelle (articulées autour du concept d'ondelette) dont le principe est de décrire l'évolution temporelle d'un signal relativement à une échelle d'observation.

La dualité temps-fréquence

Les représentations temps-fréquence permettent de donner sens à une notion d'analyse spectrale évolutive. Celle-ci s'avère en fait délicate à préciser car, contrairement au cas stationnaire pour lequel la transformation de Fourier est un outil naturel, il n'existe pas d'outil mathématique unique pour la caractérisation spectrale des signaux non-stationnaires. On peut voir là une illustration de la dualité qui existe entre les variables temps et fréquence, et selon laquelle la connaissance des propriétés d'un signal ne peut être arbitrairement précisée à la fois en temps et en fréquence. La situation « signal » est formellement analogue à celle rencontrée en mécanique quantique pour les variables position et impulsion (inégalités de Heisenberg) et il n'est pas étonnant que les mêmes transformations aient été proposées dans les deux domaines pour obtenir des représentations conjointes. C'est en particulier le cas d'une des transformations les plus remarquables, dont le nom est attaché à ceux du physicien E.P. Wigner et du théoricien des communications J. Ville. Bien que son introduction remonte à 1932 pour Wigner et à 1948 pour Ville, ce n'est guère que depuis une décennie environ que la représentation de Wigner-Ville (voir encadré) a été l'objet d'un très grand nombre de travaux visant à l'utiliser comme outil d'analyse temps-fréquence. Son rôle central est maintenant bien compris et plusieurs variantes ont été introduites, essentiellement pour faciliter sa mise en œuvre et son interprétation, améliorant de façon significative les résultats que peuvent fournir les méthodes plus classiques adaptées de l'analyse de Fourier.

De Fourier à Wigner-Ville

Dans son article de 1948, J. Ville écrivait : « Si nous considérons en effet un morceau [de musique] contenant plusieurs mesures (ce qui est le moins qu'on puisse demander) et qu'une note, la par exemple, figure une fois dans le morceau, l'analyse harmonique [de Fourier] nous présentera la fréquence correspondante avec une certaine amplitude et une certaine phase, sans localiser le la dans le temps. Or, il est évident qu'au cours du morceau il est des instants où l'on n'entend pas le la. La représentation est néanmoins mathématiquement correcte, parce que les phases des notes voisines du la sont agencées de manière à détruire cette note par interférence lorsqu'on ne l'entend pas et à la renforcer, également par interférence, lorsqu'on l'entend ; mais il y a dans cette conception une habileté qui honore l'analyse mathématique, il ne faut pas se dissimuler qu'il y a également une défiguration de la réalité : en effet, quand on n'entend pas le la, la raison véritable est que le la n'est pas émis ». C'est dans le but de réconcilier l'analyse mathématique et la réalité physique que les méthodes temps-fréquence et temps-échelle ont été introduites.

Le point de vue des ondelettes est de considérer un signal quel-

conque comme superposition des signaux élémentaires (les ondelettes) oscillants mais localisés dans le temps, à la différence des ondes éternelles de Fourier. Tous ces signaux élémentaires ont même forme et ne diffèrent que par leur instant d'apparition et leur durée. L'analyse en ondelettes offre donc la possibilité de suivre l'évolution d'un signal au cours du temps mais aussi, en considérant des signaux élémentaires de durée de plus en plus faible, de se focaliser sur des instants précis à la manière d'un « microscope mathématique ».

L'esprit de la transformation de Wigner-Ville est différent en ce sens qu'elle cherche en premier lieu à répartir l'énergie d'un signal simultanément en temps et en fréquence. Mathématiquement, elle est construite comme valeur moyenne d'un opérateur de symétrie dans le plan temps-fréquence. En d'autres termes, son évaluation en un point du plan est une mesure du degré de symétrie temps-fréquence que possède un signal autour de ce point. Il en résulte une très bonne localisation de la représentation, améliorant de façon significative les résultats que peuvent fournir les méthodes plus classiques adaptées de l'analyse de Fourier.

► L'émergence des ondelettes

La transformation en ondelettes (voir encadré) a été utilisée en mathématiques depuis les années 30, sous le nom de décomposition de Littlewood-Paley. C'est l'unique méthode d'analyse permettant d'accéder aux propriétés instantanées de régularité ou d'irrégularité (exposants fractaux, par exemple) d'une fonction, ce qui explique que la transformation en ondelettes soit l'outil privilégié pour analyser les structures fractales ou la turbulence. L'idée de base de la transformation en ondelettes a refait surface plus récemment grâce aux travaux des physiciens J. Morlet et A. Grossmann. Parallèlement, en traitement numérique du signal et de l'image, une variante de la transformation en on-

delettes s'est introduite, depuis quinze ans environ, sous le nom de codage en sous-bandes ou de filtres miroirs en quadrature. Il s'agit d'un algorithme discret que l'on utilise dans des problèmes de compression et qui se relie naturellement aux bases orthonormées d'ondelettes. A la différence des méthodes temps-fréquence, la transformation en ondelettes ne fournit pas directement une « fréquence instantanée » mais elle renseigne sur l'importance des « fluctuations instantanées ».

Les représentations temps-fréquence et temps-échelle permettent également d'associer à un signal une signature susceptible de se prêter à des tâches de reconnaissance ou de classification. Il est clair que l'information présente dans

les signaux temporels n'est pas augmentée en passant dans le plan transformé. Le changement d'espace de représentation permet cependant, par l'utilisation de deux dimensions, de mieux visualiser cette information en la concentrant sur les structures importantes, et physiquement significatives, du signal.

■ Patrick Flandrin, chargé de recherche au CNRS, Ecole normale supérieure de Lyon, Laboratoire de physique, 46, allée d'Italie, 69364 Lyon Cedex 07.

■ Yves Meyer, professeur à l'Université Paris-Dauphine, directeur du Centre de recherche de mathématique de la décision (URA 749 CNRS), Université Paris-Dauphine, 75775 Paris Cedex 16.

Caractérisation fine de bruits moteur

La réduction du bruit des moteurs nécessite une caractérisation fine des mécanismes de génération et de propagation des vibrations. L'analyse temps-fréquence est une façon d'y parvenir.

■ Monique Chiollaz,
Bernard Favre

Le moteur automobile à combustion interne est une source de bruit complexe, dont la maîtrise est une préoccupation majeure de l'industrie automobile. Aujourd'hui, la recherche de niveaux sonores réduits implique une identification très précise des mécanismes de génération et de propagation des sollicitations dynamiques au sein de la structure moteur. Ces mécanismes ont leur siège dans le carter cylindre et sont à l'origine de bruits en moyenne et haute fréquences (500 Hz à 3 000 Hz).

Engine noise characterization - Time-frequency analysis of vibration signals picked up on the external and internal structure of an engine cylinder enables us to link every event observed in the time frequency plane to one excitation source. Afterwards, it is possible to quantify the part of each excitation mechanism in the vibration energy emitted towards the outside structure.

Les principales sources d'excitation sont : le choc de pression dû à la combustion qui se propage suivant une voie directe (paroi du cylindre-culasse) et suivant deux autres voies : transversale (jupe de piston-cylindre), verticale (piston-bielle-paliers-jupe du carter-cylindre) ; les excitations dues au mouvement du piston : forces de frottement, chocs dus au basculement du piston autour de son axe de rotation.

L'auscultation d'un moteur diesel

Un moteur diesel d'automobile a été instrumenté en condition de fonctionnement réel par un ensemble de capteurs de pression et d'accélération placés sur l'un des cylindres, dans la chambre de combustion, l'équipage mobile (piston, bielle) et le carter. Les signaux issus de ces capteurs permettent d'analyser les différentes sources d'excitation et les différentes voies de propagation. Ils présentent des caractéristiques complexes : de nature transitoire, ils résultent de la superposition des réponses vibratoires de la structure aux diverses sources précitées.

L'analyse temporelle de ces signaux permet d'extraire des informations pertinentes sur la cinématique de l'équipage mobile. L'analyse fréquentielle permet d'identifier des fréquences caractéristiques des modes de différentes parties de la structure. Ces deux types d'analyse sont cependant insuffisants pour reconstituer de manière fine l'enchaînement des mécanismes d'excitation et de transfert, car il y a superposition temporelle et/ou fréquentielle des événements.

Les méthodes d'analyse temps-fréquence développées depuis une dizaine d'années pour l'étude des signaux non-stationnaires (signaux dont le contenu fréquentiel ou les propriétés statistiques évoluent au cours du temps) sont un bon outil pour décrire, en fonction du temps, le contenu fréquentiel d'un signal transitoire : elles permettent de localiser et séparer dans le plan temps-fréquence plusieurs motifs se superposant en temps et/ou en fréquence.

Grâce en particulier à sa haute résolution en temps et en fréquence, c'est la transformation de Wigner-Ville qui a été choisie pour l'analyse des signaux. Elle fournit une distribution de l'énergie du signal dans le plan temps-fréquence. Une signature temps-fréquence est ainsi associée à chaque point de mesure du moteur. Les motifs observés sont attribués à des événements caractérisés par leur date d'arrivée, leurs fréquences prépondérantes, des résonances éventuelles.

En comparant ces informations pour les différents points de la structure, on relie chaque événement à une source d'excitation (voir figure), et on détermine par une mesure locale d'énergie sa

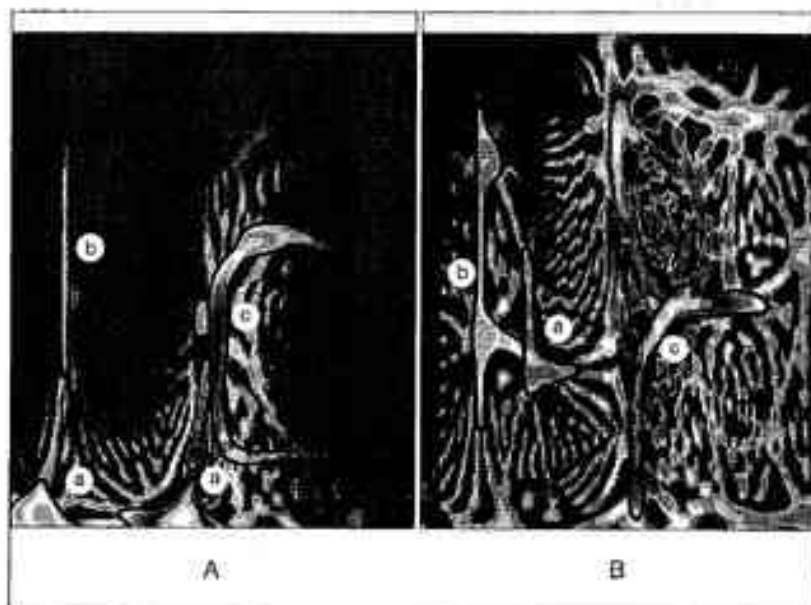


Figure 1. Comparaison des images temps-fréquence de signaux issus de capteurs de vibration placés dans un cylindre de moteur. A: haut du piston (proche des sources d'excitation), B: bas de jupe carter cylindre (structure externe du moteur). (a): chocs de basculement du piston, (b): passage au point mort haut, (c): combustion. Image codée en échelle logarithmique (30 dB, code géographique). Entourée d'un trait plein: la signature temps-fréquence en basse et moyenne fréquences. L'axe vertical correspond à 10 kHz, l'axe horizontal à 12,5 ms.

part respective dans l'énergie vibratoire rayonnée vers la structure externe du moteur.

Cette analyse a pu ainsi apporter de précieux éléments de diagnostic et d'identification :

- comprendre l'enchaînement chronologique des mécanismes d'excitation et de propagation,
- identifier l'instant d'implication et le rôle de certaines structures dont nous connaissons par ailleurs les fréquences modales,
- évaluer la contribution énergétique respective des différentes sources de bruit.

Cette méthode permet donc de traiter le cas de sources sonores complexes, de caractéristiques fortement non-stationnaires, non-linéaires, avec des mécanismes d'excitation et de transferts multiples, et constitue un outil apprécié pour résoudre des problèmes d'acoustique industrielle.

■ Monique Chiollat, ingénieur de recherche à l'ICP, responsable adjoint du Laboratoire de traitement du signal (URA 346-CNRS), ICP, 31, place Bellecour, 69288 Lyon Cedex 02.

■ Bernard Favre, chef du Groupe de recherche «acoustique, confort, ergonomie», Renault, Direction de la recherche, 9-11, avenue du 18-Juin 40, 92500 Rosell-Malmaison.

Jouer sur le temps, jouer sur la fréquence

Séparer les aspects temporels et fréquentiels d'un signal sonore – ce que fait spontanément notre système auditif – peut permettre des modifications intimes du signal avant sa resynthèse. Ceci intéresse les musiciens.

■ Daniel Arfib,
Richard Kronland-Martinet

L'exploration des modifications de signaux sonores peut soit s'effectuer sur le son lui-même (filtrage, réverbération, mixage), soit nécessiter la séparation des aspects temporels et fréquentiels, ce que notre système auditif fait spontanément. Des modifications intimes d'un signal sonore peuvent être obtenues en combinant une analyse temps-fréquence fournissant une fonction bi-dimensionnelle,

une modification de cette dernière, et une resynthèse d'un nouveau signal sonore.

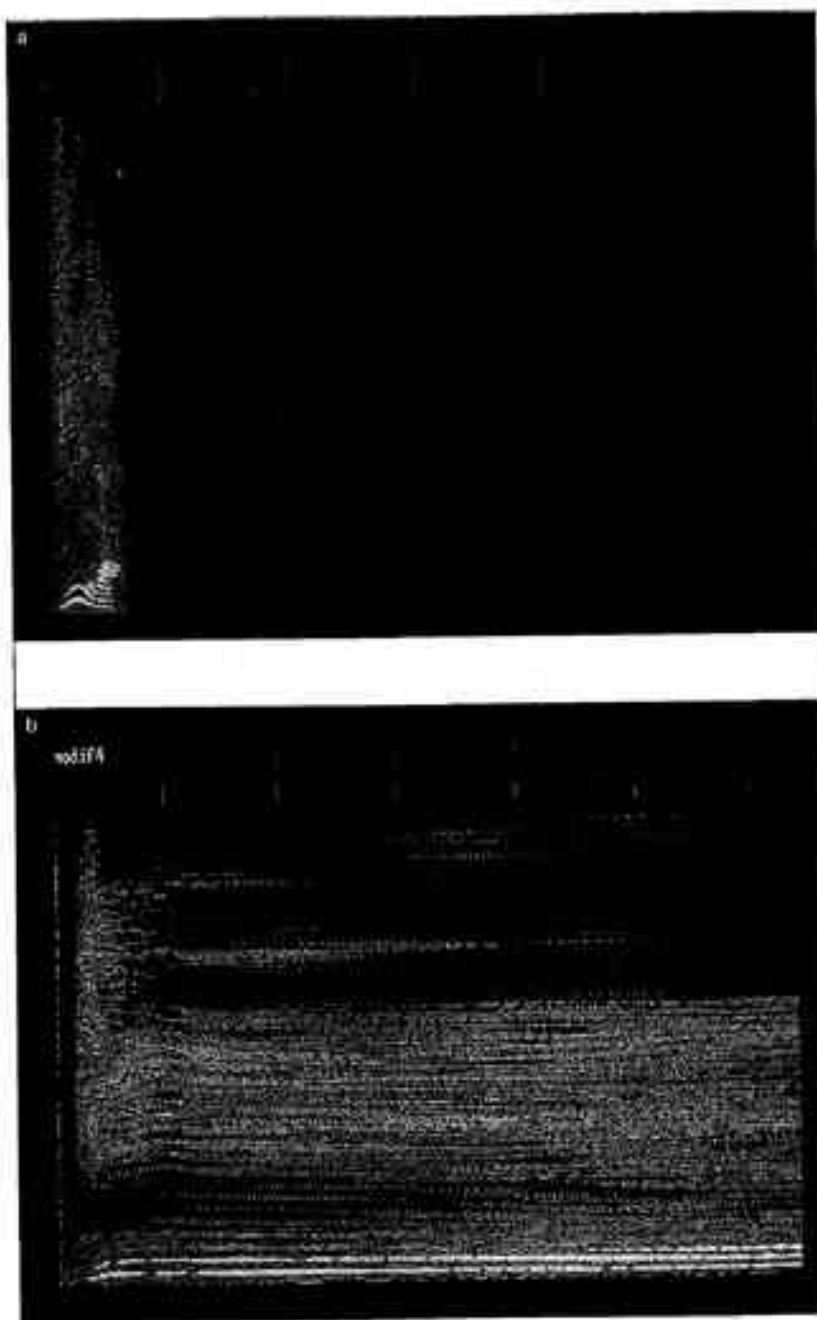
Pour choisir les paramètres de l'analyse-synthèse, il est important de prendre en compte un certain nombre de données psychoacoustiques. À titre d'exemple, le système auditif peut traiter différemment des signaux acoustiques de même nature. C'est ainsi que selon la fréquence des composantes, une somme de deux sinusoïdes peut être perçue soit comme un son composé de deux éléments distincts, soit comme un son unique dont l'amplitude varie au cours du temps. La distinction «événement tem-

Modifications of sound signals through linear time-frequency representations – Sounding signals analysis and resynthesis can be performed with time-frequency methods of representation. They associate an image to these signals the deformation of which leads to the production of new sounds that can have a lot of musical applications.

poriel-événement fréquentiel» repose donc essentiellement sur des critères psychoacoustiques.

Analyse et resynthèse

L'analyse est basée sur l'utilisation de méthodes de représentation assurant la resynthèse exacte du signal sonore. Elles doivent permettre de distinguer les évolutions temporelles et fréquentielles du signal sonore. Les représentations les plus utilisées associent au signal une «image» où l'axe horizontal représente le temps et l'axe vertical une grandeur associée à la fréquence (voir figure). Nos travaux s'appuient sur des transformations linéaires à α et β constants, ►



Représentation temps-fréquence du mot « gira », obtenue par transformée de Fourier à court terme. Seul le module de la transformée est représenté. La première image (a) correspond au son original, la deuxième (b) représente, avec la même échelle de temps, une partie du signal après étirement d'un facteur 128 et filtrage par « noyau reproduisant ». Le son ainsi obtenu correspond à un ralentissement sans transposition.

► respectivement Fourier à court terme (Gabor) et transformée en ondelettes. Ces deux transformations ont des similarités évidentes : leurs coefficients sont obtenus par produit scalaire entre le signal sonore et une famille de « grains d'analyse ». La différence essentielle re-

pose dans la construction de ces derniers : les « grains ondelettes » sont obtenus par dilatation et translation d'une ondelette analysante alors que les « grains de Gabor » sont des versions translatées en fréquence et en temps d'une fonction de référence.

Il est possible d'effectuer une resynthèse du son à partir d'une analyse par transformée de Gabor ou par transformée en ondelettes, si l'on connaît leurs coefficients sur une grille ad hoc (rectangulaire pour Gabor et dyadique pour les ondelettes). Cette resynthèse consiste en la sommation des grains correspondant à cette grille, pondérés par des valeurs d'amplitude et de phase correspondant aux coefficients de la transformée. La forme de ces grains de resynthèse peut être, suivant les cas, identique ou non à celle des grains d'analyse.

Relation entre image et son

Une transformation temps-fréquence fait correspondre une fonction bidimensionnelle unique à un signal sonore donné. Cette fonction est à valeur complexe et peut être représentée par deux images communément appelées module et phase de la transformée. Par contre, toute fonction bidimensionnelle n'est pas nécessairement la transformée d'un son : elle doit satisfaire l'équation dite au « noyau reproduisant », qui impose des contraintes locales aux images. Ce mode de filtrage permet d'associer à une image arbitraire une fonction qui est la transformée d'un son.

La déformation arbitraire d'une image conduit à la resynthèse d'un son dont la transformée est la version filtrée de cette image arbitraire par noyau reproduisant. Ce type d'étude joue donc un rôle primordial pour la prévision des modifications effectivement réalisées : il est directement relié aux paramètres de l'analyse (choix de l'ondelette ou de la fenêtre de pondération).

Temps-fréquence et informatique musicale

Les applications musicales de ces modifications sonores sont nombreuses. Citons par exemple le ralentissement sans transposition d'un son ou l'hybridation de sons obtenue par combinaison d'images provenant de sons différents. Ces modifications ne sont évidemment pas les seules possibles, mais elles ouvrent une nouvelle voie pour l'expérimentation musicale et sonore. De plus, le formalisme mathématique permet de mieux comprendre le pourquoi et le comment de certaines pratiques usuelles en informatique musicale.

■ Daniel Artib, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de mécanique et d'acoustique (UPR 7051 CNRS).

■ Richard Kronland-Martinet, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de mécanique et d'acoustique (UPR 7051 CNRS), 31, chemin Joseph Alquier, 13402 Marseille Cedex 09.

La structure du plasma de l'ionosphère

L'analyse spectrale par ondelettes permet de résoudre la structure fine des champs électromagnétiques turbulents de l'ionosphère terrestre.

Jean-Claude Cerisier,
Bruno Forget,
Dominique Lagoutte,
Jean-Paul Villain

L'environnement ionisé proche ou lointain de la Terre et des autres planètes du système solaire est généralement hors d'équilibre. Ces milieux sont le lieu d'émissions électromagnétiques intenses et présentent une structure turbulente couvrant une large gamme d'échelles spatiales et temporelles. C'est le cas en particulier de la partie externe de la magnétosphère terrestre et de l'ionosphère des régions polaires qui lui est connectée par les lignes de force du champ magnétique.

Par opposition à une analyse spectrale classique par transformée de Fourier, l'analyse en ondelettes permet d'optimiser au mieux, à chaque fréquence, le compromis entre résolution temporelle et résolution fréquentielle imposé par le principe d'incertitude (voir l'article de P. Flandrin & Y. Meyer). L'utilisation d'une ondelette dite de Morlet revient à considérer une fenêtre temporelle gaussienne, de durée proportionnelle à l'échelle temporelle que l'on cherche à mettre en évidence. L'ondelette de Morlet a pour expression :

$$g_a(t) = a^{-1/2} e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/(2a^2)}$$

où ω_0 est une constante. Le coefficient de la transformée du signal $s(t)$ à l'instant b et pour l'échelle a est :

$$C_{a,b} = \int s(t) g_a(b-t) dt$$

La résolution en fréquence $\Delta\nu$ est alors proportionnelle à la fréquence $\nu = \omega_0/2\pi$ d'analyse et la résolution temporelle Δt est inversement proportionnelle à cette même fréquence.

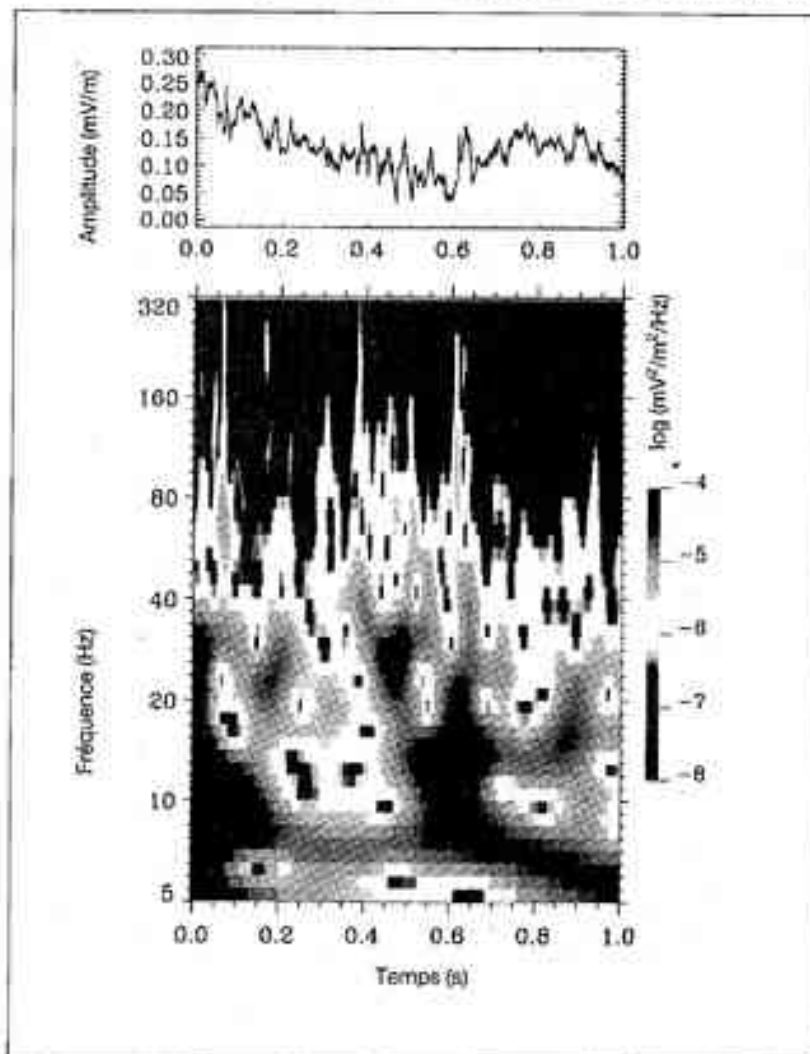
Ionosphere plasma structure studied by wavelet analysis - Electromagnetic waves measured in planetary plasma environments are often nonstationary. The wavelet analysis, applied to the turbulent electric field and plasma density measured in the earth ionosphere, reveals that the spatial structure of the turbulence is very inhomogeneous at all wavelengths.

En direct d'Aureol-3

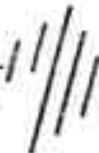
Dans l'exemple ci-dessous, les données analysées sont une composante du champ électrique turbulent et les fluctuations simultanées de la concentration électronique dans le plasma ionosphérique. Elles ont été mesurées à une altitude de 410 km dans les régions de haute

latitude, par les sondes embarquées à bord du satellite franco-soviétique *Aureol-3* en orbite autour de la Terre.

Le module de la transformée en ondelettes du champ électrique est représenté sur la figure pour une durée de mesure de 1 s. Au-dessus, on a représenté la forme d'onde du signal analysé. On remarque sur cette figure l'existence de structures verticales relativement étroites et qui se rétrécissent quand la fréquence augmente. Ceci signifie que pour chaque fréquence, la durée d'un événement ne dépasse pas quelques périodes, et même probablement moins, dans la mesure où la résolution temporelle de l'analyse en ondelettes est atteinte. On sait par ailleurs que les variations observées peuvent être interprétées comme purement spatiales.



Forme d'onde (haut de la figure) et module de la transformée en ondelettes (bas de la figure) d'une composante du champ électrique mesuré dans l'ionosphère terrestre. La finesse des structures verticales est à la limite de la résolution de l'analyse, ce qui indique la faible cohérence spatio-temporelle de la turbulence.



► le satellite traversant une structure statique dans le plasma. Une seconde correspond alors à une distance horizontale de 8 km. Dans ces conditions, les résultats précédents montrent qu'il s'agit de structures d'autant plus localisées que leur longueur d'onde est plus faible. Pour la densité électronique, la répartition du signal dans l'espace temps-fréquence est très similaire à celle obtenue pour le champ électrique, alors que leurs formes d'ondes ne présentent guère de ressemblance.

On peut également caractériser la turbulence en comparant entre elles les transformées du champ électrique et de la concentration électronique. Le rapport des modules varie beaucoup moins que l'amplitude propre de chaque composante. Plus faible aux basses fréquences, il tend à croître vers les fréquences élevées. La différence de phase présente de grandes plages de stationnarité, ce qui conforte également l'idée que les fluctuations des deux grandeurs procèdent du même phénomène physique. Cependant, la variation du rapport des modules et de la différence des phases en fonction de la fréquence et du temps est importante, ce qui semble indiquer qu'il n'existe pas de valeur « standard » de la relation instantanée entre ces paramètres, comme ce serait le cas dans une théorie linéaire de l'instabilité.

L'analyse en ondelettes permet donc de résoudre la structure fine de la turbulence du plasma ionosphérique, turbulence qui est une limitation à la qualité des télécommunications spatiales. Lorsque l'on dispose de plusieurs composantes d'un champ vectoriel, l'analyse en ondelettes se prête également bien aux études de polarisation. L'analyse en ondelettes s'avère donc être un outil riche de potentialités pour l'analyse et l'interprétation des phénomènes se produisant dans l'environnement ionisé de la Terre et des planètes.

■ Jean-Claude Cervier, professeur à l'Université Paris VI, chef du département EMI au Centre de recherches en physique de l'environnement (UMR 119 CNRS-CNET).

■ Bruno Forget, allocataire MRT, Centre de recherches en physique de l'environnement (UMR 119 CNRS-CNET), 4, avenue de Neptune, 94107 Saint-Maur-des-Fossés Cedex.

■ Dominique Lagoutte, ingénieur d'études au CNRS, Laboratoire de physique et chimie de l'environnement (UPR 4010 CNRS).

■ Jean-Paul Villain, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de physique et chimie de l'environnement (UPR 4010 CNRS), 3A, avenue de la recherche scientifique, 45071 Orléans Cedex 2.

Images : représentations et modèles

Modèles et représentations sont étroitement liés à chacune des étapes du traitement de l'image, compte tenu de la finalité et des informations portées par l'image elle-même.

■ Jean-Marc Chassery

Une image constitue un support d'information intervenant dans un grand nombre de secteurs d'activité aussi bien sur le plan des applications que sur celui des domaines de recherche. Ce support est souvent associé à un système perceptif visuel, mais il est de plus en plus courant d'intégrer sous le terme d'image une information multi-dimensionnelle fournie par un capteur dont la mesure traduit un phénomène physique. C'est le cas des images acoustiques ou des images infra-rouges.

Modéliser des tâches innées pour l'homme

Le traitement de l'image peut alors être introduit comme un processus permettant de percevoir, de découvrir, de comprendre et de reconnaître l'environnement. Si de telles tâches sont innées pour l'homme, elles nécessitent la conception de perception, la définition de modèles mathématiques et le développement d'environnements informatiques de traitement de l'information.

Chacune de ces étapes implique l'élaboration de modèles en vue de représenter l'information à extraire. Ce sont essentiellement les modèles numériques, les modèles géométriques et les modèles hiérarchiques qui sont sollicités pour le traitement de l'image.

Les modèles numériques mettent en valeur, d'une part, la représentation algébrique de l'image en terme de matrice et, d'autre part, la représentation fonctionnelle de l'image en terme de surfaces, voire même de volumes. Le choix d'un modèle numérique est souvent associé à l'apport de la méthodologie développée en signal uni-dimensionnel et

les traitements mis en œuvre recouvrent largement ceux du filtrage spatial et de l'analyse spectrale. Les travaux en amélioration d'images et en restauration illustrent largement l'exploitation de tels modèles. Au travers des différents articles de ce numéro, différentes illustrations de l'exploitation des modèles numériques sont présentées.

La structure perceptive dans l'image

Avec la mise en œuvre de modèles géométriques, on aborde le concept de structure perceptive dans l'image. Un exemple de telle structure peut être illustré par une région de l'image ou un contour identifié par la présence de ruptures également appelées frontières. La modélisation géométrique permet de représenter ces structures en terme de formes, d'objets, et leur exploitation permet de partitionner l'image par un processus de segmentation (voir l'article de J.-P. Cocquerez). La modélisation géométrique est également étroitement liée au problème de la phase descriptive pour la génération de paramètres explicites en reconnaissance des formes. La figure 1 illustre un exemple d'exploitation de tels modèles géométriques où la prise en compte des spécifications des différents constituants d'un modèle de visage permet d'adapter des traitements à leur localisation.

L'introduction de modèles hiérarchiques réside dans le fait que, contrairement au signal uni-dimensionnel où la variable est souvent liée à l'échelle temporelle permettant de traduire les concepts de passé et de futur, l'image peut être ordonnée selon une échelle liée au concept de résolution. C'est ainsi qu'un effet de grandissement permet de concevoir la notion d'ordre en terme de détails apparaissant à partir d'un niveau de résolution suffisant. Avec les modèles hiérarchiques, l'image est alors représentée par des pyramides ou des graphes introduisant la possibilité de visibilité à différents niveaux d'échelle de résolution. La figure 2 illustre l'intérêt d'une telle représentation multi-échelle.

Modèles et représentations sont en

Images : modelling and representation - Images define an information support for which we need to identify data representation modes in strong relationship with processing models. Different representation modes and associated processings are illustrated.



Fig. 1 - L'image d'un visage peut être analysée sur la base d'une représentation géométrique des différentes entités constituant un modèle de visage. L'association de la représentation numérique et de la représentation géométrique permet de cibler les formes à identifier.

Fig. 2 - Illustration d'une représentation hiérarchique d'une image utilisant la transformation en ondelettes. Chaque niveau de résolution permet de focaliser et d'identifier des détails qui y sont associés.

étroite relation et leur choix combiné fait l'objet d'activités de recherche incluant des critères liés à la connaissance de la nature de la scène observée ainsi qu'à la connaissance des outils mis en œuvre pour le traitement et l'analyse. On parle de stratégie visant à adapter au mieux le modèle et la représentation, compte tenu de la finalité et des infor-

mations portées par l'image.

C'est ainsi que l'on peut fournir à l'ordinateur une stratégie de perception, de focalisation sur des zones d'intérêt, de détection de structures pertinentes et d'identification d'objets. L'exploitation de modèles de structures sur la base d'une représentation numérique, voire même symbolique, permet de

comprendre le contenu de l'image de façon à aboutir à l'interprétation.

■ Jean-Marc Chassery, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire « techniques de l'informatique, des mathématiques, de la microélectronique et de la microscopie quantitative » (USR 69 CNRS), Institut IMAG, INPG-UIF Grenoble, BP 53X, 38041 Grenoble Cedex.

La distribution des galaxies dans l'Univers

L'analyse en ondelettes permet d'identifier tous les éléments imbriqués dans une organisation hiérarchique. Appliquée aux galaxies, elle conduit à renouveler notre point de vue sur le concept d'homogénéité de l'Univers.

■ Albert Bijaoui,
Eric Slezak

L'étude de la distribution des galaxies dans l'Univers constitue un des éléments importants de la cosmologie observationnelle. Alors que le modèle classique du Big Bang

suppose que la répartition de la matière est uniforme, l'analyse des catalogues de galaxies montre l'existence d'une grande hétérogénéité, quelle que soit l'échelle étudiée.

Depuis une dizaine d'années, d'importants comptages de galaxies ont été réalisés visuellement ou par analyse automatique d'images. Des mesures systématiques de vitesse radiale ont per-

Galaxies distribution and wavelet analysis - The analysis of the catalogues of galaxies shows a large heterogeneity in the distribution of the luminous matter in the Universe. The classical statistical indicators are not able to describe the related stochastic process. The results obtained on fractal structures with the wavelet transform led us to develop a method achieving the detection, the measure, the restoration and the classification of elements in a hierarchical distribution of points. Bringing a measure of the contrast of density in function of the scale and leading to quantitative values of the heterogeneity, this analysis renews the concept of homogeneity.

mis en outre d'obtenir la distance d'un grand nombre de galaxies par l'intermédiaire de la loi de Hubble. L'étude de ▶

► ces catalogues à deux ou trois dimensions montre l'insuffisance des fonctions de corrélation pour décrire le processus stochastique associé à la distribution de matière lumineuse dans l'Univers. Des structures apparaissent de fait à des échelles de l'ordre de 100 megaparsec, très supérieures à la dimension des amas de galaxies : superamas, filaments, feuillets, vides, etc. La description de l'Univers nécessite donc d'identifier

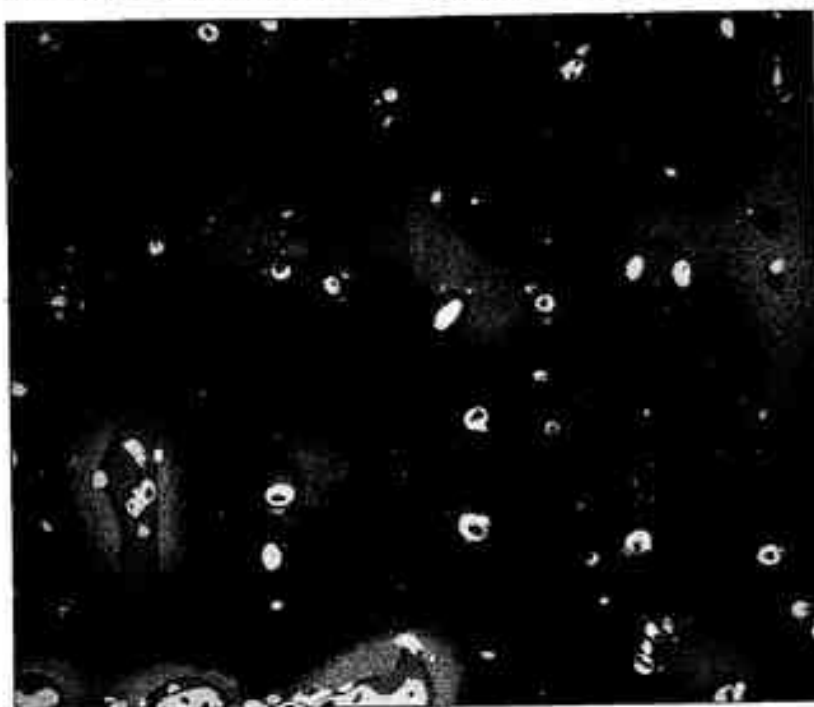
tous les éléments imbriqués dans une organisation hiérarchique allant des galaxies individuelles jusqu'aux plus grandes entités.

L'homogénéité de l'Univers en question

Les résultats obtenus par A. Arnéodo, M. Holdschneider et leurs collaborateurs sur l'étude des structures fracta-

les nous ont amenés à employer l'analyse en ondelettes pour étudier la répartition des galaxies. Nous avons ainsi construit un premier logiciel permettant d'extraire les structures statistiquement significatives dans une distribution de points. En appliquant cet outil sur un comptage de galaxies que nous avions réalisé dans la constellation de Coma, nous avons pu identifier un ensemble de structures correspondant à un excès (amas) ou à un défaut (vides) de densité. Actuellement, nous affinons la méthode afin d'obtenir la détection, la reconstruction, la mesure et la reconnaissance des différents éléments structuraux présents à partir des coefficients de la transformée en ondelettes.

Au-delà de l'aspect technique du traitement de l'information, cette analyse renouvelle notre point de vue sur le concept d'homogénéité. La théorie classique du Big Bang est en effet basée sur un univers homogène. Or, l'existence des fluctuations indispensables à la formation des galaxies et des différentes structures en reste toujours un des points faibles, même s'il existe des scénarios permettant d'interpréter les données. L'analyse en ondelettes conduit à une mesure du contraste de matière en fonction de l'échelle, contraste dont la dispersion permet de quantifier l'hétérogénéité.



Hierarchie des structures observées à partir d'un comptage de galaxies dans la constellation de la Chevelure de Bérénice. On ne visualise en fausses couleurs que les coefficients en ondelettes dont le degré de signification statistique est supérieur à 99,9% pour quatre échelles croissant du rouge au jaune, vert, et cyan.

■ Albert Bijaoui, astronome à l'Observatoire de la Côte d'Azur, Unité « astrophysique et méthodes observationnelles » (URA 1361 CNRS).

■ Eric Slezak, astronome adjoint à l'Observatoire de la Côte d'Azur, Unité « astrophysique et méthodes observationnelles » (URA 1361 CNRS), Université de Nice, BP 139, 06003 Nice Cedex.

Le traitement des objets

Il est maintenant possible de traiter les objets en 3D comme on traite les images planes ou les signaux : un champ de recherche stimulé par la demande industrielle.

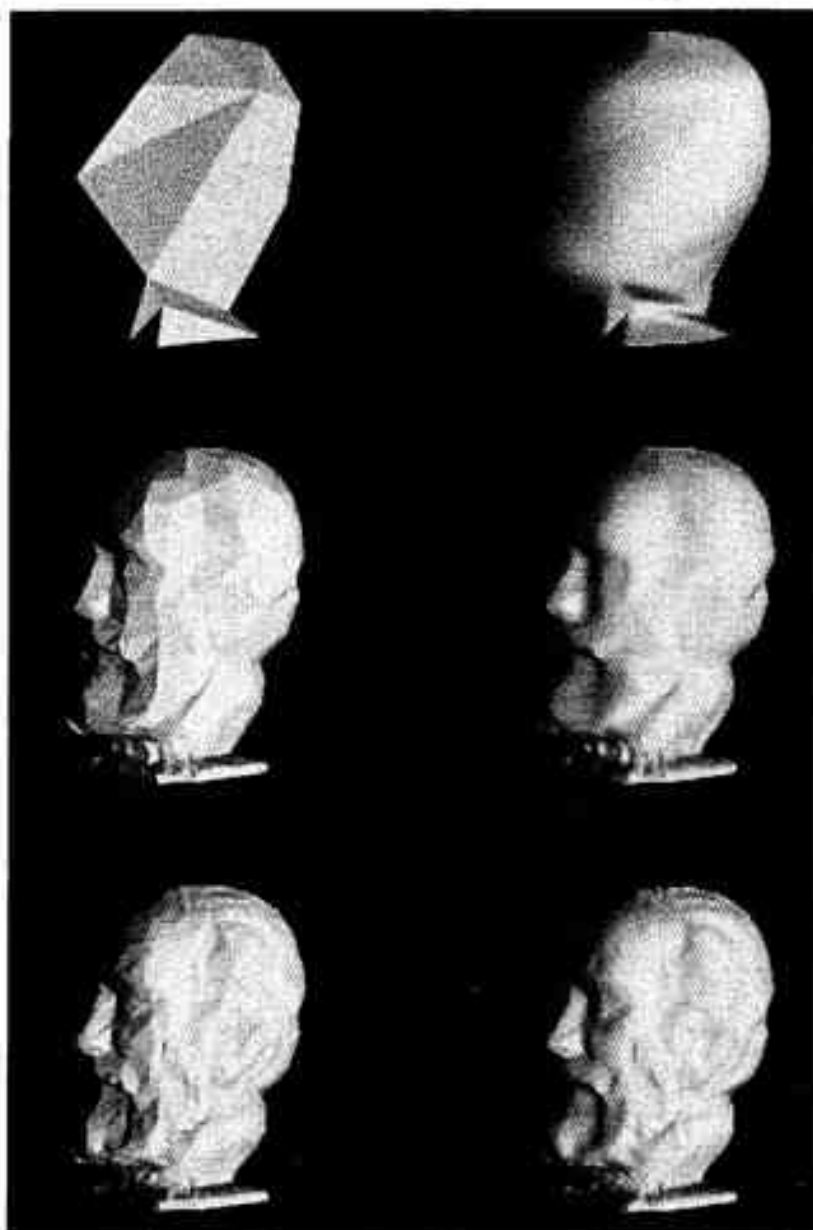
■ Henri Maître

Après avoir maîtrisé ses méthodes et ses outils pendant une vingtaine d'années, le traitement des images s'est tourné vers des champs

nouveaux qui échappaient à la logique du traitement bidimensionnel : le traitement des formes tridimensionnelles. A l'opposé de la démarche adoptée en synthèse des images (une autre technique pour manipuler, décrire et représenter

Object processing - It is possible, nowadays, to process objects in the 3D world in the same way as planar images are processed. This domain in drastic expansion is stimulated by an increasing demand from industry for robot vision as well as quality control.

l'Univers et l'espace), qui privilégie la phase de création, le traitement des objets, comme on convient souvent de l'appeler, s'impose de travailler sur des formes réelles, celles que la nature met à notre disposition, ou celles, artifi-



Un buste de Victor Hugo a été saisi par triangulation active, puis des représentations plus ou moins précises en sont faites par des recouvrements polynomiaux. (Cliché F. Schmitt et W. Du).

cielles, que l'homme crée par ses industries.

Comment représenter les objets ?

Du traitement des images, le traitement des objets garde la pratique de grands tableaux de mesures, données individuellement pauvres et bruitées, d'où émergent par associations de pas élémentaires, des informations un peu plus riches : arêtes, facettes, etc. Celles-ci

sont à leur tour combinées en composantes de niveaux plus élevés qui permettent alors une reconnaissance de l'objet.

Mais le traitement des images tire profit d'une représentation universelle qui convient à tous les types d'images. Il n'en est pas de même pour les objets pour lesquels de nombreuses représentations concurrentes ont été proposées : l'échantillonnage bien sûr, mais sur des maillages variés (cubique, rectangulaire, cylindrique, sphérique), les arbres

octaux, les cylindres généralisés, les facettes planes ou polynomiales, l'assemblage de composantes primitives, etc. Chaque représentation possède un champ d'objets qu'elle décrit de façon adéquate, mais aussi des champs d'applications privilégiés. Cette diversité peut être vue comme une richesse, ou comme un cloisonnement limitant le développement du traitement d'objets.

Stéréovision et triangulation

Acquérir des signaux qui décrivent les objets tridimensionnels avec une bonne précision est devenu une opération courante qui prend place aussi bien dans des opérations de robotique (saisie de pièces, déplacement d'un robot), que lors du contrôle de qualité en production, ou de la mesure dans le domaine médical par exemple. Les solutions les plus fréquemment utilisées sont la stéréovision automatique (qui a fait des progrès considérables depuis 10 ans), et la triangulation active qui utilise habituellement un faisceau laser pour balayer la scène, observée par ailleurs par une caméra. Des produits industriels apportent aujourd'hui des outils robustes et fiables qui se distinguent les uns des autres par leurs performances, leurs prix, et les applications auxquelles ils se rattachent : par exemple un système de conception assistée par ordinateur, ou un organe de mesure et de tri, ou une machine outil.

Les progrès essentiels dans le domaine du traitement s'appuient sur deux types de raisonnements : d'une part, le traitement du signal qui examine les propriétés locales des mesures pour détecter des informations noyées dans le bruit (c'est surtout la présence de discontinuités des surfaces ou des plans tangents, mais également des singularités des courbures) ; ensuite, le raisonnement géométrique qui permet de déduire des propriétés globales - ou régionales - à partir d'une logique propre aux objets à traiter : continuité et topologie des surfaces, parties cachées, etc.

Enfin, une meilleure compréhension des processus d'imagerie a permis la mise au point de techniques fiables de calibration qui autorisent des déductions quantitatives indispensables au contrôle de qualité par exemple.

■ Henri Maître, professeur à Télécom Paris, Département « Images », pôle C46, 46, rue Barrault, 75634 Paris Cedex 13.

CODER ET TRANSMETTRE

La communication, c'est l'un des maîtres mots de cette fin du XX^e siècle, presque un mot d'ordre diffusé par la presse, les médias, les psychanalistes et les responsables d'entreprise. Comme si, ayant satisfait les principaux besoins d'énergie qui formaient l'ossature de son organisation, la société tentait de se restructurer grâce à l'information. Mais, mises au pluriel, les communications, c'est aussi un ensemble de moyens techniques au service de la précédente, moyens qui doivent être particulièrement élaborés quand se rajoute le défi de la distance entre les interlocuteurs. Le traitement du signal y joue un rôle principal et déploie toute la panoplie de ses outils théoriques et matériels.

En communication(s), tout commence par une source et un destinataire qui veulent échanger de l'"information". Si chacun a une idée intuitive de cette notion d'information dans la vie de tous les jours, le concept scientifique correspondant a mis longtemps à émerger, et il aura fallu attendre les théories de Shannon vers 1945 pour qu'il prenne corps. Il faut admettre que la question est délicate, car la notion d'information n'est pas intrinsèque puisque sa valeur dépend de qui la reçoit. Il y a, de plus, qualité et



Satellite Météosat dans une salle blanche d'Aérospatiale à Cannes.
(© Aérospatiale).

quantité d'information puisque le même message peut provoquer chez son destinataire des réactions opposées. Dans les communications, on ne peut présager du contenu qualitatif attaché à l'information, et l'on concentre l'effort sur sa mesure quantitative et sa transmission. On dira qu'un message est d'autant plus informatif qu'il est improbable dans un contexte donné et l'on utilise le bit, élément binaire d'information, comme mesure. Le flux ou débit d'information est donc exprimé en bits par seconde.

Grâce aux progrès technologiques continus, les canaux de communication transmettent des débits de plus en plus importants. C'est ainsi que la fibre optique a supplanté, sur le plan des performances, les supports traditionnels. Mais c'était, cependant, compter sans l'appétit croissant à communiquer qui ne se contentant plus de la parole (64 Kbit/s), prétend non seulement transmettre l'image télévisuelle classique (216 Mbit/s) mais encore l'image animée de haute définition (1,9 Gbit/s) sur les canaux de télécommunications.

Dans cette course-poursuite, le traitement du signal contribue à deux objectifs majeurs : augmenter la capacité des canaux, et réduire le débit des sources.

Un canal de communication, qu'il soit simple paire de fils de cuivre, faisceau hertzien, satellite, câble coaxial ou fibre optique, est un milieu où se propage un phénomène physique, une onde, dont la mesure constitue un signal qui servira de support à l'information. Pour transmettre un message, il conviendra de marquer le signal porteur par une technique de modulation, la démodulation restituant le message à la réception par le destinataire. Mais cela serait ignorer les imperfections du canal et la volonté sans cesse renouve-

lée de le pousser à ses limites.

Tous les canaux se montrent impuissants à transmettre des signaux dont la variation temporelle est très rapide, alors même que ces signaux sont les plus porteurs d'information, imposant ainsi une contrainte de largeur de "bande passante". C'est en particulier le cas des images en mouvement. La volonté d'économiser l'énergie émise rend le signal vulnérable aux bruits, parasites et distorsions diverses. Les phénomènes de dispersion, d'absorption, les rencontres de trajets multiples occasionnent des évanouissements sélectifs considérables de la puissance du signal. Ces facteurs se révèlent cruciaux dans les transmissions ionosphériques, les communications urbaines mobiles, l'utilisation de canaux ultrasonores sous-marins.

Le remède est alors de généraliser les communications numériques en laissant ainsi le champ libre au traitement du signal. Selon cette approche, le message est codé selon un alphabet limité de symboles convenus, dont les représentations en termes de signal seront choisies suffisamment éloignées les unes des autres pour résister au bruit. Des contraintes sur les symboles et leur enchaînement introduisent une redondance de l'information – mais donc par là une réduction du débit efficace – et permettent de protéger le message et de corriger d'éventuelles erreurs (codage de canal).

Mais on peut encore espérer compenser la distorsion imposée par le canal, par un traitement judicieux du signal : soit synthétiser des si-

gnaux dont on sait qu'ils résisteront bien au type de distorsion rencontrée, soit remettre en forme les signaux reçus par un filtrage adaptatif adéquat. C'est le but des techniques d'égalisation adaptative.

Une autre idée couramment appliquée consiste à disperser le message sur des canaux contigus, en espérant que les distorsions encourues seront indépendantes. Des conditions judicieuses d'orthogonalité assureront la possibilité de reconstruire l'original malgré les pertes partielles.

De la même façon, on pourra disséminer géographiquement des capteurs et combiner leurs résultats pour former une "antenne" où le traitement du signal cohérent viendra remplacer les monstrueuses structures métalliques des techniques plus anciennes.

Ayant atteint les limites de capacité des canaux, l'idée vient de se retourner vers la source et d'en analyser le flot d'information (codage de source). Tout d'abord, il convient de constater que ces sources sont de natures et de débits divers : parole, image optique fixe ou animée, écrits, graphiques... mais également images calculées, données biomédicales, mesures de vibrations etc.

Il est légitime de croire que, pour ces sources naturelles, toute donnée n'est pas nécessaire à transmettre. Le signal possède souvent une redondance interne partielle qui ne contribue que peu à l'information. Par exemple, la parole dans les sons voisés voit se répéter des formes d'ondes analogues ; de

même, l'image couramment rencontrée en visiophonie d'un buste sur un fond fixe ne nécessite pas d'être transmise toutes les 20 ms. Il conviendra alors, pour réduire le débit, d'emmagasiner l'information reçue, de comparer les données nouvelles avec celles déjà acquises et de ne transmettre que celles qui correspondent à une véritable innovation.

Par ailleurs, toute donnée n'est pas utile à transmettre. Dans une application déterminée et face à un signal particulier, on peut en général désigner la part d'information pertinente qui, elle, devra être transmise, du reste qui sera considéré comme du bruit. Par exemple, en transmission de parole, il sera plus important de préserver le contenu sémantique, l'intelligibilité du message plutôt que l'identité du locuteur. Dans une autre application, l'authentification du locuteur, c'est l'identité qui primera. Les récepteurs de l'information, souvent l'oreille et l'œil humains, possèdent, eux-aussi, une bande passante limitée. On éliminera dans ce cas, avant transmission, les informations excédentaires.

On peut comprendre combien "communication", "codage" et "transmission" se situent au cœur même de la problématique du traitement du signal. Grâce à ces traitements élaborés, les communications s'effacent à nouveau pour laisser place à la communication personnelle riche et sans entrave.

Claude Guéguen,
directeur scientifique de Telecom
Paris, directeur du groupement de
recherche Traitement du signal et
images du CNRS

Codage et cryptographie ou comment protéger la transmission de l'information

A l'issue de sa transmission, il est nécessaire d'extraire l'information du bruit inconnu qui la perturbe. A l'inverse, il est souvent utile de dissimuler le message dans un « bruit » connu du seul destinataire.

Jean-Claude Bie

Le développement de nouveaux services de communications pose de façon cruciale le problème de la protection de la transmission de l'information, protection qui revêt deux aspects :

- contre les bruits : assurer une qualité de transmission et pour l'améliorer recourir au codage correcteur d'erreurs,
- contre les intrus : assurer la confidentialité grâce à la cryptographie.

Ces deux aspects peuvent paraître contradictoires, car dans le premier cas le traitement doit faciliter l'extraction du message dans un bruit inconnu afin que le destinataire en prenne connaissance, alors que dans le second il doit favoriser la dissimulation du message dans un « bruit » connu par le destinataire, de telle sorte que l'indiscret ne puisse le découvrir. Mais la théorie de l'information issue des travaux de Shannon à l'aube des années cinquante a permis d'appréhender ces problèmes sur une base commune.

Les techniques sont toutefois restées longtemps quelque peu ésotériques en raison non seulement de l'utilisation de mathématiques spécifiques, mais également par le caractère secret de certaines méthodes, l'emploi du chiffrement étant encore récemment assimilé à celui d'une arme de guerre. Leur impact est néanmoins très important dans les applications professionnelles ou scientifiques, télécommunications spatiales par exemple, mais aussi dans les réalisations ré-

centes du domaine grand-public avec les disques audio-numériques, la monétique et les cartes à puce, et la radiotéléphonie cellulaire.

Comment se protéger contre le bruit

Le bruit, phénomène rencontré dans toute transmission ou enregistrement, entraîne une dégradation de la qualité du signal exprimée par le taux d'erreur, rapport entre le nombre de bits faux et le nombre total de bits. Pour améliorer cette qualité, on peut augmenter la puissance du signal ou réduire celle du bruit, mais ceci peut être onéreux. En outre, l'augmentation de la puissance du signal par un utilisateur est parfois illusoire puisqu'elle peut se traduire par un brouillage accru pour les autres. Dans de nombreuses situations, un traitement du message au niveau binaire permet d'atteindre le même objectif plus efficacement.

Le codage correcteur repose sur l'introduction d'une redondance, c'est-à-dire de bits de contrôle calculés à partir des bits d'information. Elle semble aller à l'encontre du codage de source, mais la redondance artificielle sera plus efficace que la redondance naturelle, à débit supplémentaire donné, pour améliorer la qualité.

L'information est découpée en mots de K bits à partir desquels le codeur calcule $N-K$ bits de redondance. On construit ainsi un code de dimension K , de longueur N et de rendement K/N qui est un dictionnaire composé de 2^K mots de code.

Construire un bon code...

Le décodage est lié à l'observation suivante : si les erreurs modifient le mot de code en un mot qui n'appartient pas au dictionnaire, elles seront détectées et éventuellement corrigées. Pour construire un « bon » code, le critère d'optimisation est la minimisation de la probabilité d'erreur sur les mots. Ceci se traduit par la notion de distance de Hamming,

nombre de positions dans lesquelles diffèrent deux mots. Les codes ayant les meilleures capacités de correction seront ceux qui, pour une longueur et une dimension données, auront la distance minimale entre deux mots de code la plus grande.

... et décoder

Mais il ne suffit pas d'avoir un bon code, encore faut-il savoir le décoder ! Or la méthode générale, comparaison du mot reçu avec tous les mots de code et choix du plus proche, est inapplicable avec des codes courants : le nombre de calculs croît en 2^K , soit pour K égal à 100, 10^{30} opérations, ou avec une opération par nanoseconde, l'équivalent de $3,10^{13}$ années ! Tout l'art des spécialistes a porté sur la conception de décodages dont la complexité n'augmente plus exponentiellement avec K . Le calcul du « syndrome », symptôme de la maladie, les erreurs qui affectent la transmission, permet de faire simplement une détection, puisqu'une configuration d'erreurs est détectée s'il est non nul. Plusieurs stratégies sont ensuite possibles :

- une demande de retransmission du message, procédure ARQ « Automatic ReQuest » utilisée en transmission de données,
- un masquage des mots erronés par interpolation avec des mots corrects pour des échantillons de signal corrélés de parole ou d'image,
- et la correction.

Celle-ci est plus compliquée et fait appel à des propriétés supplémentaires du code. Parmi les résultats les plus remarquables, on retiendra le décodage algébrique des codes BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem) et Reed-Solomon, et le décodage suivant l'algorithme de Viterbi.

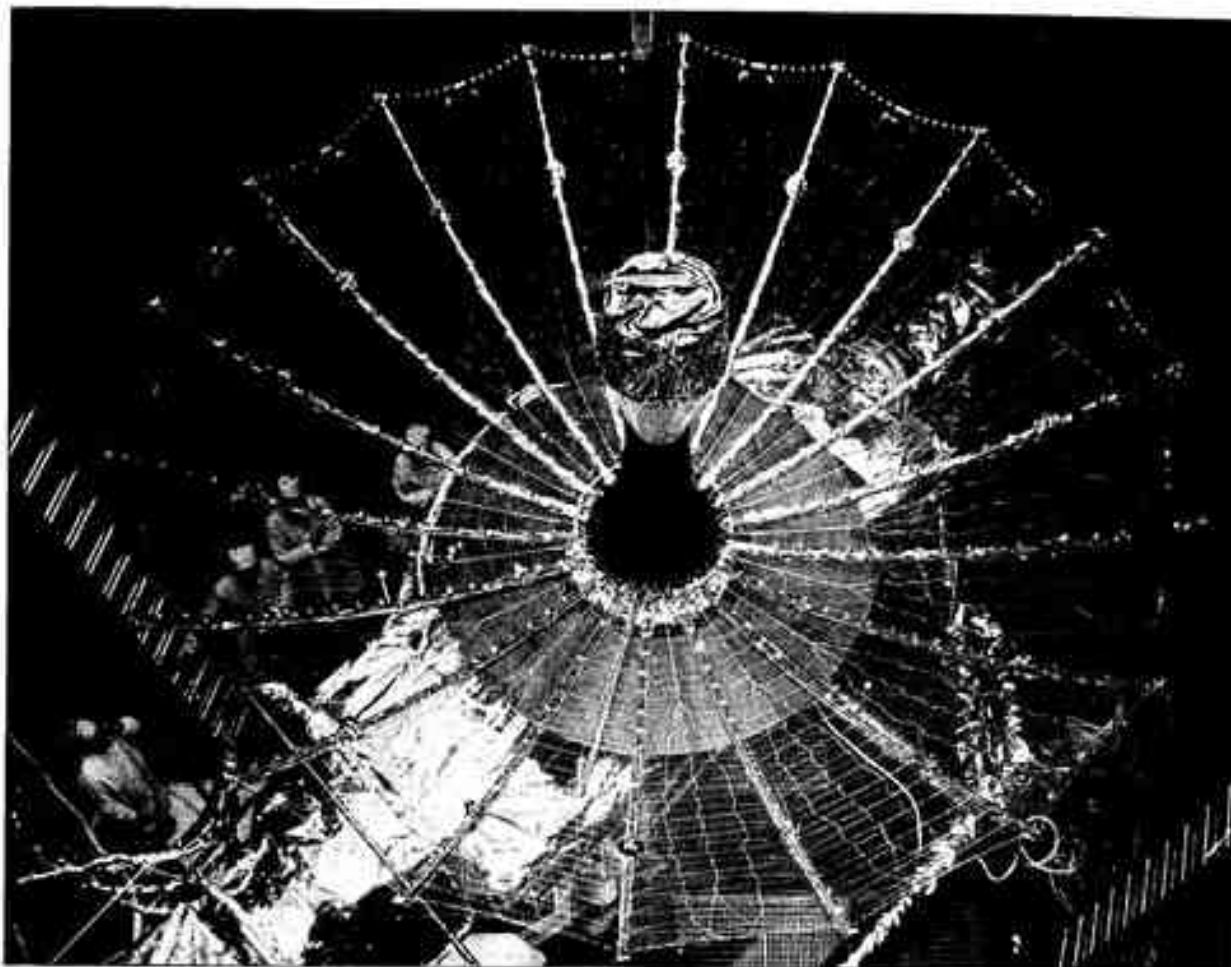
Pour terminer, citons deux applications :

- les disques audio-numériques utilisant deux codes de Reed-Solomon successifs avec un rendement global de 0,75, ce qui permet de réduire la probabilité d'erreur sur les octets de 10^{-4} à moins de 10^{-15} ,
- la transmission avec la sonde Galileo d'exploration de la planète Jupiter, associant décodages de Viterbi et de Reed-Solomon avec un rendement global faible de 0,2 ce qui, pour une même qualité, permet de gagner un facteur 10 sur la puissance à émettre.

Garder le secret

Le principe de la cryptographie, art d'écrire en caractères secrets qui permet de dissimuler une information confidentielle, remonte à la plus haute antiquité ; le message chiffré ou cryptogramme est calculé grâce à un algorithme associant

How to protect information transmission - In order to protect information transmission against noise perturbations and against unauthorized access, it is necessary, on one hand, to code the binary signal introducing some redundancy, and, on the other hand, not only to use an algorithm associating the information message with a key, but also to assure the confidentiality of the key.



Antenne embarquée à bord de la sonde interplanétaire Galilée d'exploration de Jupiter. L'intérêt du codage correcteur utilisé pour les transmissions numériques avec cette sonde se traduit par le fait qu'il permet d'obtenir, toutes choses égales par ailleurs, des signaux reçus de même qualité qu'avec une antenne d'un diamètre trois fois supérieur.

le message d'information, et une clé secrète qui n'est connue que de l'émetteur et du destinataire légitime. La sécurité du système repose sur la complexité de l'algorithme et sur la clé. Il n'existe pas de sécurité absolue, si ce n'est le *one-time pad* où la clé a la même longueur que le message et ne sert qu'une fois, et où le système doit assurer une sécurité compatible avec la valeur de l'information. De nombreux algorithmes, dits à clés secrètes, sont utilisés pour le chiffrement de l'information. L'algorithme DES (Data Encryption System) est le premier dont les détails ont fait l'objet d'une spécification publiée. La difficulté réside dans la transmission de la clé. Cela conduit à définir des systèmes complexes de distribution de clés hiérarchiques dans les réseaux multiutilisateurs.

De nouvelles solutions plus souples ont été élaborées, en particulier les algorithmes à clés publiques. La clé publique du destinataire, obtenue dans un an-

nuaire, sert à lui envoyer un cryptogramme tandis qu'une autre clé secrète en sa seule possession permet le déchiffrement, les deux clés dérivant d'un même élément secret. Le coût pour trouver la clé secrète à partir de la clé publique doit être dissuasif, ce qui impose des longueurs de clés de plusieurs centaines de bits. L'algorithme RSA (Rivest-Shamir-Adleman), un des plus célèbres, est fondé sur des propriétés de nombres premiers et de congruences.

La protection de la confidentialité recouvre d'autres aspects que celui du chiffrement conçu pour résister à une attaque passive. Les attaques actives, accès illégal à un réseau ou altération du contenu d'un message, sont déjouées par l'authentification du demandeur, la généralisation du mot de passe, et la certification du message, signature caractérisant le message et ne pouvant être reproduite.

Les applications civiles de la crypto-

graphie sont très nombreuses et les cartes à mémoire utilisées en monétique ou pour le contrôle d'accès, en sont l'exemple le plus répandu.

La protection de la transmission de l'information est un des sujets majeurs de la recherche dans le domaine du traitement du signal et de l'information. Son intervention dans la vie quotidienne est de plus en plus fréquente et, même si elle reste discrète pour l'utilisateur, elle fait appel aux algorithmes les plus élaborés et les plus performants.

■ Jean-Claude Bie, chef du département Electromagnétisme, théorie des communications et propagation au Centre de recherches en physique de l'environnement (UMR 118 CNRS-CNET), Centre national d'études des télécommunications, 38-40, rue du Général Leclerc, 92131 Ivry-les-Moinesaux.

Traitement adaptatif du signal en transmission

Les systèmes de transmission adaptatifs s'optimisent automatiquement à l'initialisation, poursuivent les variations de l'environnement et cela en temps réel. Ainsi récupère-t-on presque sans erreur, par exemple, des données brouillées par un canal radio.

Odile Macchi

Pour obtenir de bonnes performances dans un système de transmission, il est nécessaire d'adapter l'émetteur et le récepteur aux propriétés de l'environnement. Émetteur et récepteur doivent ainsi être optimisés en fonction des distorsions et des bruits imposés par le canal de transmission qui les relie et en fonction du type de signaux transmis. L'optimisation consiste à réaliser le traitement τ (d'émission et/ou de réception) qui à partir du flot $i(n)$ d'informations reçues (distordues et bruitées) régénère le signal désiré $d(n)$, idéalement le signal d'émission.

Les propriétés de l'adaptativité

L'adaptativité est caractérisée par trois propriétés majeures :

- d'une part, à l'initialisation du système, elle permet l'apprentissage automatique de l'optimalité en fonction de l'environnement. C'est la propriété d'acquisition qui évite les réglages manuels, gourmands en moyens humains, lors de l'installation et de chaque remise en route du système de transmission,
- en deuxième lieu, l'adaptativité assure l'optimisation en présence de fluctuations temporelles de l'environnement. C'est la propriété de poursuite qui est requise pour un fonctionnement sans coupures du système lors d'évolutions du contexte de la transmission,
- enfin l'optimisation adaptative réalise

Adaptive signal processing in transmission - Adaptive systems realize optimization of the emitting and/or receiving devices according to the transmission environment. They ensure automatic acquisition, tracking of time evolutions and real time implementation. In this way an unknown channel distortion can be corrected by adaptive equalization. These methods are implemented e.g. in digital radio telephone systems at very high bit rates with severe transmission conditions such as urban environment.

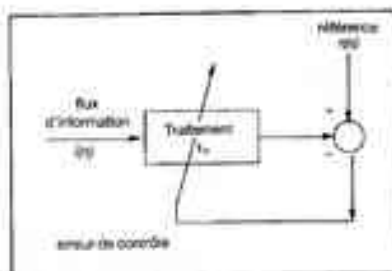


Fig. 1 - Traitement adaptatif : $n = \text{temps}$.

l'optimisation par un algorithme de faible complexité arithmétique, ceci afin de permettre la réalisation en temps réel, c'est-à-dire durant le temps physique de la transmission. Cette dernière propriété est naturellement dépendante des moyens de calcul disponibles, mais on considère généralement qu'elle est réalisée si la complexité est au plus proportionnelle au nombre de paramètres du traitement τ .

C'est en réalisant *récurivement* l'optimisation que les méthodes adaptatives atteignent à la fois les trois propriétés. Le traitement τ d'émission et/ou de réception est incrémenté à chaque instant n où une nouvelle information $i(n)$ est reçue. Normalement on dispose au moins d'une référence $r(n)$ - qui peut être très bruitée - pour le signal $d(n)$ que le traitement τ est censé régénérer. On contrôle alors l'adaptation τ_n de τ de manière à minimiser l'erreur entre cette référence et la sortie régénérée par le traitement adaptatif τ_n (Fig. 1).

Deux familles principales d'algorithmes d'adaptation, le gradient et les moindres carrés, assurent les trois propriétés requises (acquisition, poursuite, temps réel). Le gradient est moins complexe et les moindres carrés sont plus rapides en temps d'acquisition.

L'application aux réseaux téléphoniques numériques...

Le domaine où l'adaptativité fut mise en œuvre de la manière la plus précoce et la plus spectaculaire est celui de la compensation de la distorsion introduite par le canal de transmission. Le traite-

ment τ prend alors le nom d'égaliseur. Il doit être adaptatif pour posséder à la fois la propriété d'acquisition en présence de sauts brusques du canal de transmission (par exemple sur le réseau téléphonique classique, lors des commutations) et aussi la propriété de poursuite en présence de changements permanents du canal (par exemple dus aux mouvements des véhicules pour un réseau téléphonique radio-mobile).

La phase d'acquisition est réalisée préalablement à l'envoi d'information utile par l'émission d'une séquence $d(n)$ connue de l'égaliseur : la référence $r(n)$ est alors exactement $d(n)$.

Pour la phase de poursuite où l'égaliseur optimal est déjà à peu près acquis, on profite de la nature du signal $d(n)$ qui est fait de données : $d(n)$ prend seulement un petit nombre de niveaux discrets. On peut donc fabriquer la référence $r(n)$ (nécessaire pour contrôler l'adaptation de l'égaliseur) à partir de la sortie même de l'égaliseur par simple comparaison à des niveaux seuils. En ce sens l'égaliseur est mieux qu'adaptatif, il est *auto-adaptatif*.

Les méthodes les plus récentes parviennent même à réaliser la phase d'acquisition sans l'émission d'une séquence connue $d(n)$. On s'appuie seulement sur quelque connaissance statistique a priori du signal $d(n)$, mais non sur sa valeur instantanée qui demeure inconnue. On parle alors d'acquisition en mode *autodidacte* ou *aveugle*.

Les théories précédentes ont été appliquées avec succès à la transmission de données sur le réseau téléphonique commuté. Ceci a permis de bien approcher le débit maximum prévu par le théorème de Shannon (qui est d'environ 30 kbit/s dans une bande de 3200 Hz lorsque le rapport signal sur bruit est de 30 dB) puisque actuellement des modes commerciaux réalisent 16 kbit/s avec un taux d'erreur de 10^{-6} . On suit même atteindre ces performances en autodidacte.

Un deuxième exemple est celui des transmissions numériques radio par faisceaux hertziens où l'ensemble du traitement adaptatif destiné à égaliser le canal atmosphérique est répété à des fréquences de plusieurs dizaines de MHz, permettant ainsi la transmission de dizaines ou centaines de Mbit/s, avec une probabilité d'erreur plus faible que 10^{-6} (Fig. 2).

... et au radio-téléphone

Le troisième exemple est celui du radio-téléphone numérique portable de l'avenir, dont la banalisation est prévue pour dans 20 ou 30 ans. Dans ce cas, le canal est l'atmosphère, et la distorsion, particulièrement sévère en milieu ur-

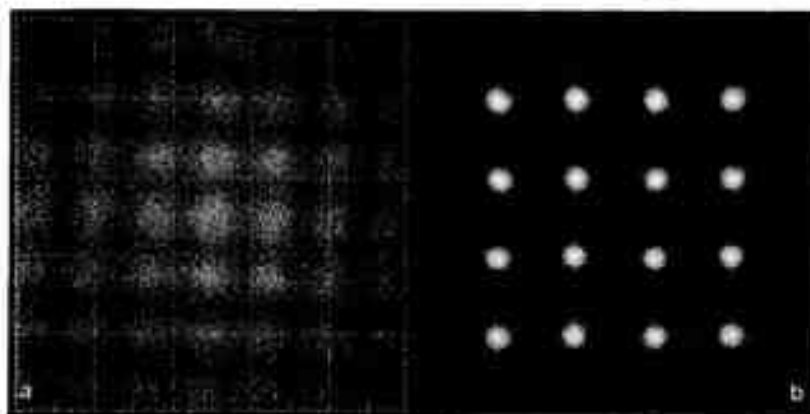


Fig. 2 - Transmission numérique à 16 Mbit/s. La modulation numérique de 2 porteuses en quadrature fournit une constellation de 16 niveaux discrets à l'entrée du canal hertzien. Selon la fréquence, la dispersion de l'atténuation du canal simulé varie de plus de 30 dB (évanouissement sélectif) ce qui brouille les niveaux à l'entrée de l'égaliseur (a). Un égaliseur non linéaire auto-adaptatif à 7 paramètres restitue la constellation discrète sans déformation (b), ce qui correspond à une transmission sans erreur. (Cliché: Laboratoire de communications numériques, département TSF, CNET Lannion B).

bain, provient des évanouissements sélectifs en fréquence dus aux trajets multiples (réflexions sur et à l'intérieur des bâtiments, tunnels, etc.). A cause des mouvements du porteur - qui peut être dans une voiture de vitesse allant jusqu'à 250 km/h - et des mouvements l'environnant, les évolutions permanentes peuvent être très rapides et le problème de la poursuite y est sévère. De plus, les transmissions se feront par bouffées brèves (100 à 1 000 données), ce qui implique une acquisition ultra brève.

Ces faits conjugués rendent le problème très ardu. Pour tenir cette gageure, il n'est pas impossible que la solution passe par un égaliseur auto-adaptatif basé sur les moindres carrés. Ce sera là un exemple grand public des performances limites que le traitement adaptatif du signal permet d'atteindre.

Odile Macchi, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire des signaux et systèmes (UMR 14 CNRS), Ecole supérieure d'électricité, Plateau de Moulon, 91192 Gif-sur-Yvette Cedex.

La radio de qualité laser dans la voiture, c'est pour demain

Défini à l'initiative des industriels et des radiodiffuseurs, le programme Eureka 147 donnera à la réception radio la qualité du disque compact.

Bernard Le Floch,
Damien Castelain

La perspective de mettre en œuvre un service de radiodiffusion sonore numérique de haute qualité, destiné aux récepteurs domestiques et mobiles, s'impose de plus en plus. Dans

Digital sound broadcasting to mobile receivers - Within the framework of the dab (digital audio broadcasting) Eureka 147 project has been designed a new broadcasting system, fully digital from studio to user. Presented here is a promising modulation and channel coding system, suitable for digital broadcasting through the particularly hostile urban radio channel.

ce but, l'industrie européenne et les radiodiffuseurs, représentés par leurs centres de recherche, ont fédéré leurs efforts au sein du programme Eureka 147 DAB (digital audio broadcasting), et travaillent en étroite collaboration avec l'Union européenne de radiodiffusion.

Techniquement, le nouveau système étudié résulte de progrès importants réalisés dans le domaine du codage du signal sonore, et dans celui de la radiodiffusion numérique d'information.

Le codage du son

Pour diffuser un programme stéréophonique de la qualité du disque compact, il faudrait, en l'absence de tout traitement, utiliser un canal de 2 x 768 kbit/s. L'objectif retenu étant de diffuser huit programmes dans une bande de

2 MHz, il faut réduire le débit initial à une valeur proche de 2 x 100 kbit/s.

Totalement irréaliste il y a quelques années, ce système de codage de source, appelé MUSICAM, a été développé conjointement par le CCETT (Centre commun d'études de télédiffusion et télécommunications), l'IRT (Institut für Rundfunktechnik) et Philips. L'oreille est un récepteur de signaux très imparfait: la connaissance des phénomènes de masquage, et plus précisément de la perception de signaux en présence de fréquences discrètes, permet de réduire de façon importante le nombre de niveaux de quantification. Dans chaque bande de fréquence, la quantification est déterminée de façon à maintenir le bruit de quantification au-dessous du seuil de masquage. Ce traitement fournit des résultats excellents: les hautes fréquences peuvent être représentées avec un seul bit (absence ou présence dans la sous-bande) et le débit global s'abaisse à environ 100 kbit/s pour un son monophonique.

Le canal radiomobile

La radiodiffusion numérique vers les mobiles, en particulier en milieu urbain, constitue un pari difficile: la propagation par trajets multiples, due à la présence d'obstacles naturels, nécessite la mise en œuvre de dispositifs de modulation sophistiqués, pour parvenir à une

► qualité constante de réception. Une difficulté importante résulte de l'évolution permanente des caractéristiques du canal, consécutive au déplacement du récepteur.

Le canal de transmission peut être simplement décrit par sa réponse à une impulsion, qui caractérise les différents échos en termes de retard et d'atténuation. Plus le produit de l'étalement des retards par la largeur de bande utilisée est élevé, et plus le canal sera sélectif en fréquence. Cela signifie que certaines composantes fréquentielles du signal seront bien transmises (c'est le phénomène d'interférences constructives bien connu en optique), alors que d'autres composantes seront mal transmises, ce que l'on appelle en radio les *fadings*.

En réception urbaine, la réponse impulsionnelle du canal s'étend généralement sur plusieurs microsecondes. Par conséquent, la non-sélectivité concerne uniquement les transmissions à bas débit (quelques dizaines de kbit/s), et ne peut en aucun cas constituer une hypothèse valable pour la radiodiffusion sonore de haute qualité.

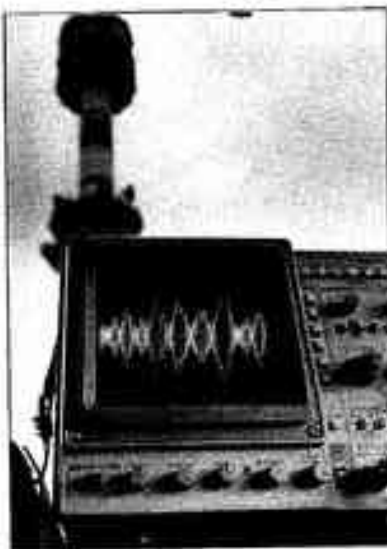
Par ailleurs, la diversité apportée par l'utilisation d'une transmission à large bande doit être considérée comme un avantage, si le système de communication est conçu pour tirer parti des trajets multiples et non pour en souffrir : du fait de l'étalement de la réponse du canal, il est très improbable qu'un évanouissement profond affecte simultanément une bande de fréquence d'un mégahertz ou plus.

Le nouveau système de radio numérique exploite largement cette propriété : le signal transmis résulte de la réunion de plusieurs programmes, et constitue ainsi un multiplex dans lequel chaque source élémentaire tire bénéfice de l'aspect « large bande » de la transmission.

Les principes du système de diffusion

Le système développé par l'équipe du CCETT porte le nom de COFDM (coded orthogonal frequency division multiplex), et repose sur deux principes :

- l'information à transmettre est répartie sur un grand nombre de porteuses accolées les unes aux autres, et individuellement modulées à bas débit. Ces porteuses sont par conséquent affectées d'évanouissements non sélectifs ;
- le second principe exploite de façon systématique les trajets multiples entre l'émetteur et le récepteur, en utilisant le fait que des signaux suffisamment séparés en fréquence et en temps ne peuvent être affectés de façon identique. Les informations transmises à des instants différents, sur des porteuses éloignées de



La propagation par trajets multiples génère une sélectivité de la transmission dans le domaine fréquentiel : l'enveloppe du signal représentée sur l'oscillogramme correspond à la réponse en fréquences du canal, mesurée sur une bande de 4 Mhz à la fréquence porteuse de 794 Mhz.

l'espace des fréquences, sont liées entre elles par un codage produisant une redondance qui assure au récepteur la possibilité de reconstituer les informations perdues lors de la transmission.

L'association de ces deux principes est à la base d'un nouveau système de transmission qui tire profit de la propagation par trajets multiples, chaque écho du canal contribuant à augmenter la puissance utile du signal reçu.

Le chemin qui restait à parcourir entre cette constatation et l'idée de réseau monofréquence était alors aisé : puisque le système se satisfait de la propagation par trajets multiples, pourquoi ne pas fabriquer des « échos artificiels », à partir d'un réseau d'émetteurs répartis sur un territoire donné, synchronisés en temps, et diffusant tous le même signal, bien entendu sur la même fréquence. Apportant une économie considérable d'utilisation du spectre radio, ce principe constitue une révolution par rapport aux réseaux FM actuels utilisant des fréquences distinctes pour couvrir l'ensemble du territoire. Par ailleurs, en plus des propriétés de diversité de fréquence et de temps intrinsèques à la technique COFDM, le réseau monofréquence introduit la diversité d'espace à l'émission, de sorte que le système exploite l'ensemble des degrés de liberté offerts au transmetteur.

Loin d'être une utopie, le concept de réseau monofréquence a fortement influencé les partenaires du projet EU 147 dans leur adhésion au système COFDM, face à la situation de pénurie de fréquences que connaît l'Europe occidentale.

L'autoradio numérique, c'est pour demain

Tant les procédés de codage de source que de transmission utilisent des techniques de traitement du signal bien maîtrisées en terme de composants électroniques.

Des prototypes complets existent depuis l'été 88, et la première démonstration publique du système COFDM a été menée à bien lors de la conférence administrative mondiale des radiocommunications (ORBIT 88). Il s'agissait, à notre connaissance, de la première mise en œuvre d'un ensemble de radiodiffusion de haut débit, dans un canal radiomobile. Depuis lors, de nombreux sites expérimentaux ont été mis en place en RFA, au Royaume-Uni, au Canada et en France bien sûr, le premier d'entre eux ayant été le site de Rennes.

L'expérimentation et la promotion vont donc bon train, et les actions à mener dans l'avenir concernent la mise en place d'infrastructures opérationnelles d'émission, l'obtention d'une bande de fréquences, et l'intégration des récepteurs, pour en faire des produits bon marché et à la hauteur des exigences du cahier des charges du projet.

Alors, pour quand l'autoradio numérique de qualité laser ? Beaucoup de travail reste à faire, mais on peut espérer que tout ceci deviendra une réalité dans la seconde moitié de cette décennie.

■ Bernard Le Floch, ingénieur au Centre commun d'études de télédiffusion et télécommunications.

■ Damien Castelain, ingénieur au Centre commun d'études de télédiffusion et télécommunications, BP 59, rue du Clos Courteil, 35512 Cesson Sévigné.

CNRS - AUDIOVISUEL

1, place Aristide-Briand 92195 Meudon, Cedex

L'AUDITION DU FŒTUS

Conception : Robert Clarke
Conseiller scientifique :
Jean-Pierre Lecumet
Image et son : Daniel et Michèle Cavillon
Production : CNRS Audiovisuel
5 minutes - 1990

Images des grands fonds par canal acoustique

Les techniques de transmission numérique associées à des méthodes de traitement du signal, telle l'égalisation, permettent de transmettre des images sur canal acoustique à travers l'océan.

■ Alain Glavieux,
Joël Labat

L'exploitation des fonds marins a nécessité le développement d'équipements de transmission performants pour assurer des liaisons du fond vers la surface (canal vertical) ou entre sites distants (canal horizontal). Suivant le contexte, ces transmissions ont été réalisées par câbles ou par ondes acoustiques. L'évolution des techniques de traitement du signal et de la technologie a permis durant ces dernières années un développement prometteur de ce type de transmission. La principale application des transmissions par ondes acoustiques est actuellement la télécommande d'engins immergés qui nécessite de disposer de liaisons à faible débit d'information (quelques dizaines de bits par seconde) mais bien protégées contre les erreurs de transmission. La transmission d'images est utilisée pour l'exploration des fonds marins, le repérage d'épaves ou la surveillance de sites expérimentaux. Pour ces applications, une transmission d'images à cadence lente est en général suffisante mais conduit cependant à transmettre des débits d'information élevés (quelques dizaines de kbits par seconde). Enfin, parmi les préoccupations du moment, citons les transmissions par faible fond et à grande distance (quelques kilomètres) sur canal horizontal qui seront utilisées pour les communications entre plongeurs ou la surveillance de la qualité des eaux à proximité des côtes.

Image transmission on underwater acoustic channel - Problems met in transmission on underwater acoustic channel and some signal processing methods generally used are examined. Two cases are considered: the horizontal channel where there are stationary problems, and the vertical channel where the principal limitation is the bandwidth of the transducer. An image transmission equipment is presented to illustrate this article.

Transmission d'images par grand fond

Pour les liaisons verticales, la propagation se fait suivant un trajet principal et les réflexions éventuelles des ondes sur la surface de la mer peuvent être négligées grâce à la directivité des capteurs. Pour ces liaisons, les problèmes commencent à se poser lorsque l'on souhaite réaliser des transmissions à grande distance (supérieures à 3 000 m de profondeur) et à haut débit (cas des images). Dans ces conditions, pour limiter l'atténuation apportée par le canal, il est nécessaire d'utiliser des fréquences porteuses basses typiquement inférieures à 30 kHz et, dans ce cas, on est rapidement confronté au problème de la bande passante des transducteurs (20 à 30 % de leur fréquence centrale).

Le GCN (Groupe communications numériques de l'ENST de Bretagne) a mis au point un équipement pour la transmission d'images par voie acoustique (TIVA) en collaboration avec l'Ifremer qui était chargé du traitement des images et des signaux acoustiques. Cet équipement est actuellement développé par la société ORCA Instrumentations et comprend les fonctions suivantes :



Image d'une structure métallique par 2200m de fond, transmise par ondes acoustiques.

- un système de prise de vues et de traitement des images : la prise de vues est assurée par une caméra CCD à grande sensibilité et les images au format de 300 lignes et de 490 pixels par ligne sont codées (codage par plage) à raison de 1,5 bit par pixel. Un mode basse résolution permet encore de réduire l'informa-

tion à transmettre en ne retenant qu'une ligne et un pixel sur deux ;

- un équipement d'émission-réception (modem) : il utilise une modulation de phase à quatre états réputée pour sa robustesse au filtrage. Le modulateur est réalisé à partir de techniques numériques, sa fréquence porteuse et son débit numérique sont programmables. Le démodulateur est du type cohérent et est équipé d'un filtre numérique dont la réponse en fréquence compense en permanence les fluctuations éventuelles du canal de transmission. Ce filtre appelé égaliseur est implanté sur un processeur de signal ainsi que les circuits de récupération de rythme et de porteuse du démodulateur.

L'exploration du Titanic

Plusieurs campagnes d'essais ont permis de valider le bon fonctionnement de cet équipement. En août 1987, il a été utilisé pour explorer l'épave du *Titanic* qui se trouve par 3800m de fond. Pour atteindre cette portée, la fréquence porteuse avait été fixée à 26kHz et, compte tenu de la bande passante des transducteurs (de l'ordre de 5kHz), le débit numérique d'information était de 5300 bits par seconde. La cadence de transmission des images était de une image toutes les dix secondes. La figure illustre la qualité des images reçues. Les images du *Titanic*, que nous ne pouvons pas encore publier, étaient de qualité équivalente.

Pour clore ce bref exposé sur les transmissions par ondes acoustiques, disons que les problèmes rencontrés en transmission sur canal horizontal, et notamment par petit fond, sont assez délicats à appréhender. Un travail important reste à faire en matière de modélisation du canal. On peut cependant avancer que la propagation se fait suivant plusieurs trajets affectés d'un effet Doppler dû à la houle et qui rendent ce canal non-stationnaire. Plusieurs équipes travaillent sur ce problème et l'on peut espérer que l'utilisation de méthodes sophistiquées de traitement du signal permettra prochainement de réaliser des liaisons de qualité sur un tel canal.

■ Alain Glavieux, professeur à l'Ecole nationale supérieure des télécommunications de Bretagne, Laboratoire « transmission ».

■ Joël Labat, ingénieur à l'Ecole nationale supérieure des télécommunications de Bretagne, Laboratoire « transmission », BP 836, 29279 Brest Cedex.

Les systèmes optiques cohérents

Détection cohérente et multiplexage, sources accordables et amplificateurs, supports à faible atténuation : les progrès techniques ne cessent d'élargir les domaines d'application des liaisons optiques cohérentes.

Yves Jaouen,
Claude Chabran

Les systèmes de télécommunications optiques actuels sont dits à détection directe, le seul vecteur d'information étant la variation de puissance optique. Ils n'utilisent donc qu'une faible part du potentiel offert par l'optique. En particulier, ils renoncent à l'exploitation des variations de fréquence et de phase.

Cependant, il est aujourd'hui possible d'utiliser les principes de la détection cohérente, déjà bien connus en radiofréquence. En optique cohérente, l'information est obtenue à partir d'un mélange entre une onde signal modulée en amplitude, fréquence ou phase, avec une onde locale engendrée au niveau du récepteur. Le signal de battement ainsi obtenu, situé dans le domaine radiofréquence, contient l'information transmise. Celle-ci sera alors décodée par des

techniques couramment utilisées en radiofréquence.

Outre les avantages déjà mentionnés, un gain de sensibilité est obtenu par rapport à la détection directe (15 dB environ). De plus, le multiplexage en fréquence optique permet d'envisager une meilleure gestion des potentialités de la fibre optique. Si avec la détection directe on peut séparer des porteuses optiques voisines de 1 nm (120 GHz à 1,55 µm), avec la détection cohérente, la distance entre canaux peut être réduite au gigahertz.

Toutefois, la mise en œuvre d'un système optique cohérent engendre des contraintes sur les sources semiconductrices, le support de transmission et le récepteur : faible largeur spectrale (< 10 MHz), accordabilité en fréquence optique des sources, bonne stabilité en fréquence, contrôle de la polarisation des ondes, grande bande passante et minimisation du bruit thermique des récepteurs.

Coherent lightwave techniques - They offer a 10-20 dB receiver sensitivity improvement over direct detection. In addition, they allow frequency division multiplexing (FDM) with very fine frequency separation. Applications are in the areas of long-haul high-bit-rate communication and network.

L'arrivée de nouveaux lasers

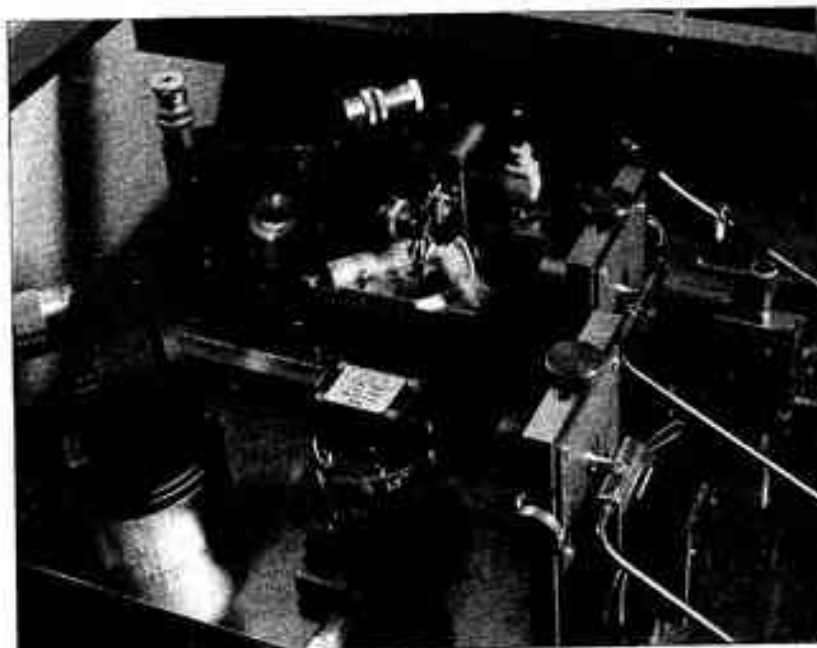
Bien qu'il reste des progrès conceptuels et technologiques à faire sur les sources, les nouveaux lasers *distributed feedback* (DFB) multirégions apportent un début de réponse à ces besoins. Ceux-ci possèdent un réseau intégré, permettant une bonne sélectivité en longueur d'onde (largeur de raie < 1 MHz), ainsi qu'une accordabilité en fréquence de l'ordre de 10 nm (équivalent à 1200 GHz).

D'autre part, il est maintenant envisageable d'amplifier optiquement le signal, évitant des transferts optique-électrique en ligne, complexes et coûteux. Un type d'amplificateur optique très performant exploite les effets non-linéaires dans une fibre dopée à l'erbium. Les gains d'amplification peuvent atteindre 30 dB. Ces derniers commencent à être commercialisés.

Un axe de prospection est l'utilisation d'un nouveau support de transmission : les verres fluorés. Les atténuations susceptibles d'être obtenues sont inférieures à 0,01 dB/km à 2,7 µm, permettant d'envisager des liaisons de plus de 1 000 km sans répéteur.

De même, grâce au concept de synchronisation obtenue par injection optique d'un laser dans un autre (voir figure), on peut envisager de nouvelles fonctions, telle la récupération de phase optique.

Il est donc permis de penser que la prochaine décennie verra l'application des liaisons optiques cohérentes dans de nombreux domaines : en particulier les liaisons grande distance-haut débit et les réseaux multicolores qui tirent profit respectivement du gain en sensibilité et du nombre important des fréquences optiques utilisables.



Expérience d'injection optique avec des lasers semiconducteurs. (Cliché Laboratoire d'opto-électronique de Télécom Paris).

Yves Jaouen, enseignant-chercheur à l'École nationale supérieure des télécommunications, département Communications.

Claude Chabran, enseignant-chercheur à l'École nationale supérieure des télécommunications, département Communications, 46, rue Barrault, 75634 Paris Cedex 13.

La télévision du futur

Pour les services télévisuels du futur, quelles méthodes fiables et rapides mettre en œuvre pour analyser et comprimer des séquences d'images ?

■ Claude Labit

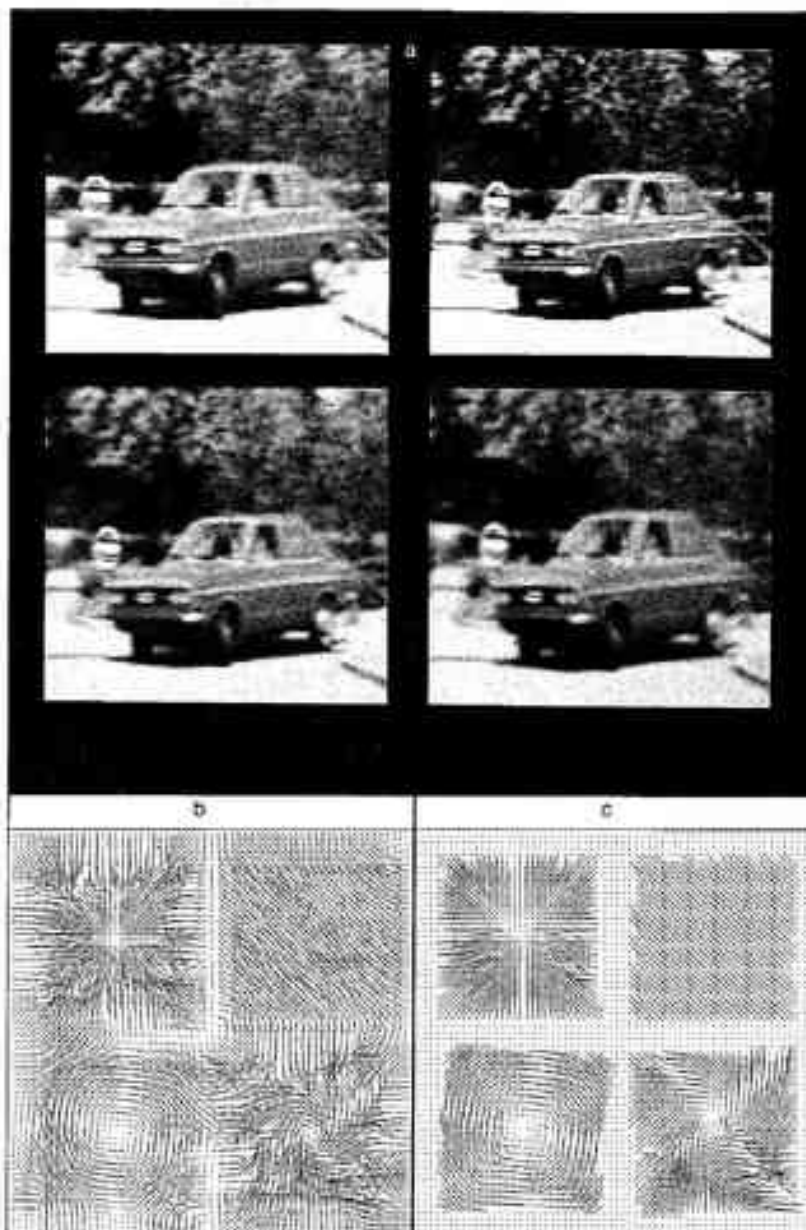
Les années 70-80 ont vu l'éclosion de nombreux projets, de nouveaux services télévisuels. Ceux-ci ont ou vont introduire dans la vie professionnelle et quotidienne de chacun, la manipulation à différents niveaux d'un nombre toujours croissant d'images. Le fil conducteur des travaux explorés et présentés ici concerne l'analyse dynamique pour la compression de séquences d'images, et cela pour des services télévisuels du futur tels que la télévision haute définition (TVHD), la télévision en relief (TV3D) ou la télé-surveillance active.

Il est important de garder en permanence à l'esprit qu'une image n'est pas acquise de manière isolée, mais appartient bien souvent à un flot temporel de signaux, échantillonné temporellement à différentes fréquences selon l'application. Tout système de communication doit supporter ce flot et nécessite la définition d'algorithmes et d'architectures rapides respectant ces contraintes de temps réel.

Une analyse à résolution variable

Le système visuel humain peut appréhender une scène ou un objet à plusieurs niveaux de résolution. De même, l'ana-

Future TV - During the past few years, the increase of image communications needed new algorithmic trends, especially concerning dynamic scene analysis, temporal data compression and image sequence transmission. Due to the nature of data flows which characterizes these image signals, several algorithmic tools were developed for motion estimation, dynamic feature extraction and interpretation. New approaches are investigated here and applied to future image communication services: HDTV, 3DTV, semantic coding.



Analyse globale du mouvement : les quatre sous-images de la figure (a) ont été créées, à partir d'une même image, par génération de petits mouvements de zoom, de translation, de rotation et d'un mouvement composé. À partir d'une estimation initiale bruitée d'un champ dense de vecteurs mouvement apparent (b), il est possible d'effectuer une analyse globale des mouvements perçus par décomposition en composantes élémentaires (ici, translation, zoom, rotation perpendiculaire au plan image) et reconstitution du champ identifié à partir des descriptions de mouvements élémentaires (c).

lyse d'une séquence d'images numériques peut être effectuée au travers d'une approche à résolution variable. Les techniques de décomposition pyramidale permettent à la fois une décomposition multirésolution du signal traité et une meilleure localisation, aussi bien dans le domaine spatio-temporel que

fréquentiel, d'attributs caractéristiques : contours orientés, mouvement. Une algorithmique multigrille, c'est-à-dire exploitant à des fins d'estimation ou d'identification l'ensemble des niveaux de résolution, est actuellement explorée : ainsi, pour l'analyse de séquences, il s'agit de relier, au sein même des pro-

► cédures d'estimation, les mouvements extraits aux différentes échelles. Une application récente aux systèmes de compression compatibles est venue conforter la nécessité d'une telle approche. Ainsi, pour une séquence d'images acquise initialement en haute définition (TVHD), au travers d'une approche multirésolution, il est possible de transmettre et reconstruire de manière compatible des séquences correspondant à plusieurs standards de résolution.

Pour une future télévision en relief

D'ores et déjà, des stations graphiques de CAO fournissent à l'opérateur une restitution relief des objets qu'il manipule : l'exploitation d'une future télévision en relief conduit naturellement à la recherche d'algorithmes d'analyse et de compression permettant une restitution en relief sans défaut perceptible visuellement. Les mouvements perçus de manière apparente (vue gauche + vue droite) dans un couple de séquences d'images stéréoscopiques correspondent en réalité à des mouvements physiques tridimensionnels d'objets : il semble ainsi nécessaire, pour une qualité optimale de reconstruction, d'exploiter la cohérence intrinsèque des paramètres

dynamiques issus de chacune des séquences. Les premières études portent actuellement sur la définition de procédures d'estimation conjointes sur les vues gauche et droite par méthodes de minimisation sous contraintes géométriques stéréoscopiques.

L'analyse globale du mouvement

Des travaux de recherche sont entrepris actuellement afin de caractériser de manière plus globale (décomposition en mouvements génériques : translation, rotations, zooms...) les mouvements estimés bien souvent de manière très locale dans un premier temps (champ dense de vecteurs vitesse apparente). Cette phase d'analyse globale du mouvement repose sur la définition de modèles de mouvement, la décomposition d'un mouvement 3D complexe en mouvements élémentaires et la définition pour chaque classe de mouvements élémentaires de descripteurs identifiables à partir du champ initial de mouvement (voir figure). Une telle analyse globale trouve d'ores et déjà des applications pour la transmission, au plus bas débit, d'une voie d'information supplémentaire contenant les paramètres de mouvement nécessaires pour la reconstruction tempo-

relle au récepteur. Plus récemment, ces techniques semblent prometteuses pour tout système de télésurveillance active par capteur vidéo, système où non seulement les paramètres de mouvement extraits et transmis permettent la décompression vidéo des séquences, mais également fournissent un élément pour le diagnostic et le déclenchement d'actions.

Nous constatons ainsi que, dans de telles applications, loin de vouloir appréhender exactement les constituants physiques (formes, mouvements réels...) des scènes dynamiques observées, les schémas de compression évoqués ici tentent de cerner le concept récemment introduit de « réalité virtuelle » (virtual reality) qui ne se donne pour but que de manipuler et transmettre au plus haut niveau (c'est-à-dire au niveau des objets) les informations, vecteurs du message que le système de communication doit délivrer.

■ Claude Labit, directeur de recherches à l'Institut de recherches en informatique et systèmes aléatoires (URA 227 CNRS), Université Rennes I, Campus de Beaulieu, BP 25, 35042 Rennes Cedex.

Images comprimées pour grand débit

La compression est une étape obligatoire avant transmission et stockage des images numériques. On ne peut obtenir des taux de compression élevés que par des méthodes tolérant une distorsion des images en préservant l'information utile.

■ Rémy Prost,
Atilla Baskurt,
Robert Goutte

Les techniques de l'image numérique nécessitent de grands débits de transmission et des systèmes de stockage de grande capacité.

Une image monochrome, de qualité standard, est généralement numérisée sous la forme d'une matrice de 512

pixels (points) par ligne et par colonne. Chaque pixel est codé par un mot binaire de 8 bits, ce qui permet de représenter 256 niveaux de gris. Le stockage de cette image requiert une mémoire de deux millions de bits. Sa transmission, à la cadence vidéo de 25 images par seconde, correspond à un débit d'information de 50 Mbit/s et nécessite un canal de transmission avec une largeur de 25 MHz.

L'adaptation à un canal de débit réduit est une première source de difficul-

Image data compression and coding - Digital image transmission and archiving involve high data rate and mass storage. Thus, data compression is required. Starting with a discussion about information redundancy, predictability and coding of pixels, the paper focuses on transform coding. A picture sequence illustrates this method.

tés. Dans les missions spatiales lointaines (Mars, Vénus...), la faible puissance des émetteurs embarqués limite généralement le débit d'information à 10 bits/s, ainsi la transmission d'une seule image durerait plus de 55 heures ! Un autre problème crucial est celui du stockage des informations. Par exemple, un hôpital de 500 lits peut produire plus de 110 Gbit/jour d'images numériques. L'archivage de ces images nécessiterait 1 000 disques optiques numériques par an.



Compression d'une image par transformation cosinus discrète: (a) image originale 256x256 pixels codée sur 8 bits (surface de la planète Mars) (cliché NASA); (b) illustration de la transformation cosinus discrète des blocs 16x16 de l'image, les zones claires correspondent à des coefficients de forte intensité; (c) image comprimée reconstruite, le taux de compression est de 8, ce qui correspond en moyenne à la transmission ou au stockage de 1 bit par pixel (clichés INSA Lyon, URA 1216 CNRS).

Comprimer sans perdre d'information

Les techniques de compression et de codage ont pour but de réduire le nombre moyen de bits par pixel à transmettre. Le taux de compression est défini par le rapport entre le nombre de bits par pixel de l'image originale et le nombre moyen de bits par pixel nécessaires à sa transmission.

Les méthodes exploitent la redondance informationnelle de l'image, le niveau de gris d'un pixel dépendant des pixels voisins. Cette forte corrélation permet sa prédiction partielle. Par exemple, une image uniforme est entièrement définie par la connaissance d'un seul pixel; à l'opposé, une image où les pixels ont une distribution aléatoire et indépendante ne permet pas la prédiction d'un pixel par la connaissance de ses voisins. C'est cette dernière image qui contient la plus grande quantité d'information mesurée par l'entropie de Shannon.

L'entropie représente le nombre moyen de bits par pixel. Dans une image codée sur 8 bits par pixel, l'entropie est généralement de 4 à 6 bits par pixel. Il est donc possible de compresser les images sans perte d'information, c'est-à-dire de manière réversible. Malheureusement, l'entropie montre que, généralement, le taux de compression que l'on peut ainsi atteindre dépasse rarement deux.

Ces méthodes prédictives de compression sans perte d'information éliminent la redondance entre deux pixels voisins en ne codant que la partie non prévisible ou erreur de prédiction. Le nombre de bits alloués à son codage est inversement proportionnel à sa probabilité (code d'Huffman).

Contrôler la perte d'informations

Des taux de compression élevés ne peuvent être obtenus que par des méthodes qui tolèrent une distorsion de l'image originale en préservant l'information utile. Ces méthodes, dites non-réversibles, se divisent en deux catégories: les méthodes spatiales et les méthodes par transformation. Les méthodes spatiales agissent directement sur les pixels de l'image pour les coder convenablement; alors que dans les méthodes par transformation, on ne code pas une image mais les coefficients numériques de sa transformée.

La transformation concentre l'énergie de l'image en un petit nombre de composantes décorrélées. On ne prend en considération que les coefficients supérieurs à un seuil prédéfini, qui sont ensuite quantifiés, c'est-à-dire que l'on associe à leur distribution continue une distribution en « marche d'escalier » afin de réduire la longueur du code associé. Si la zone codée n'est pas définie a priori, il faut également coder la position des coefficients sélectionnés dans le domaine transformé. Il en résulte un nombre moyen de bits par pixel nécessaires au stockage ou à la transmission de l'image.

La décompression requiert le décodage, puis la transformation inverse à celle pratiquée sur l'image. Le seuillage et la quantification ne sont pas réversibles et il s'ensuit que l'image reconstruite présente une distorsion. La transformation optimale est celle de Karhunen-Loève, mais ses difficultés de mise en œuvre par un algorithme rapide font qu'on lui préfère une transformation sous-optimale, dérivée de la transformation de Fourier: la transformation cosinus discrète.

Les méthodes par transformation ne sont généralement pas appliquées sur toute l'image, mais sur des blocs de taille limitée à 8 x 8 ou 16 x 16 pixels. Ainsi, le seuillage peut être adapté aux propriétés statistiques locales de l'image originale afin d'optimiser la qualité de l'image reconstruite, ou d'augmenter le taux de compression (voir figure).

La frontière entre les méthodes spatiales et les méthodes par transformation s'efface actuellement avec la compression par codage d'images sous-bandes ou multirésolution.

Rémy Prost, maître de conférences à l'Institut national des sciences appliquées de Lyon, Laboratoire Traitement du signal, imagerie numérique et ultrasons (URA 1216 CNRS).

Atila Baskurt, maître de conférences à l'Institut national des sciences appliquées de Lyon, Laboratoire Traitement du signal, imagerie numérique et ultrasons (URA 1216 CNRS).

Robert Goutte, professeur à l'Institut national des sciences appliquées de Lyon, directeur du Laboratoire Traitement du signal, imagerie numérique et ultrasons (URA 1216 CNRS), Bât 502, 20, avenue Albert Einstein, 69621 Villeurbanne Cedex.

Ondelettes et compression numérique des images

Les nouvelles méthodes de compression numérique des images sont basées sur des transformations spatio-fréquentielles et une quantification vectorielle.

Michel Burlaud,
Marc Antonini,
Pierre Mathieu

Le succès du traitement numérique des images résulte de capteurs numériques performants, et de l'utilisation de calculateurs puissants. Toutefois, le grand nombre de bits nécessaire à la représentation de ces images rend coûteux le stockage et la transmission.

La numérisation des pixels sur une échelle linéaire de 256 niveaux nécessitant donc 8 bits par pixel est-elle la meilleure représentation compacte de l'information dans l'image ? Depuis une vingtaine d'années, les études sur l'optimisation d'une chaîne de compression

numérique font appel à une transformée dont le but est d'améliorer les propriétés statistiques de l'image et à un quantificateur qui représente sur un certain nombre de niveaux (et donc de bits) les pixels de cet espace transformé.

La transformée en cosinus discrète TCD (transformée de type Fourier), introduite en 1974, fait l'objet actuellement de normalisation et de développements industriels. Les possibilités de compression de cette méthode, avec des dégradations acceptables, sont limitées à un facteur de compression de l'ordre de 10 (0,8 bit par pixel).

Depuis une décennie, les efforts ont porté sur de nouvelles transformations spatio-fréquentielles et sur des méthodes de quantification vectorielle.

De nouvelles techniques de compression

L'idée de base des pyramides est de prendre en compte l'aspect échelle ou résolution pour modéliser une image.

Elle est alors décomposée au moyen d'un filtre numérique passe-bas à différents niveaux allant du plus fin au plus grossier. La différence entre deux niveaux représentant les détails est alors quantifiée. Le nombre de pixels est malheureusement augmenté d'un facteur 4/3.

La méthode de codage en sous-bandes, appliquée depuis cinq ans aux images, préserve le même nombre de pixels. Elle est effectuée par deux filtres : l'un, passe-bas, donne l'approximation lissée du signal ; l'autre filtre, passe-haut, fournit les détails perdus.

Enfin, le concept d'ondelettes bidimensionnelles permet de décrire l'évolution spatiale de l'image en fonction de l'échelle d'observation. Le signal est alors projeté sur une base d'ondelettes. La transformée en ondelettes orthogonales est mise en œuvre par des filtres numériques suivant un algorithme pyramidal.

Les ondelettes biorthogonales ont été introduites de façon à préserver la phase

Wavelets and digital compression of images - New techniques developed over the last decade for the digital compression of images are presented. Spatio-frequency transforms take the place of frequency transforms, the vectorial quantification being a significant improvement over scalar quantification.



image originale (a), et la même image à laquelle on a appliqué un taux de compression de 100 (b). La qualité de l'image originale n'est pas altérée.

nulle des filtres. Dans ce cas, la décomposition est faite au moyen d'une ondelette d'analyse, alors que la reconstruction se fait au moyen d'une ondelette duale de synthèse. Ces deux ondelettes différentes constituent des bases orthogonales. Les résultats de compression utilisant des ondelettes séparables ont été notablement améliorés par des ondelettes bidimensionnelles non séparables permettant de préserver l'isotropie de la décomposition.

Ces méthodes sont bien adaptées à la modélisation des contours qui représentent l'information fondamentale à la compréhension d'une scène et au mécanisme de vision primaire de l'œil.

Construire un dictionnaire

La quantification vectorielle, introduite voici une décennie, consiste à représenter un ensemble de pixels appelé vecteur par un représentant choisi dans un dictionnaire. Seul l'index du vecteur du dictionnaire est transmis, permettant ainsi un fort taux de compression.

La construction de ce dictionnaire optimal utilise généralement la méthode LBG (due à Linde, Buzo et Gray) dont le principe consiste à effectuer d'abord une partition d'une séquence d'apprentissage à partir d'un dictionnaire initial, ensuite chaque partition est remplacée par son centre de gravité de façon à obtenir un nouveau dictionnaire. Ces deux étapes sont itérées jusqu'à convergence. Les inconvénients majeurs de cette méthode sont le coût calcul et le flou introduit sur les contours.

La méthode de « treillis », introduite récemment pour concevoir le dictionnaire, est basée sur l'étude géométrique des meilleurs représentants d'une partition. Elle permet d'une part d'obtenir des contours nets, et d'autre part de limiter le coût calcul à celui d'un quantificateur scalaire.

Grâce à une méthode de transformée en ondelettes et une quantification vectorielle en treillis, un taux de compression de 100 (en moyenne 0,08 bit par pixel) peut être obtenu sans détérioration de l'image originale (voir figure).

Michel Barlaud, professeur à l'Université de Nice-Sophia Antipolis, Unité « Informatique, signaux et systèmes » (URA 1376 CNRS).

Marc Antonini, chercheur à l'Université de Nice-Sophia Antipolis, Unité « Informatique, signaux et systèmes » (URA 1376 CNRS).

Pierre Mathieu, maître de conférences à l'Université de Nice-Sophia Antipolis, Unité « Informatique, signaux et systèmes » (URA 1376 CNRS), rue Albert Einstein, Sophia-Antipolis, 06560 Valbonne.

La compression d'images en télédétection

Sans la compression de données qu'autorise le traitement du signal, les instruments de télédétection à haute résolution spectrale ne pourraient pas être embarqués à bord de satellites.

Corinne Mailhes

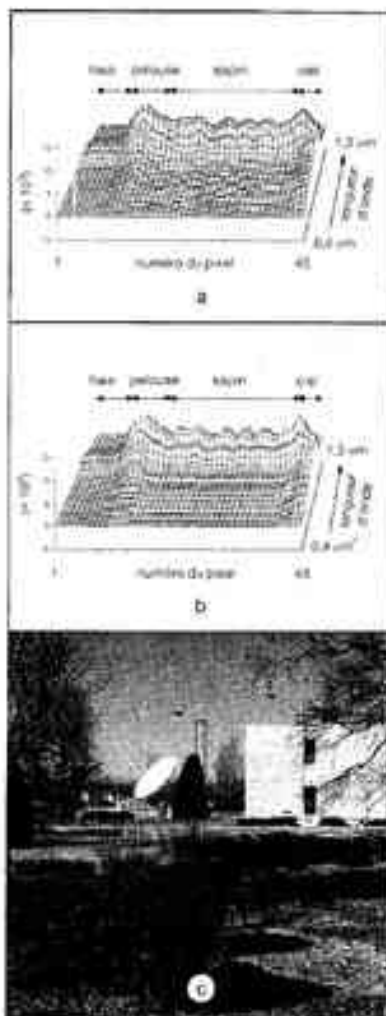
Les spectro-imageurs à haute résolution spectrale constituent une nouvelle génération d'instruments embarqués sur satellite, servant à l'observation de la Terre. Le spectro-imageur à transformée de Fourier, développé par le CNES, permet d'obtenir des images dans lesquelles chaque pixel est un ensemble de points appelé interférogramme. La transformée de Fourier de l'interférogramme fournissant le spectre de l'objet correspondant, la transformée de Fourier de tous les pixels de l'image conduit à une image à haute résolution spectrale (200 canaux spectraux contre 4 pour SPOT). Le principal problème du spectro-imageur (et de tous les spectro-imageurs en général) est la transmission au sol de ces images. Dans le cas présent, le débit de télémétrie nécessaire serait de 126 Mbit/s. On se trouve donc devant un problème de compression de données, problème dont la résolution est essentielle pour l'avenir même de l'instrument.

Une distorsion acceptable

Avant de parler de compression, il est nécessaire de définir au préalable une mesure de distorsion spectrale décrivant les dégradations produites sur le spectre après compression. Dans notre cas, la distorsion maximale permise correspond à la distorsion produite par le bruit inhérent au capteur CCD (Charged Coupled Device) de l'image.

La compression s'effectue à deux niveaux : d'abord, au niveau de chaque pixel, c'est-à-dire de chaque interférogramme, et ensuite, au niveau de l'ima-

Image compression and remote sensing - The author shows how signal processing can afford a good solution to the problem of spectral image compression applied to a new remote sensing instrument, the Fourier transform spectro-imager, by reaching a compression ratio of about 16.



Colonne d'une image spectrale avant et après compression. (a) Avant compression, la colonne contient 45 pixels le long de l'axe horizontal dont le spectre correspondant est représenté le long de l'axe des longueurs d'onde. Les paysages traversés correspondent à une halle, une portion de pelouse, un sapin et un bout de ciel. (b) La même colonne après compression par un facteur 16, on distingue toujours très bien les différents paysages repérés par le cadre sur la photo (c).

ge entière. Pour la compression scalaire, la méthodologie proposée utilise la modélisation paramétrique qui autorise la représentation d'un signal par un vecteur de paramètres. La quantification et le codage de ces paramètres permettent d'obtenir un taux de compression se situant entre 4 et 6.

Un taux de compression de 20 !

Dans un deuxième temps, on envisage la compression au niveau de l'image entière. En sortie du spectro-imageur,

l'image est construite colonne par colonne. Dans un souci de traitement temps réel, la technique de compression proposée est un traitement colonne par colonne, basé sur l'utilisation future de ces images en classification. Chaque colonne de l'image est segmentée en différentes classes, chaque classe correspondant à un objet physique différent. Au lieu de transmettre les paramètres de chaque pixel, on transmet les paramètres de chaque classe. Ainsi, le taux de compression atteint se situe entre 8 et 20, avec une mesure de distorsion acceptable. La figure illustre un exemple parti-

culier d'une colonne d'une image avant et après compression par un facteur 16. Les différents types de végétation restent identifiables.

Le traitement du signal a finalement apporté la solution à un problème qui aurait pu devenir rédhibitoire pour l'avenir du spectro-imageur à transformée de Fourier.

Corinne Mailhes, attaché temporaire d'enseignement et de recherche, Ecole nationale supérieure d'électrotechnique, d'électronique, d'informatique et d'hydraulique de Toulouse, 2, rue Camichel, 31071 Toulouse Cedex.

La parole comprimée

Le développement des vocodeurs, systèmes de compression de la parole à faible débit, donne la voix aux nouveaux réseaux numériques de télécommunications.

Denis Rochette

L'essor des télécommunications numériques (futur radio-téléphone cellulaire ou nouveaux réseaux de messagerie vocale, par exemple) est directement lié à la maîtrise des techniques de compression numérique de la parole. En effet, non seulement la réduction de la quantité d'informations à transmettre ou à stocker permet de réduire les coûts (cas des liaisons par satellite, par exemple), mais elle est parfois rendue indispensable par les limites technologiques des équipements qui véhiculent ces informations (cas de certaines liaisons radio, par exemple). L'objectif des techniques de compression (ou codage) est de représenter sous forme numérique le signal de parole analogique, et de recréer, après décodage, un signal de parole de qualité auditive idéalement comparable à celle de l'original.

Un exemple est le codage MIC (modulation par impulsions codées), réalisé dans le réseau téléphonique, qui permet de transmettre une parole de haute qualité à un débit binaire d'informations de

64 kbit/s. Des dérivés du codage MIC permettent de réduire cette quantité d'informations à environ 16 kbit/s tout en gardant une haute qualité. En dessous de cette limite, les performances se dégradent très rapidement. En fait, ce type de codeur tend à reproduire le signal aussi fidèlement que possible; on parle de codeurs de forme d'onde. Un autre type de codeur met en œuvre au contraire les propriétés intrinsèques du signal de parole: ce sont les vocodeurs,

Entre débit et qualité

Les vocodeurs utilisent un modèle du processus humain de production du signal de parole: en première approximation, le couple «source vocale-conduit vocal» est modélisé par un couple «signal d'excitation-filtre numérique» caractérisé par un nombre réduit de paramètres. Ces derniers sont déterminés de manière à minimiser un critère d'erreur entre le signal original et le signal reconstitué, et sont actualisés périodiquement. On peut ainsi obtenir une compression de la parole à des débits binaires s'échelonnant de 16 kbit/s jusqu'à 0,8 kbit/s.

D'une manière générale, la qualité obtenue décroît avec le débit numérique. Par exemple, on obtient actuellement au-dessus de 8 kbit/s une qualité très proche de la qualité téléphonique. En dessous de 4 kbit/s, la qualité s'appréhende plutôt en termes de naturel, d'intelligibilité et d'agrément. Remarquons par ailleurs que le taux d'erreurs introduites par le support de transmis-

sion utilisé influe sur la qualité selon que la technique de codage employée est plus ou moins sensible aux erreurs et comporte ou non un dispositif de détection et/ou correction de ces erreurs.

Du point de vue de la complexité, l'avènement, ces dernières années, des microprocesseurs de traitement du signal, permet aujourd'hui d'implanter en temps réel des algorithmes de compression très complexes sur un seul circuit intégré. Il est par conséquent vraisemblable que l'on puisse d'ici quelques années transmettre à quelques kbit/s (typiquement à 4,8 kbit/s) et à un coût raisonnable, un signal de parole de très haute qualité.

Denis Rochette, ingénieur, responsable de l'activité Télécommunications, OROS S.A., 13, chemin des Prés, ZIRST, 38240 Meylan.

CNRS - AUDIOVISUEL

1, place Aristide-Brunet 92105 Meudon Cedex

TÉLÉDÉTECTION RADAR

Expérimentation sur un avion d'un appareil de télédétection radar destiné à équiper les satellites. Description des principes de fonctionnement et modalités d'utilisation, étendue des possibilités de détection (de nuit, par des temps nuageux...). Présentation de quelques applications pour mieux appréhender certains phénomènes: érosion du sol, évolution des cultures, détermination des reliefs extrêmement précise...

Auteur scientifique: Jean-Paul Rodant
Réalisateur: François Luxereau
Co-production: CNRS Audiovisuel,
Laboratoire de géologie structurale,
Département de géotectonique de
l'Université Pierre et Marie Curie
19 minutes - 1989

Compressed speech - In the rising digital communications environment, the transmission of digital speech at low bit rates without decreasing voice quality is becoming highly important. So far vocoders tend to transmit high quality speech at a few kbit/s rate.

FILTRE ET SYNTHÉTISER

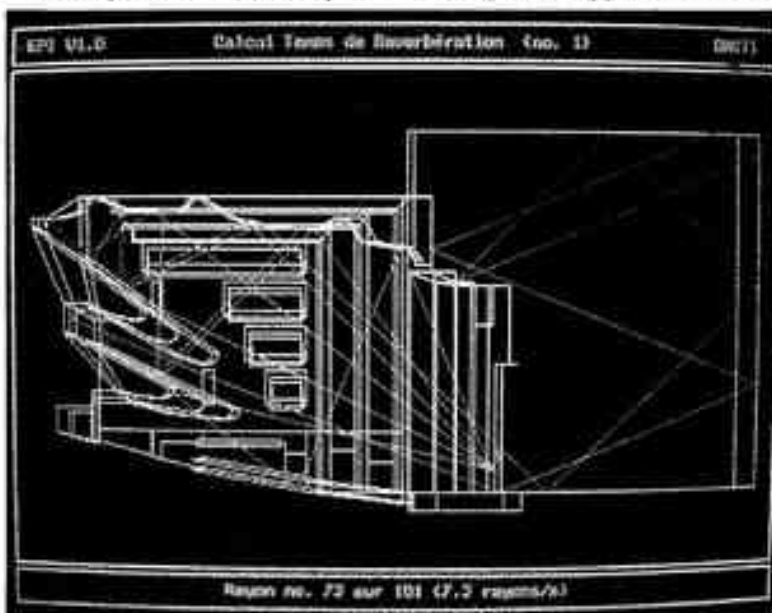
La nature appréhendée à travers nos sens ou nos appareils de mesure fournit des informations, signaux ou images, non directement exploitables. Ces informations sont dégradées par le bruit, déformées par les instruments de mesure. Elles sont également brouillées dans leur propagation entre la source et le récepteur. Enfin, elles ne sont pas toujours accessibles sous une forme directement lisible. Réduire le bruit en le filtrant, restaurer les informations en corrigeant les aberrations dues aux instruments de mesure ou à la propagation, augmenter la lisibilité, créer des sons ou des images synthétiques sont les objectifs de la mise en forme de l'information.

Cette mise en forme se situe au centre de la chaîne de traitement, en aval de l'acquisition et du transport et en amont de l'exploitation et de l'interprétation des informations. Dans une vision anthropocentrique, la mise en forme de l'information occupe la position des sens, à l'interface entre le monde sensible et le cerveau.

On range parfois la mise en forme de l'information dans les techniques dites de "bas niveau", mais comme un système bouclé dans lequel les différents étages sont en communication dans les deux sens. Cette vision plus réaliste et plus féconde de la chaîne globale de traitement nous donne la trame des développements récents des techniques de mise en forme de l'information.

Cette information est dégradée par des parasites que l'on appelle bruits. En fait il serait préférable, pour mettre en évidence la symétrie et la relativité des différents éléments, de séparer l'information en partie utile et en partie inutile ou parasite. On voit apparaître là le bouclage vers l'aval: l'utilité d'une information est conditionnée par le but poursuivi. Parallèlement, il faut insister sur le caractère relatif des notions de signal et de bruit. Un changement de but peut les commuter! Dans la "restauration de vieux enregistrements", il apparaît que les craquements des disques usés peuvent être un bruit ou un facteur d'authenticité. Après avoir identifié le bruit, l'objectif paraît simple: il faut le supprimer ou le réduire. La réduction de bruit est sans doute le point de départ historique du traitement du signal qui a donné naissance au paradigme du rapport signal sur bruit. La chasse au bruit est un art difficile qui fait appel à une mo-

tie inutile ou parasite. On voit apparaître là le bouclage vers l'aval: l'utilité d'une information est conditionnée par le but poursuivi. Parallèlement, il faut insister sur le caractère relatif des notions de signal et de bruit. Un changement de but peut les commuter! Dans la "restauration de vieux enregistrements", il apparaît que les craquements des disques usés peuvent être un bruit ou un facteur d'authenticité. Après avoir identifié le bruit, l'objectif paraît simple: il faut le supprimer ou le réduire. La réduction de bruit est sans doute le point de départ historique du traitement du signal qui a donné naissance au paradigme du rapport signal sur bruit. La chasse au bruit est un art difficile qui fait appel à une mo-



Prédiction de l'acoustique de l'opéra Bastille par le logiciel EPIDAURE du CSTB qui permet notamment de simuler l'écoute dans la salle avec effet d'espace. (© CSTB).



► déliation aussi fine que possible des propriétés du bruit et du signal et qui ne peut être menée à bien sans replacer le problème dans son contexte général. L'évaluation du résultat ne peut également se réduire à une simple quantification par le rapport signal sur bruit, mais doit faire appel à une analyse de la chaîne complète de traitement conditionnée par le but poursuivi. Les grands succès initiaux du traitement du signal sur le terrain de la réduction de bruit sont cependant issus de l'utilisation de critères énergétiques (quadratiques), associés à une modélisation gaussienne, pour le rapport signal sur bruit: le filtre adapté, le filtre de Wiener, le filtre de Kalman, le filtrage matriciel qui sont illustrés dans les articles suivants, en sont des exemples.

Mettre en forme l'information, c'est aussi pallier les déformations qu'elle subit lors du transport ou de la propagation et de l'acquisition par un instrument de mesure. Comment? Le signal a été déformé? Nous allons lui appliquer une transformation inverse, nous allons le déconvoluer. La déconvolution est la pierre philosophale du traitement des signaux et des images. Formellement très simple (une division après transformation de Fourier), elle s'avère très risquée pour des raisons fondamentales issues du mauvais conditionnement de la transformation inverse. Cette difficulté est analysée dans plusieurs des articles qui suivent. Là aussi une approche partielle s'avère improductive. Pour mener à bien la déconvolution, il faut revenir à une vi-

sion globale de la situation en faisant appel à des contraintes de régularisation prenant en compte la modélisation du processus étudié et intégrant les objectifs poursuivis. Il faut élargir la vision de la déconvolution et la replacer dans le cadre général des problèmes inverses qui font coopérer les données observées et l'ensemble des informations disponibles.

Une déformation importante introduite par les instruments de mesure sur les signaux et les images est la troncature. Ceci est particulièrement vrai pour les signaux reçus en différents points de l'espace: antennes, optique... Ce champ de recherche fait appel aux techniques de régularisation et de modélisation pour étendre le domaine du signal connu en réalisant une prédiction. Sans croire aux vertus de la prédiction parfaite, on a réussi, toujours en immergeant la mise en forme dans son contexte global, à réaliser des prolongements significatifs du signal observé (pupille virtuelle). On peut également lutter contre cette limitation en multipliant les angles de vue: c'est le grand succès de la tomographie qui utilise les résultats mathématiques de l'inversion des transformations intégrales. La moisson de résultats est ici très riche: la tomographie médicale (scanner), la prospection sismique, l'échographie, le contrôle non destructif, l'astronomie, la radioastronomie... ont largement progressé sur la base de ces techniques.

Finalement, la mise en forme conduit à la synthèse de signaux complexes. C'est le

cas, par exemple, de la parole synthétique qui est actuellement un sujet en pleine activité, ou encore de la simulation de l'espace sonore subjectif, débouchant sur l'amélioration de la qualité acoustique des salles. Quant aux images synthétiques, leur utilisation conjointe à celle des techniques d'analyse devrait permettre de résoudre le problème de l'analyse de scène de bureau par ordinateur, comme le montre le dernier article de ce chapitre.

Thème central de la discipline "Traitement du signal et de l'image", la mise en forme de l'information demeure un sujet porteur. Cette activité a donné naissance à de nombreuses études théoriques autonomes essentiellement dans la modélisation probabiliste des signaux et des bruits, dans l'augmentation du pouvoir de résolution des instruments de mesure et dans la mise au point de méthodologies de représentation des signaux. Elle a su se renouveler en faisant appel à une vision globale de la chaîne de traitement allant de l'acquisition des signaux et des images à leur interprétation. L'analyse critique et l'élargissement de la notion de rapport signal sur bruit, la prise en compte de l'ensemble des informations utiles remplaçant la déconvolution dans la classe générale des problèmes inverses, les nouvelles pistes ouvertes à la représentation des signaux et des images et les premiers succès obtenus dans la synthèse de signaux et d'images complexes ouvrent la voie aux recherches futures.

Jean-Louis Lacoume,
professeur à l'Institut national
polytechnique de Grenoble

La restauration des vieux enregistrements

Si la suppression des craquements à l'aide des méthodes numériques permet facilement d'améliorer la qualité d'écoute, la suppression du bruit de fond permanent est une opération plus délicate.

■ Jean-Christophe Valière,
Silvio Montrésor,
Jean-François Allard

Le nombre de documents sonores stockés dans le monde est difficilement estimable. Pour la France, la Phonothèque nationale est détentrice d'environ un million d'archives sonores, tous supports confondus, pro-

(Old recording restoration - Digital signal processing can be used to remove impulse noise and background noise present in old recordings. The detection of the impulse noise, and the reconstitution of the signal where impulse noise is located, can be performed by using linear prediction or wavelets. The removing of the background noise has important drawbacks, such as musical noise or a modification of the signal, and must be performed cautiously.)

venant de fonds privés ou publics. L'Institut national de l'audiovisuel possède l'ensemble des archives sonores de la radio et de la télévision depuis 1936. Des collectionneurs possèdent jusqu'à 120 000 disques dont certains sont les derniers exemplaires d'une édition. La prise de conscience de la collectivité pour cette masse de documents se retrouve dans le vocable maintenant couramment utilisé de « patrimoine sonore ». Comme pour nos églises romanes ou nos cathédrales gothiques, on a le souci de reconnaître la valeur de ces fonds, les maintenir en l'état et si possible les rediffuser.

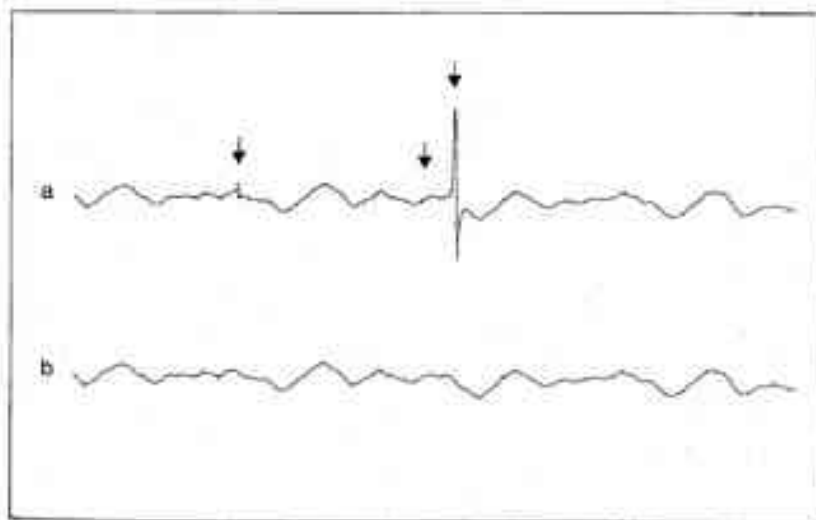
Le charme discret des craquements

C'est dans les années soixante-dix que la restauration de ces fonds commença à être envisagée. Les dégradations des vieux enregistrements se traduisent par des bruits parasites qui peuvent être classés essentiellement en deux catégories, d'une part des bruits impulsionnels brefs, les craquements, et d'autre part

un bruit de fond continu plus ou moins stationnaire. A défaut de modifier le signal musical ou le signal de parole dans l'enregistrement, il est tentant de supprimer ou de réduire ces bruits parasites. En fait, l'idée d'une telle opération suffit à alimenter de violentes polémiques. Par exemple, il a été évoqué « la poésie du craquement » qui pourrait être exprimée par le fait que le support, outre l'enregistrement de musique ou de parole, recèle une empreinte qui lui est propre, témoin de son histoire, le rendant ainsi unique.

La suppression des bruits impulsionnels a été tentée initialement avec des techniques analogiques et peut être effectuée maintenant efficacement et sans dommage pour le signal avec des techniques numériques. Le craquement est d'abord localisé, soit simplement par ses composantes dans l'aigu en utilisant un filtre passe-haut ou une décomposition sur une base d'ondelettes, soit par son évolution temporelle différente de celle du signal musical ou du signal de parole au moyen de la prédiction linéaire. Une interpolation de l'enregistrement avant et après craquement peut être utilisée pour reconstituer le signal. Une telle opération est présentée sur la figure ci-jointe. Dans cette étape, la prédiction linéaire et la décomposition sur une base d'ondelettes sont des outils efficaces.

Le problème du bruit de fond continu est beaucoup plus délicat. Des techniques basées sur la soustraction spectrale mises au point en télécommunications sont utilisées, mais le remède peut être pire que le mal, l'opération pouvant se traduire par l'adjonction de bruits parasites (le bruit musical) rendant l'écoute désagréable. D'autre part, le signal utile peut être modifié si le traitement est effectué sans discernement. Par contre, une meilleure restitution des transitoires musicaux (attaques) peut être obtenue par une décomposition préalable du signal dans un banc de filtre à bandes d'octave.



Exemple de restauration d'un disque 78 tours: (a) signal original de 32 millisecondes; (b) détection par ondelettes puis interpolation par prédiction linéaire.

■ Jean-Christophe Valière, chercheur au Laboratoire d'acoustique de l'Université du Maine (URA 1101 CNRS).

■ Silvio Montrésor, chercheur au Laboratoire d'informatique de l'Université du Maine.

■ Jean-François Allard, professeur à l'Université du Maine, responsable-adjoint du Laboratoire d'acoustique de l'Université du Maine (URA 1101 CNRS), avenue Olivier Messiaen, BP 535, 72017 Le Mans Cedex.

Acoustique sous-marine : comment réduire le bruit ?

Les bruits ambiants et ceux générés par le navire lui-même limitent les performances des systèmes sonar. Comment on réduit l'influence et accroître ainsi leur portée de détection ?

■ Christine Servière,
André Silvent,
Daniel Baudois

Les systèmes sonar ont diverses utilisations : localisation et identification de corps immergés (sous-marins, bancs de poissons...), communications avec des navires ou des stations fixes, ou échosondage.

Ils reçoivent, en plus du signal porteur de l'information utile, différents bruits qui diminuent leurs performances en limitant leur portée. La réalisation de systèmes performants est liée à une bonne connaissance des bruits ambiants (turbulences océaniques, vagues, pluie, ressac, bruits biologiques...) et des bruits propres au navire, d'origines mécaniques, électriques ou hydrodynamiques (bruit de machines, vibration de coques, hélices...).

Dans le cas des bruits ambiants, où il ne peut y avoir intervention à la source, des méthodes de traitement du signal existent pour la réduction du niveau des bruits qui prennent en compte les connaissances a priori du signal recherché (détection) ou des statistiques temporelles et spatiales du bruit.

Les bruits propres du navire

Dans le cas des bruits propres, des études sont menées pour minimiser, par construction, les bruits à la source (étude de la position du sonar, étude de profils et de matériaux, modification de structures génératrices d'excitation, blindages électriques...). Les méthodes de traitement du signal interviennent, à l'exploitation, à deux niveaux : la localisation des sources de bruit du navire en

ordre de marche (déséquilibre de machines, usure d'engrenages...) dans le but d'une intervention, et la soustraction d'une partie des bruits propres en utilisant des informations supplémentaires provenant de capteurs de référence situés près des sources de bruit accessibles, et en identifiant des fonctions de transfert entre les capteurs de référence et le système sonar.

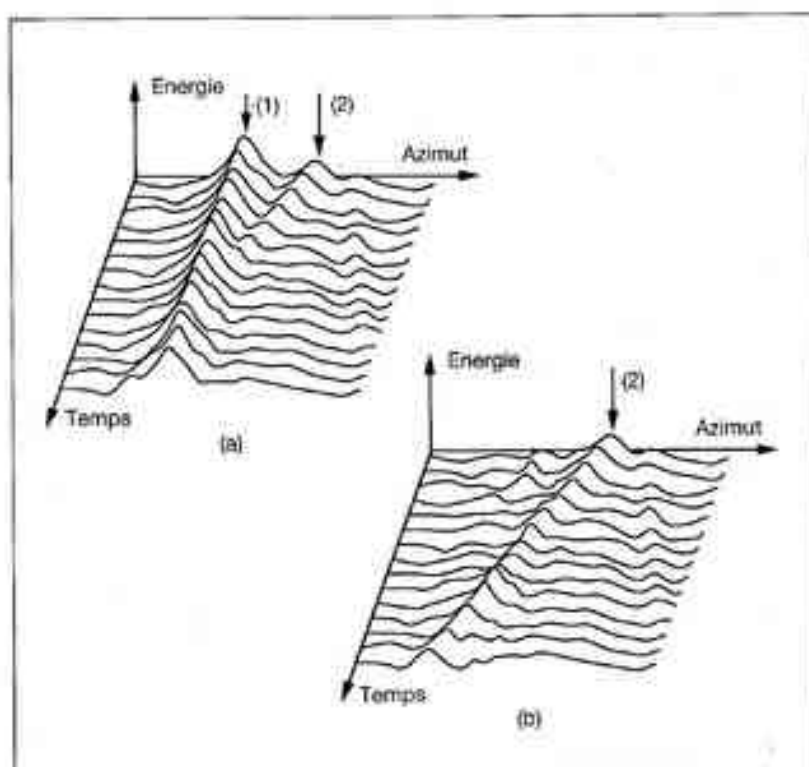
L'efficacité des méthodes de traitement du signal est claire sur l'exemple de soustraction de bruit donné sur la figure. En éliminant le bruit propre du navire, on fait apparaître la trace d'un objet de faible puissance auparavant mal identifié.

La réduction de bruit en acoustique sous-marine est un domaine important du traitement du signal et fait l'objet de programmes de recherche à long terme concernant une meilleure identification des liaisons « capteurs de références-sonar » par des techniques de filtrage non linéaire, l'optimisation de la position des capteurs de référence et une connaissance statistique approfondie des bruits ambiants.

■ Christine Servière, chargée de recherche au CNRS, Centre d'études des phénomènes aléatoires et géophysiques (URA 346 CNRS).

■ André Silvent, ingénieur à la Direction des constructions navales, Centre d'études des phénomènes aléatoires et géophysiques (URA 346 CNRS).

■ Daniel Baudois, maître de conférences à l'Institut national polytechnique de Grenoble, Centre d'études des phénomènes aléatoires et géophysiques (URA 346 CNRS), Ecole nationale supérieure d'ingénieurs électriciens de Grenoble, BP 46, 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex.



En écoute passive, on mesure au cours du temps le niveau d'énergie provenant de chaque direction d'observation : (a) le bruit propre du navire portant le sonar apparaît dans une direction fixe (1) et masque une source de faible puissance en mouvement (2) ; (b) après soustraction de bruit, la source faible ressort nettement sur toute la durée d'observation (situation simulée).

Noise reduction in underwater acoustics - The efficiency of sonar systems is limited by the ambient noise and interferences generated by the ship. Different methods of signal processing (analysis and filtering in frequency, time and spatial domains) were developed in order to reduce the influence of the perturbations and then to increase the range of the sonar systems.

Les courants faibles au secours du courant fort

Dans les centrales nucléaires françaises, l'intégrité des tubes du générateur de vapeur est contrôlée périodiquement à l'aide d'une sonde à courants de Foucault. Les exigences de sûreté et de productivité conduisent à développer un système de contrôle largement automatique.

■ Bruno Georgel

L'échange de chaleur entre les circuits primaire et secondaire des centrales nucléaires à eau pressurisée s'effectue dans le générateur de vapeur, formé de plusieurs milliers de tubes métalliques en U. Ces tubes doivent être étanches pour des raisons de sûreté : ils sont contrôlés périodiquement et bouchés dans le cas où des défauts importants (fissures) sont détectés.

Le principe du contrôle est d'induire dans la masse du matériau, des courants (dits courants de Foucault), grâce à une sonde, et de mesurer la variation d'impédance de celle-ci lors de son déplacement le long d'un tube. On injecte dans la sonde trois fréquences différentes de façon à examiner la face intérieure du tube, toute l'épaisseur, et la face extérieure du tube. Le signal mesuré par la sonde traduit les modifications de l'environnement du tube et, en particulier, les défauts éventuels.

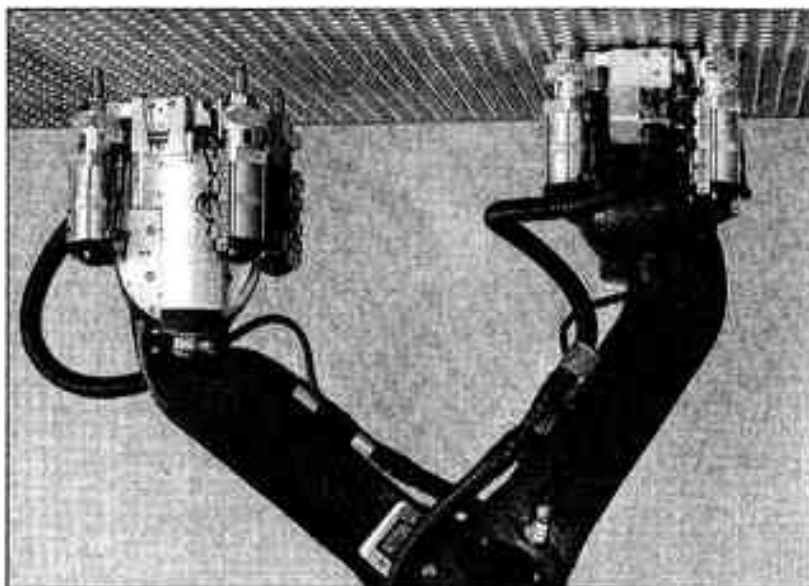
Soustraire le bruit de surface

Le traitement de ce signal est rendu obligatoire par la présence de divers bruits. Le plus pénalisant est le bruit métallurgique ou de surface, dû au procédé de fabrication des tubes (laminage). Le bruit observé est la conséquence d'une irrégularité d'état de surface (côté intérieur du tube). Il perturbe la détection des défauts externes et surtout internes.

La difficulté du filtrage tient au recouvrement des spectres du bruit de surface et du signal à restaurer : donc un filtrage passe-bande classique ne résout pas la question. Il faut recourir aux méthodes de soustraction de bruit.

En général, le bruit métallurgique se compose de quelques raies fines (trois ou quatre sinus d'amplitude notable) ; cette décomposition spectrale est néanmoins susceptible d'évoluer, jusqu'à des changements d'allure très nets.

Une variante itérative du corrélo-filtre de Baudois et Silvent a été mise en



Le nouveau robot ARMIC déplace les porte-sondes sous la plaque tubulaire du générateur de vapeur : la sonde à courants de Foucault est envoyée dans chaque tube. (Câché Intercontrôle).

œuvre. La technique est fondée sur une référence de bruit ressemblant fortement au bruit perturbateur et calcule, par autocorrélation, une réponse impulsionnelle qui permet de filtrer la référence de bruit, d'en déduire une estimation du bruit perturbateur et de la soustraire du signal mesuré. La référence « bruit seul » adoptée est le signal courants de Foucault à la fréquence de contrôle de 500 kHz.

Filtrage par système expert

Le résultat d'un tel filtrage sur un signal de plaque quadrifoliée est tout à fait spectaculaire : l'expert-contrôleur devient capable de diagnostiquer l'image, débarrassée du bruit, que lui présente l'écran. Néanmoins, pour mettre au point un filtrage efficace en temps réel sur toutes les zones de tubes, il faut passer à une approche plus sophistiquée (filtrage adaptatif) et même envisager un pilotage de la fonction « filtrage » par un système expert.

From eddy current probe to electricity: weak signals help power generation - In pressurized water reactor (PWR) power plants, integrity of the steam generator tubes is periodically checked by means of eddy currents probes. Analyzing signals make possible a diagnosis of the tubes (i.e. presence of a flaw). The observed signals are mainly corrupted by surface noise. A modified version of the Baudois and Silvent correlator-filter is used to filter out this noise.

Nous avons montré l'application d'une technique de filtrage numérique (réduction de bruit) en contrôle non-destructif des tubes d'échangeurs, dans les centrales nucléaires.

La mise en œuvre d'une telle méthode, en différé actuellement, rend interprétable un signal de contrôle qui ne l'était pas. Elle permet donc de détecter plus tôt (avant percement) un défaut affectant un tube de générateur de vapeur. On voit ainsi que les techniques propres aux courants faibles (le traitement du signal) viennent au secours de la production d'énergie électrique (les courants forts) : c'est, entre autres, ce qui motive l'intérêt d'Electricité de France à leur égard.

■ Bruno Georgel, ingénieur-chercheur, EDF, Direction des études et recherches, Département surveillance diagnostic maintenance, 6, quai Watier, BP 49, 78401 Chatou Cedex.

Du signal sismique à la structure du sous-sol

Une nouvelle technique de filtrage multicomposantes permet d'améliorer la qualité des images sismiques du sous-sol et facilite leur interprétation.

■ François Glangeaud

Malgré les progrès technologiques de notre siècle, le sous-sol de notre Terre n'est toujours pas transparent. En fait, ce que l'on observe par les sondages acoustiques est souvent compliqué : l'histoire du sous-sol se traduit par l'existence de couches géologiques qui ne sont bien définies qu'en première approximation.

Un sondage sismique élémentaire

From seismic signal to underground structure - A new multidimensional signal processing method: spectral matrix filtering (SMF) is proposed to enhance signal-to-noise seismic prospecting image and separate different types of waves.

comporte un émetteur d'ondes élastiques et un récepteur enregistrant les mouvements du sol en fonction du temps. Pour éliminer les effets perturbateurs, le sondage sismique utilise la combinaison de nombreux signaux issus de plusieurs dispositifs émetteurs/récepteurs.

Un sondage sismique produit donc des images (figure a) formées par les signaux reçus sur un réseau de capteurs alignés, répartis régulièrement sur le sol. L'image, dénommée section sismique, décrit le champ d'onde acoustique réfléchi par le sous-sol en réponse à une excitation impulsive brève émise au niveau du sol.

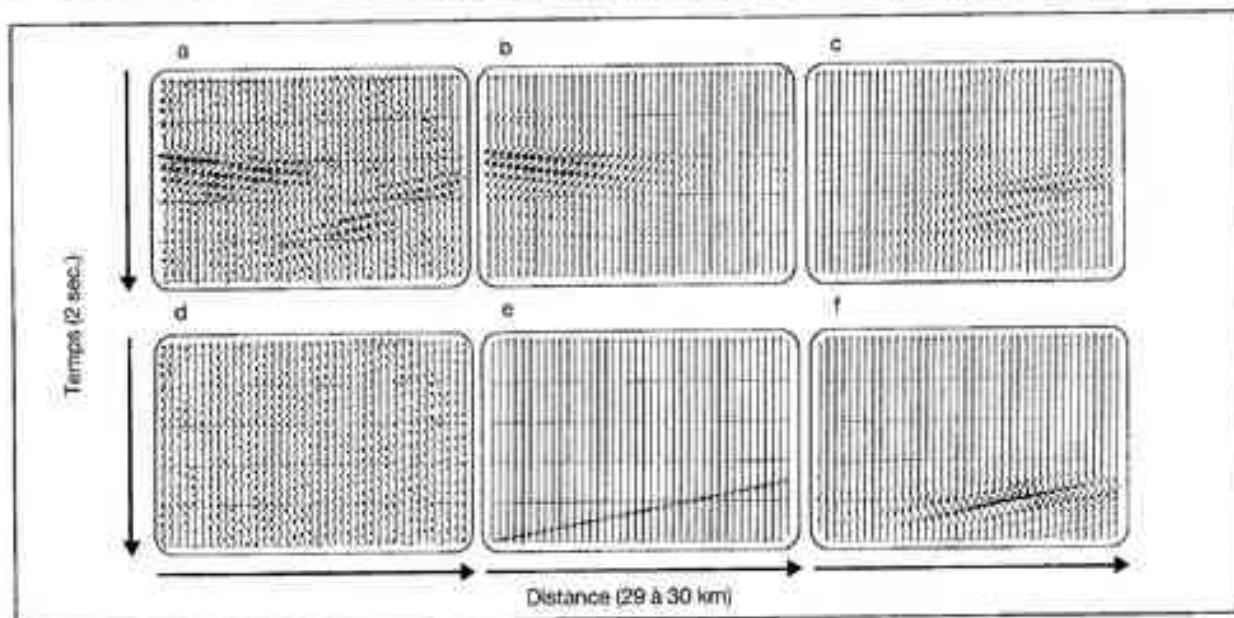
A partir de la section sismique, on veut remonter à la structure du sous-sol. Pour atteindre cet objectif, on met en œuvre des techniques de traitement du signal destinées à faire ressortir l'infor-

mation utile (amélioration du rapport signal sur bruit) et à séparer les différents types d'ondes réfléchies par le sous-sol (séparation d'ondes).

Nous avons développé une technique de filtrage dérivée des méthodes utilisées en acoustique sous-marine, utilisant la matrice spectrale des signaux. La matrice spectrale décrit, fréquence par fréquence, l'énergie d'interaction entre les signaux reçus sur les différents capteurs. La diagonalisation de la matrice spectrale permet de séparer du bruit les informations utiles contenues dans le sous-espace engendré par les vecteurs propres associés aux plus grandes valeurs propres. Par projection des données sur ce sous-espace, on améliore le rapport signal sur bruit.

Les différents types d'ondes constituant le signal utile sont ensuite séparés par projection sur des modèles. Cette seconde étape du traitement requiert l'introduction de connaissances issues de la modélisation de la propagation.

■ François Glangeaud, directeur de recherche au CNRS, directeur du Centre de traitement des signaux sismiques, Centre d'études des phénomènes aléatoires et géophysiques (URA 346 CNRS), Ecole nationale supérieure d'ingénieurs électroniciens de Grenoble, BP 46, 38402 Saint-Martin d'Hères Cedex.



Données de la campagne de prospection ECOS (Etude de la croûte continentale et océanique par réflexion et réfraction sismique) dans le golfe de Gascogne. Nous sommes en présence de deux ondes seulement. Le traitement sépare la section initiale en trois sections, présentées avec les mêmes échelles. (a) section sismique initiale formée de 40 signaux fonction du temps, issus de 40 capteurs régulièrement espacés. Une couche géologique réfléchissante est localisée sur la partie gauche de la figure (motif plus noir), mais on estime mal ses limites ; un deuxième motif apparaît à droite, mais il convient de le séparer du premier pour l'identifier. (b) section onde réfléchie sur la couche. (c) motif après traitement, identifié comme une onde diffractée par une faille. (d) section bruit estimée. (e) modèle physique présumé. (f) modèle estimé mettant en évidence la structure de la faille. (Contrat CEFAG/IFP, résultats publiés dans la thèse de M. Gavin).

Lissage adaptatif de potentiels évoqués

Comment améliorer la localisation de certaines ondes caractéristiques de l'activité électrique du cerveau en réponse à des stimulations ?

Christian Doncarli,
Pierre Guheneuc

L'interprétation des potentiels évoqués nécessite classiquement d'effectuer la moyenne synchrone des réponses successives à un train de stimulations pour en améliorer le rapport signal/bruit. Mis à part les problèmes de durée de l'examen et de désagrément pour le malade (chaque stimulation est constituée par une décharge électrique pour les potentiels évoqués sensitifs, un clic sonore pour les potentiels auditifs...), l'utilisation de moyennes synchrones repose sur la stricte répétabilité des potentiels évoqués d'une réponse à l'autre. Or l'amélioration souhaitée du rapport signal/bruit nécessite parfois un grand nombre

Adaptive smoothing of evoked potentials - Evoked potentials are significant brain responses to external stimulations, disturbed by the basic electroencephalographic activity. Their analysis needs an improvement of the signal/noise ratio, classically performed by the time-locked average of a set of responses to a train of stimulations. We propose an important reduction of the number of stimulations by an adaptive smoothing.

de stimulations qui fatiguent l'organisme et ne permettent plus de faire l'hypothèse précédente. Les résultats obtenus n'ont alors pas une grande signification et on propose un traitement réduisant le nombre de moyennes nécessaire à l'obtention d'un rapport signal/bruit autorisant le diagnostic. Pour cela, on travaillera sur un petit nombre de moyennes dont le rapport signal/bruit sera amélioré par un lissage temporel adaptatif.

Le lissage proposé est basé sur une modélisation ARIMA (présence d'intégrateurs) du signal traité, dont les caractéristiques statistiques sont estimées en temps réel par un filtre spécifique. Ces paramètres (variables au cours du temps) sont ensuite injectés dans un module de calcul analytique d'un filtre de Kalman asymptotique employé en aller-retour (lissage).

On dispose ainsi d'une procédure adaptative : les paramètres du filtre de Kalman sont variables au cours du temps et calculés en temps réel à partir du signal lui-même, permettant tout à tour de suivre les grandes déflexions (le filtre devient alors automatiquement plus « nerveux ») ou de filtrer le bruit. D'autre part, l'utilisation d'une procédure aller-retour élimine tout retard dans la localisation des extrema du signal (latences) dont l'évaluation est primordiale en diagnostic.



Fig. 1 - Poste d'examen hospitalier en cours de fonctionnement. On peut distinguer l'unité de stimulation sensitive, la grappe d'électrodes de recueil des potentiels évoqués et l'unité de traitement numérique et de visualisation.

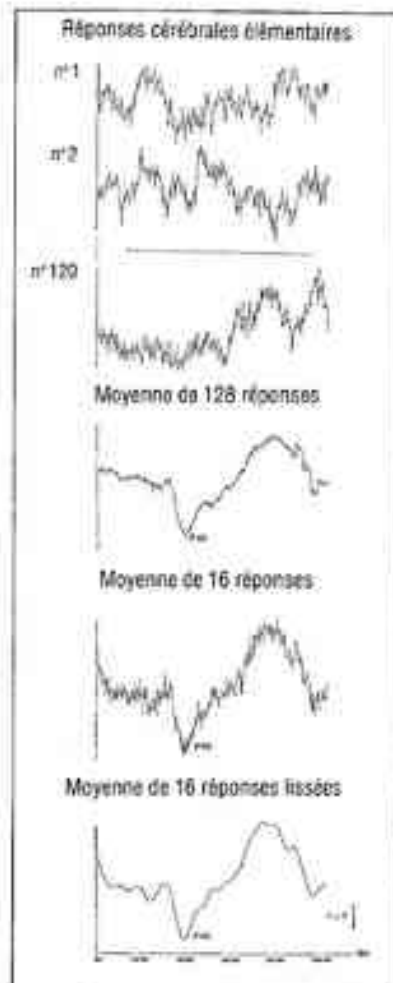


Fig. 2 - Exemple des résultats obtenus en réel : un potentiel évoqué somatosensible (nerf tibial). On trouvera de haut en bas quelques réponses élémentaires, la moyenne synchrone de 128 réponses, la moyenne des 16 premières réponses, et enfin le résultat du lissage de cette dernière, permettant sans aucune difficulté la localisation automatique de l'onde P40 après 16 stimulations.

Christian Doncarli, professeur des universités, Laboratoire d'automatique de Nantes (URA 823 CNRS), Ecole nationale supérieure de mécanique, 1, rue de la Noë, 44077 Nantes Cedex 03.

Pierre Guheneuc, professeur agrégé des Universités, chef du Service d'explorations fonctionnelles du CHR de Nantes, Laboratoire de physiologie, UER de médecine, Université de Nantes, 1, rue Gaston Veil, 44035 Nantes Cedex.

Réduction de bruit en audioconférence ou dans les mobiles

Comment le traitement du signal permet de capter la parole d'un locuteur en rejetant le bruit et la parole d'autres locuteurs.

■ Yves Grenier

Si vous avez déjà participé à une audioconférence, vous avez pu constater combien le confort d'écoute est faible. Le plus souvent, la parole de vos interlocuteurs vous est diffusée par les haut-parleurs à un niveau trop bas, pour lutter contre l'effet Larsen engendré par le retour des sons du haut-parleur vers les microphones. Pour une salle d'acoustique donnée, peut-on trouver des moyens de dépasser le seuil au-delà duquel se déclenche cette instabilité? Voilà un pari que peut se donner un traicteur de signal avec les techniques qui lui sont propres.

Téléphoner sans les mains

Considérons une autre situation. On voit de plus en plus des conducteurs pilotant leur voiture d'une main et tenant de l'autre le combiné de leur radio-téléphone. Pour des raisons de sécurité, ce comportement déjà prohibé aux USA le sera bientôt en Europe. Mais à quoi bon un téléphone de voiture si son seul usage se limite à la voiture arrêtée? La solution consiste à passer à une téléphonie mains-libres, c'est-à-dire sans combiné. Et l'on retrouve le problème précédent: l'habitacle de la voiture renvoie l'écho du signal reçu, tout en réverbérant la parole émise. Pis encore, la voiture avec tous ses bruits (moteur, roulement, aérodynamique) va noyer la parole du locuteur dans un bruit pouvant aller jusqu'à la rendre inintelligible.

Noise reduction for audioconference or in mobile vehicles - A microphone array followed by an adaptive beam-former permits the recording of the speech signal from one speaker, while rejecting ambient noise and speech signals from other speakers. For audioconference, echo cancellation and de-reverberation are also achieved by this adaptive array.



Mesure en chambre sourde d'une antenne à 15 microphones.

Effectuer une bonne prise de son dans chacun de ces deux contextes requiert donc de débiter les signaux, les déréverbérer, annuler les échos indésirables et ceci, bien entendu, sans distordre le signal utile. Les techniques portant le nom de « soustraction spectrale » corrigent le spectre du signal émis en lui retranchant celui du bruit, mais le signal utile est souvent distordu par ce traitement, et la soustraction du bruit n'est que partielle, étant donné la difficulté d'estimer le spectre de ce bruit.

Pour annuler l'écho acoustique, d'autres techniques reposent sur une identification du canal acoustique responsable de l'écho. Connaissant le signal émis par le haut-parleur, et celui recueilli par le microphone, on peut identifier un modèle de ce canal, puis synthétiser une approximation de l'écho que l'on soustrait au signal avant de l'émettre. Ces techniques sont assez performantes, mais la complexité du canal acoustique

en limite l'emploi. Elles sont aussi impuissantes à éliminer les bruits ambiants: il faudrait leur fournir une référence de bruit qui fait en général défaut dans les applications visées.

Utiliser plusieurs micros

Une autre solution consiste à employer plusieurs microphones, et traiter l'ensemble des signaux qu'ils délivrent. Un tel traitement porte le nom de « formation de voie adaptative »: on forme en effet à partir des signaux multiples une voie unique dont on peut contrôler à tout instant les caractéristiques. L'origine de ces techniques se situe dans le domaine du radar, ainsi que du sonar. Il s'agit dans ces applications de retarder les divers signaux et de les sommer, d'une manière telle que l'on engendre des interférences constructives pour le signal utile et destructives pour les signaux perturbateurs. Pour les problèmes d'acoustique aérienne, où les signaux occupent une bande de fréquence relativement large, les retards deviennent des filtrages, que l'on peut réaliser par des moyens analogiques, ou bien par des moyens numériques en profitant des progrès récents des microprocesseurs de traitement du signal.

Aux Bell Labs de AT&T existe depuis plusieurs années une antenne de 400 microphones pour les salles de conférence. Les traitements s'y font par des moyens analogiques. Dans le département Signal de Télécom Paris, nous étudions une antenne de 15 microphones pour l'audioconférence et une antenne de 8 microphones pour la voiture. Toutes deux réalisent les traitements de manière numérique, avec un échantillonnage du signal à 16 kHz. Les évaluations menées dans notre laboratoire montrent que la formation de voie adaptative pour une prise de son multimicrophone est une technique à promouvoir: elle se comporte au moins aussi bien que l'annulation adaptative pour éliminer les échos, et elle est la seule à permettre en même temps le rejet du bruit ambiant et la déréverbération du signal utile.

■ Yves Grenier, professeur à l'Ecole nationale supérieure des télécommunications, Département signal, Laboratoire traitement et communication de l'information (URA 820 CNRS), 46, rue Barrault, 75634 Paris Cedex 13.

Les problèmes inverses

Les méthodes de régularisation des problèmes mal posés sont de plus en plus employées en traitement du signal et des images.

■ Guy Demoment,
André Lannes

Dès que l'on veut faire entrer des données expérimentales dans un modèle physique, on est confronté à un problème inverse dont la résolution soulève bien souvent des difficultés inattendues. En voici un exemple très fréquent et d'une grande importance pratique. On cherche à reconstruire, ou plutôt à restaurer, un signal qui n'est pas observable directement, à partir de l'enregistrement dégradé qui en est effectué par un instrument d'observation. Moyennant des hypothèses plus ou moins justifiées de linéarité et d'invariance, le modèle physique est une convolution, et le problème à résoudre est une variété de problème inverse appelée pour cela déconvolution. Le fait est que ce problème très simple et fort répandu offre le désagrément d'être mal posé. Ceci ne signifie pas qu'il soit mal formulé, mais simplement que sa résolution est très sensible aux inévitables erreurs dues à la modélisation : même s'il est possible d'établir l'existence et l'unicité de la solution, celle-ci n'est pas stable en présence d'erreurs, ce qui est extrêmement gênant en pratique (voir l'article de C. Ahly et G. Feng).

La cartographie du sous-sol par réflexion sismique (voir l'article de F. Glangaud), l'imagerie par synthèse d'ouverture en astronomie (voir l'article de A. Lannes), la reconstruction d'image par tomographie X (voir l'article de P. Grangeat), ou par tomographie de diffraction (voir l'article de J.-P. LeFebvre), l'imagerie 3D en microscopie électronique (voir l'article de J. Lamy), sont d'autres exemples de problèmes inverses. Ils soulèvent des difficultés analogues et, comme on les rencontre aussi dans beaucoup d'autres domaines, ils ont donné lieu à des développements théoriques importants, essentiellement en physique mathématique et en statistique, sous la poussée des expérimentateurs. Tout tient en un mot : la régularisation.

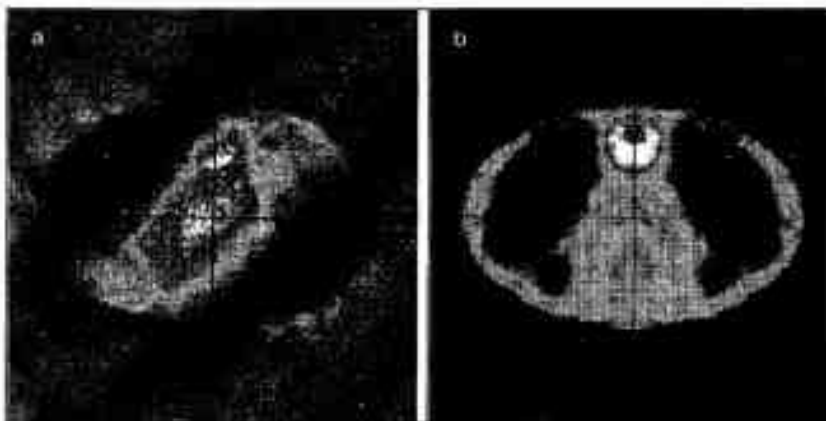
Un équilibre nécessaire entre précision et stabilité

Dans un problème mal posé, les propriétés des solutions acceptables ou significatives ne sont pas contenues dans le modèle physique initial. Il faut donc compléter l'énoncé en introduisant une information a priori pour extraire, dans la famille des solutions qui sont compatibles avec les données expérimentales, celle qui correspond le mieux au problème.

Inverse problems - Many signal and image processing problems are better solved when considered as inverse problems. Regularization methods, either deterministic or stochastic, give strong basis to control the propagation of experimental errors which is often crucial.

me. Ceci se fait en « fusionnant » dans un critère unique une mesure de la fidélité de la solution par rapport aux données expérimentales et une mesure de sa fidélité à l'a priori. Mais il faut alors trouver un compromis entre ces deux composantes antagonistes, ce qui traduit en fait la nécessité d'un équilibre entre précision et stabilité. Cette situation est typique des problèmes inverses.

Le cas des modèles linéaires et des critères quadratiques est assez bien dominé, mais ses limitations sont importantes. En effet, les modèles sont souvent non-linéaires, peu ou mal connus (on parle alors d'inversion myope ou aveugle), et l'information recherchée est souvent associée à des caractéristiques locales ou non-linéaires : ruptures, positivité. Ainsi, à titre d'exemple, le problème de la synthèse de Fourier qui est central pour beaucoup de techniques d'imagerie. Dans ce problème on dispose expérimentalement de valeurs de la transformée de Fourier d'un objet positif, mais le remplissage du domaine spectral n'est pas assez dense et peut même présenter des trous fréquentiels importants à cause de contraintes expérimentales. L'application d'une transformée de Fourier aux données interpolées fournit un résultat généralement médiocre. Mais, par exemple, lorsque l'objet à reconstruire est positif, la seule addition de cette information supplémentaire, au travers d'une mesure d'entropie, suffit bien souvent à améliorer les images de manière spectaculaire.



Reconstruction d'une image par synthèse de Fourier. Les données expérimentales sont constituées de quelques valeurs de la transformée de Fourier de l'objet sur des contours algébriques du domaine spectral. A gauche, reconstruction conventionnelle, par interpolation linéaire. L'image obtenue est irréaliste, exhibant en particulier des zones entières de valeurs négatives, une mauvaise résolution spatiale, une mauvaise résolution en amplitude. A droite, inversion par régularisation avec l'entropie de l'objet choisie comme fonctionnelle régularisante. (Cliché A.M. Djafari, L2S-UMR 14 CNRS).

■ Guy Demoment, professeur des universités, Laboratoire des signaux et systèmes (UMR 14 CNRS), Ecole supérieure d'électricité, Plateau du Moulon, 91192 Gif-sur-Yvette Cedex.

■ André Lannes, directeur de recherche au CNRS, Observatoire Midi-Pyrénées, 14, avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse.

La tomographie ultrasonore en réflexion

Du contrôle non destructif des matériaux à l'imagerie médicale : le caractère entièrement numérique de la tomographie ultrasonore en réflexion lui confère une grande souplesse d'utilisation.

■ Jean-Pierre Lefebvre

Lorsqu'une onde acoustique rencontre une inhomogénéité, elle est diffusée dans toutes les directions de l'espace, en particulier vers l'émetteur qui lui a donné naissance. C'est la rétrodiffusion, ou plus communément l'écho. Son exploitation dans le domaine ultrasonore est assez aisée car les sondes utilisées sont réversibles et peuvent donc servir pour la réception comme pour l'émission. L'écho arrive avec un retard qui correspond au trajet aller-retour sonde-inhomogénéité de l'onde et son amplitude est directement liée à l'importance de l'inhomogénéité. Si la sonde est bien directive et si on connaît sa position et son orientation, la

mesure du retard de propagation permet de localiser l'inhomogénéité, tandis que l'amplitude du signal renseigne sur son importance. La présentation de cette double information sous forme d'image codée en intensité (ou en couleur) de pixel réalise une véritable coupe du milieu, chaque inhomogénéité (on parle alors de diffuseur) se traduisant par un point plus ou moins brillant (ou de couleur différente). C'est le principe de base de l'échographie.

Améliorer la résolution

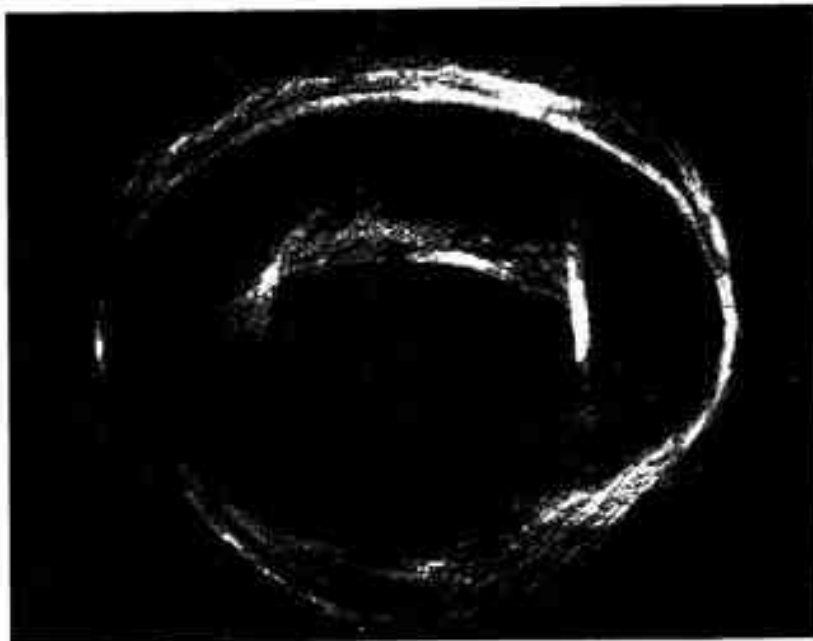
Un paramètre important qui détermine la qualité d'un système d'imagerie est son pouvoir de résolution. Pour l'échographie, il faut distinguer deux résolutions : la résolution axiale, liée à la

Ultrasonic reflection tomography - Usual pulse-echo ultrasonic imaging is achieved with antennas in order to improve the resolution. The other way explored by ultrasonic reflection tomography is to use a wide broad aperture element moved all around the object and to build images in a full numerical manner, as done in X-ray tomography.

qualité temporelle des signaux émis et la résolution latérale, liée à la qualité spatiale des faisceaux. La première est d'autant meilleure que les signaux sont brefs et donc que la sonde est large bande, la seconde que les faisceaux sont étroits et donc que la sonde est directive. Or, plus la dimension du dispositif est grande (vis-à-vis de la longueur d'onde), plus cette directivité est forte, ce qui conduit à utiliser des systèmes multiéléments : les antennes.

Une alternative consiste à utiliser une sonde non directive et à scruter l'objet dont on veut réaliser une image sous un grand nombre d'angles de vue différents, en faisant par exemple tourner le capteur autour de l'objet. Un traitement numérique collectif de l'ensemble des données, du même type que celui utilisé en tomographie X, permet alors, en exploitant les redondances, de remonter à la réflectivité locale du milieu. C'est la tomographie ultrasonore en réflexion. Son caractère entièrement numérique lui confère une grande souplesse d'utilisation : la technique de base vaut aussi bien pour le contrôle non destructif des matériaux que pour l'imagerie médicale.

Lorsqu'on peut faire le tour complet de l'objet, tout se passe comme si on avait affaire à une antenne de dimension infinie. La résolution est alors isotrope et égale à la résolution axiale du transducteur. En fait, l'ensemble des mesures qu'on peut réaliser est discret et présente en général un certain nombre de lacunes plus ou moins importantes. Tout l'art du traiteur de signaux consiste alors à restaurer l'information manquante, tant du point de vue spatial (algorithmes de lissage) que fréquentiel (algorithmes de déconvolution).



Tomographie ultrasonore en réflexion : image d'un œil de mouton excisé (d'après la thèse de S. Mensah, LMA, 1990). 180 acquisitions ont été effectuées tous les deux degrés, avec une sonde large bande centrée sur 2,25 MHz. Les signaux échographiques sont enregistrés par un oscilloscope numérique (fréquence d'échantillonnage 20 MHz, quantification sur 8 bits). L'algorithme de reconstruction utilisé est une variante de l'algorithme standard, renforcée par un algorithme de lissage spatial et par un algorithme de déconvolution temporelle dû à l'équipe de G. Demoment au L2S.

■ Jean-Pierre Lefebvre, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de mécanique et d'acoustique (UPR 7051 CNRS), 71, chemin Joseph Aiguier, BP 71, 13402 Marseille Cedex 9.

L'intérieur du corps en trois dimensions

Pour mesurer des masses et suivre des formes à partir de radiographies X, la reconstruction localise l'information en 3D, facilitant l'analyse des structures internes de l'organisme humain.

■ Pierre Grangeat

Le rayonnement X constitue un moyen d'investigation privilégié pour explorer la matière. Aux énergies de l'ordre de 100 keV, l'interaction avec les tissus organiques introduit une atténuation le long d'un rayon rectiligne, proportionnelle à la somme des masses volumiques accumulées sur ce trajet. Si on représente l'objet étudié par la cartographie tridimensionnelle f des valeurs locales de sa masse volumique, la mesure est modélisée comme l'intégrale de la fonction f le long de la droite de mesure. Pour étudier la structure tridimensionnelle d'un objet, on réalise les acquisitions selon différentes incidences de mesure grâce à un détecteur bidimensionnel, par exemple un intensificateur d'image radiologique. Pour une direction donnée, la fonction Xf définie par les mesures intégrales associées à chaque pixel constitue donc une projection. Sur ces mesures de projection, les structures se superposent les unes aux autres et l'information cumulée ne permet pas d'isoler une région d'intérêt.

Localiser l'information en 3D

L'objectif de la reconstruction est de localiser l'information à partir de projections réparties angulairement autour du patient. La première approche, de type vision par ordinateur, est d'automatiser la démarche mentale du radiologue, à savoir détecter les structures par analyse d'image et les reconstruire dans l'espace par mise en correspondance. La

deuxième approche, plus classique et plus générale, est de calculer la fonction tridimensionnelle f à partir de l'ensemble des projections Xf . Le modèle analytique direct reliant l'objet f aux projections Xf suivant chacune des incidences est appelé transformation rayon X. La reconstruction revient à résoudre le problème inverse, c'est-à-dire à mettre en œuvre l'enchaînement des transformations nécessaires pour calculer f à partir de Xf . La fonction f représente alors un ensemble de coupes transverses parallèles de l'organisme.

Sur cette cartographie, il devient possible d'isoler une région d'intérêt interne à l'organisme et de déterminer sa masse volumique moyenne. Par exemple, pour le projet *tridemos* (voir figure), il s'agissait de reconstruire une vertèbre lombaire pour étudier la minéralisation du corps vertébral.

Guider la main du chirurgien

En outre, cette image 3D reconstruite permet aussi d'appréhender la forme de structures anatomiques complexes comme un arbre vasculaire ou une surface osseuse. C'est l'objectif du projet *MORPHOMETRE* conduit par General Electric CGR et dont le LETI est partenaire. Ce système permettra ainsi au chirurgien de guider une aiguille de ponction sans endommager le réseau vasculaire cérébral,

contrôler la progression d'un cathéter dans les coronaires lors d'une angioplastie, étudier les déformations osseuses traumatiques ou congénitales pour concevoir une prothèse ou planifier une chirurgie réparatrice.

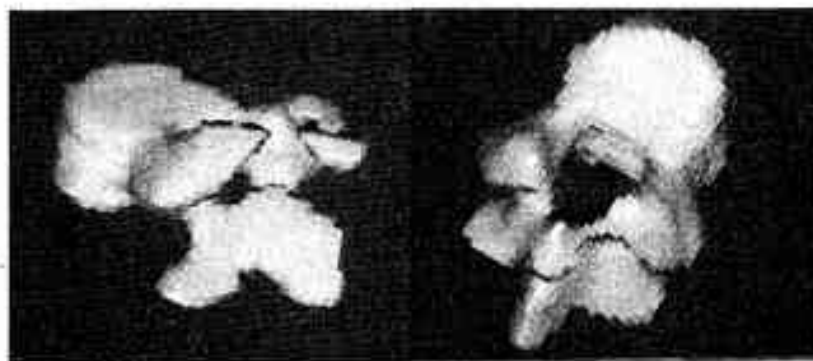
De nouveaux axes de recherche

L'imagerie 3D impose de traiter des millions de données. Une fois l'algorithme défini, un second effort de recherche doit être conduit pour que les calculs s'exécutent dans les temps les plus courts sur des mini-supercalculateurs constitués de plusieurs processeurs en parallèle. L'optimisation des temps de calcul doit porter sur la structure des boucles de calcul, les protocoles d'accès aux données en mémoire, la parallélisation des algorithmes. Enfin, pour préparer l'équipement des systèmes futurs, un troisième effort de recherche doit être entrepris sur l'étude de processeurs dédiés à la reconstruction d'image.

Nous avons présenté ici des recherches associées à l'imagerie 3D par rayonnement X. Au LETI, de nouveaux axes de recherche sont actuellement explorés, comme la tomographie d'émission 3D qui permet de réaliser une cartographie de traceurs radioactifs et de suivre leur évolution dans l'organisme.

■ Pierre Grangeat, ingénieur au Commissariat à l'énergie atomique, Direction des techniques avancées, Laboratoire d'électromipé, de technologie et d'instrumentation, Centre d'études nucléaires de Grenoble, avenue des Martyrs, BP 85 X, 38041 Grenoble Cedex.

Reconstructing the three-dimensional internal structures of human body - X-ray beam provides mass and shape measurements. But on radiographs, internal structures are overlapped. The reconstruction localizes the information in 3D from a set of radiographs and separates each structure. Two projects and the main research in 3D image reconstruction are outlined.



Projet *tridemos* : représentation de la forme d'une vertèbre lombaire L5 reconstruite pour mesurer la masse volumique osseuse moyenne du corps vertébral. (Les acquisitions ont été réalisées sur la maquette expérimentale construite au LETI lors d'une étude cofinancée par le CNES).



Synthèse d'ouverture et très haute résolution

Quelques perspectives technologiques liées à la synthèse d'ouverture à très haute résolution, notamment en interférométrie optique et en imagerie radio.

■ André Lannes

L'idée de synthèse d'ouverture est de synthétiser une image très haute résolution en utilisant comme données des informations interférométriques obtenues à partir d'une pupille dont les éléments sont plus ou moins disjoints. La dimension des plus petits détails de l'image est inversement proportionnelle à la distance séparant les éléments pupillaires les plus éloignés. Il s'agit là d'un principe qui a déjà été très largement utilisé en imagerie radio, par exemple dans les dispositifs à très longues « lignes de base ».

La communauté scientifique est d'autant plus concernée par ces méthodes d'observation que l'Europe a décidé de se doter du plus grand réseau de téles-

copes optiques jamais implanté sur Terre. Avec ses quatre miroirs de 8 m de diamètre et ses trois à quatre télescopes auxiliaires de 2 m de diamètre, le VLT (Very Large Telescope) disposera d'un mode interférométrique absolument unique qui permettra d'accroître le pouvoir de résolution d'un facteur 100. Par exemple, pour une longueur d'onde de 0,5 μm et une « pupille virtuelle synthétisée » de 100 m de diamètre, la limite de résolution est de l'ordre du millième de seconde d'arc, ce qui revient à distinguer une balle de ping-pong (de 2 cm de diamètre) à 4 000 km de distance.

Un formidable banc d'essai

Les principes observationnels de base se heurtent à plusieurs difficultés. La première résulte du caractère disjoint des éléments pupillaires. La situation est alors semblable à celle rencontrée en tomographie médicale lorsqu'il est impossible de multiplier les angles de vue : il manque un certain nombre d'informations. En termes plus techniques, le spectre de Fourier de l'objet observé est tronqué par le dispositif expérimental.

A cela vient s'ajouter une autre difficulté : la partie accessible du spectre se trouve brouillée par les fluctuations de phase introduites par l'atmosphère. Comme en cristallographie ou en microscopie électronique quand on cherche à caractériser une structure à partir de son diagramme de diffraction, il faut

restaurer certains termes de phase. La solution des problèmes inverses de synthèse d'ouverture exige donc des méthodes de « synthèse de Fourier » particulièrement robustes, dans lesquelles doivent être notamment fusionnées les informations a priori dont dispose l'observateur (voir l'article de G. Demoment et A. Lannes).

Jusqu'à sa mise en service complète, en l'an 2 000, le VLT sera un formidable banc d'essai pour de nombreuses technologies de pointe. Cet aspect est d'autant plus attrayant que l'implantation terrestre du VLT sur un site désertique, mais accessible, de la Cordillère des Andes autorisera des audaces technologiques qu'on ne peut pas actuellement envisager dans un programme spatial. On peut aussi considérer que l'interférométrie au sol, dans le cadre notamment du VLT, prépare de façon méthodique l'interférométrie du prochain millénaire. A titre indicatif, on réfléchit déjà sur les possibilités d'implanter un réseau de télescopes optiques sur la Lune.

Pour atteindre tous ces objectifs il faut, d'une part, réaliser des dispositifs expérimentaux de très haute technologie, et, d'autre part, développer des méthodes élaborées de traitement du signal et des images. On peut donc s'attendre à ce que les recherches menées dans le cadre du VLT aient des retombées importantes dans de nombreux secteurs. Sont bien sûr directement concernés tous les domaines où il est question de synthèse d'ouverture à très haute résolution : surveillance radar du trafic aérien, suivis radar et optique des satellites à partir du sol, observation de la Terre à partir des satellites...

Aperture synthesis methods - The image-reconstruction problems raised by the experimental devices of aperture synthesis play a crucial part in radio imaging and optical interferometry. These very particular problems of Fourier synthesis give rise to many studies in signal and image processing. The field of application directly concerned is of course high-resolution imaging. In this very sensitive technical context, the prospects and stakes of the European project VLT (Very Large Telescope) are examined.

■ André Lannes, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire d'astrophysique de Toulouse (URA 285 CNRS), Observatoire Midi-Pyrénées, 14, avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse.

La modélisation du conduit vocal

En cherchant à simuler le comportement des organes articulatoires mis en jeu lors de la production de la parole, les modèles de fonctionnement du conduit vocal visent actuellement à l'anthropomorphisme.

■ Louis-Jean Boë,
Shinji Maeda,
Pascal Perrier

Durant l'acte de parole, l'écoulement de l'air issu des poumons fait vibrer les cordes vocales et,

simultanément, cette oscillation le transforme en une succession de « poufs » sonores, quasi-périodiques, bien caractéristiques de la source vocale. Ce flux aérien et sonore va se propager le long des conduits vocal et/ou nasal qui vont le transformer spectralement (filtrer), jusqu'à radiation par les lèvres

et/ou les narines. Dans la production des voyelles, la forme du conduit vocal laisse la place à un écoulement relativement régulier (laminaire) alors qu'un fort étranglement, voire une fermeture, va provoquer l'apparition de bruits de turbulence, ce qui caractérise les consonnes. Ainsi une occlusion, suivie d'une

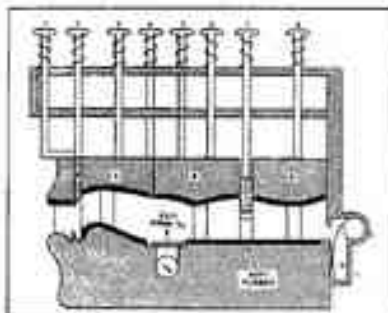


Fig. 1 - Un modèle articulatoire de production qui illustre bien la conception « tuyau » : capable de générer des sons stables, mais peu réaliste d'un point de vue physiologique, ce type de modèle n'a pas permis d'avancer vers la compréhension et la production de la parole continue (d'après Riesz, 1939).

brusque ouverture due au mouvement des lèvres (p, b, m) ou de la langue (t, n, k), provoque un arrêt momentané du signal, suivi d'un très bref bruit d'explosion : un rétrécissement produit un bruit de friction relativement régulier (f, s, ch). La forme des cavités orales résulte de la disposition de la langue, de la mâchoire, des lèvres : les fosses nasales étant mises à contribution si le voile du palais est abaissé, comme il l'est normalement dans la respiration. Ce sont plusieurs dizaines de muscles qui commandent en parallèle la source et le conduit vocal dont la forme peut évoluer très vite au cours du temps (un son dur en moyenne moins de 100 ms).

Les limites de l'approche acoustique

Les premiers travaux sur la modélisation de la production de la parole se sont attachés à simuler le comportement d'un tuyau acoustique, ayant les dimensions du conduit vocal, discrétisé en une vingtaine d'éléments cylindriques mis bout à bout, excités par des sources sonores ayant les mêmes caractéristiques que la source laryngienne et/ou les sources de bruit.

De 1948 à 1960, ces études acoustiques ont permis d'asseoir une théorie de la production du signal de parole. La modélisation précise des sources de

Vocal tract modelling - Speech production models, originally unrealistic acoustic tubes, are now based on anatomic and physiological data, and thus permit simulation of 3D articulatory behavior. Still, the development of a simulated or robotic speaker is unlikely in the immediate future.

bruit fait encore l'objet de nombreuses études. Ainsi, les voyelles sont caractérisées par une série de résonances principales (les formants) ; au voisinage des consonnes, ces formants vont présenter des transitions. Les trois premiers formants suffisent à l'auditeur pour identifier une voyelle. Ainsi, les études acoustiques ont abouti à la construction de synthétiseurs à formants où les n tuyaux sont remplacés par des filtres en cascade. Cette représentation de la parole en formants est efficace et explicative tant d'un point de vue acoustique que perceptif. Elle a permis la réalisation de synthétiseurs : le plus élaboré a été développé par D. Klatt au MIT (KLATTALK).

Mais la description de l'évolution temporelle des formants, pour la parole continue, est extrêmement complexe et il n'existe pas de modèles généraux de prédiction. Il n'y a pas de correspondance simple entre une suite de caractères (phonétiques) représentant une séquence de sons et les caractéristiques acoustiques de celle-ci. Comme nous l'avons remarqué, le son résulte de la disposition et de l'évolution de nombreux articulateurs (cordes vocales, lèvres, langue, mâchoire, voile du palais) qui sont commandés en parallèle, mais dont les mouvements n'évoluent pas séquentiellement d'un son à un autre. D'une part, quand cela n'a pas de conséquences acoustiques, certains articulateurs anticipent de plusieurs sons la position requise afin de mieux optimiser leur déplacement. Par exemple les lèvres du s de *son* sont arrondies alors que celles du s de *si* sont étirées : elles préfigurent ainsi la position requise impérativement pour *ou* et *i*. Ce phénomène d'anticipation est d'ailleurs bien caractéristique de tout geste finalisé. D'autre part, il existe de multiples combinaisons

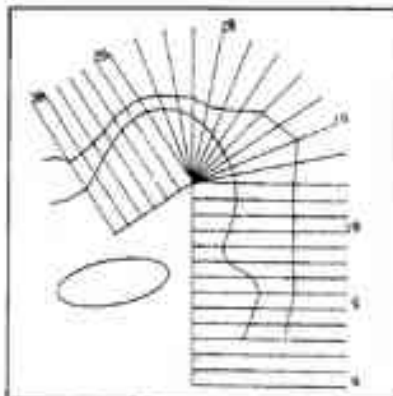


Fig. 2 - Un modèle bidimensionnel délivrant la coupe sagittale du conduit vocal et l'orifice labial, qui intègre les contraintes interarticulateurs. (d'après Maeda, 1989).

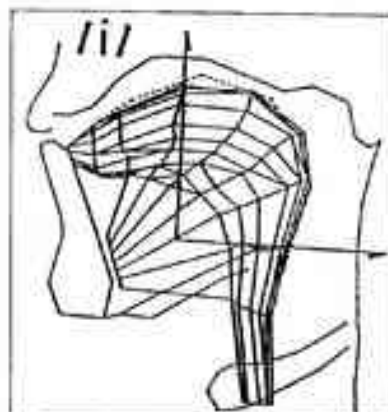


Fig. 3 - Un modèle tridimensionnel du conduit vocal qui intègre les contraintes mécaniques de la langue (d'après Hashimoto et Suga 1986).

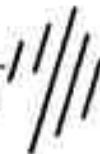
de positions d'articulateurs qui aboutissent à peu près au même résultat acoustique. Enfin, ajouter à cela que les locuteurs n'ont pas tous les mêmes conduits vocaux, qu'ils ne font pas exactement les mêmes gestes pour parler, et qu'ils peuvent changer, d'un jour à l'autre, leurs habitudes articulatoires...

L'approche antropomorphique

Pour toutes ces raisons, il est préférable de spécifier l'organisation temporelle de la parole sur le plan articulaire, avec ses contraintes et variabilités, plutôt que sur le plan acoustique, qui n'en est que la conséquence. Il faut arriver non seulement à modéliser les déplacements des organes à l'origine des évolutions du conduit vocal, mais aussi inférer des signaux de contrôle de ces organes et, bien entendu, pouvoir confronter ces simulations à de nombreuses données d'observation.

La jonction avec les services de radiographie des Centres hospitaliers universitaires s'est établie. Il fallait accéder aux derniers développements de l'imagerie médicale : radiocinématographie, scanner, imagerie par résonance magnétique, tout un ensemble de techniques d'imagerie permettant l'acquisition de données.

Certains centres de recherche se sont spécialisés dans l'acquisition de ces données, dont on devine qu'elles ne peuvent être exploitées que par des experts. Des connaissances anatomiques et physiologiques accumulées par les spécialistes d'oto-rhino-laryngologie et de chirurgie maxillo-faciale ont ainsi été transmises. Les modèles articulatoires du conduit vocal permettent maintenant de générer la forme du conduit vocal, en deux - voire trois - dimensions, à partir de



► commandes qui simulent le comportement des articulateurs (langue, mâchoire, lèvres, voile du palais...).

Dès le début des années 80, certaines connaissances avancées par les psychologues spécialistes de contrôle moteur ont aussi été intégrées. La commande de la langue et des lèvres, portées par la mâchoire, n'est, après tout, pour certains mouvements, pas radicalement différente de celle de la main déplacée par le bras, dans le cas d'un pointage de cible par exemple.

A quand les robots parlants ?

Les modèles du conduit vocal sont donc en passe de devenir des robots parlants et, comme tous les robots, ils posent des problèmes de pilotage. Avec une petite dizaine de paramètres de commande, il existe de multiples possibilités de parvenir au même résultat : comment donc arriver à contraindre pour simuler la « bonne » solution, c'est-

à-dire celle qui est optimalement utilisée par le locuteur ? Une des réponses passe par une meilleure connaissance du comportement des articulateurs et de leurs évolutions parallèles, mais aussi par une meilleure compréhension du système intelligent qui les contrôle : c'est l'approche sciences de la cognition.

La parole est bel et bien un signal biologique contrôlé à un haut niveau et les signaux de contrôle nous restent pratiquement inaccessibles. En observant les trajectoires de diodes lumineuses sur des articulateurs, ou des tomographies du cerveau à émission de positons, on reste dans la position d'un observateur qui tenterait de modéliser les trajectoires d'une automobile, sans connaître les mobiles du trajet du pilote, donc sans pouvoir comprendre l'exploitation par le système nerveux - et plus généralement par les signaux de contrôle - des propriétés physiques internes (musculo-squelettiques) et externes (dynamique du véhicule) à l'organisme.

Arriver ainsi à réaliser un robot parlant, c'est faire un grand pas dans la connaissance de la théorie du contrôle du mouvement humain, en robotique, et bien entendu... dans les sciences de la parole.

■ Louis-Jean Boë, ingénieur-chercheur, Institut de la communication parlée (URA 368 CNRS), Institut national polytechnique de Grenoble et Université Stendhal, BP 25 X, 38040 Grenoble Cedex.

■ Shingo Maeda, directeur de recherche au CNRS, Ecole nationale supérieure des télécommunications, Laboratoire traitement et communication de l'information (URA 820 CNRS), 46, rue Barrault, 75634 Paris Cedex 13.

■ Pascal Perrier, maître de conférences à l'INPG, Institut de la communication parlée (URA 368 CNRS), Institut national polytechnique de Grenoble et Université Stendhal, 46, avenue Félix Viallet, 38031 Grenoble Cedex.

La génération d'un signal spécifique : la parole

Le signal de parole est spécifique. Le reproduire, c'est modéliser les mécanismes articulatoires et acoustiques sous-jacents à sa production : une affirmation utopiste ? Pourtant...

■ Gérard Bailly

La synthèse de parole concerne la génération automatique de signal de parole à partir d'une entrée textuelle (synthèse à partir de textes) ou d'une description linguistique plus riche (synthèse à partir de concepts, textes générés par traduction automatique) : en effet, le signal de parole est le véhicule physique d'un contenu linguistique et paralinguistique (identité du locuteur...) très important, et, de ce fait, la qualité et l'intelligibilité de la synthèse produite automatiquement dépendront

à la fois de la quantité d'informations véhiculées et de leur qualité. Aux problèmes liés à l'analyse automatique de textes, viendront s'ajouter dans le processus normal de synthèse, les problèmes liés au transfert (passage de la structure textuelle ou conceptuelle à une structure phonologique), à la méthode de synthèse (production d'une description paramétrique du signal à partir de cette structure phonologique), et à la technique de synthèse (production du signal acoustique à partir de la description paramétrique). La terminologie *synthétiseur de parole* est réservée à cette dernière étape du processus de synthèse : c'est le domaine privilégié du traitement du signal.

Différents systèmes de codage

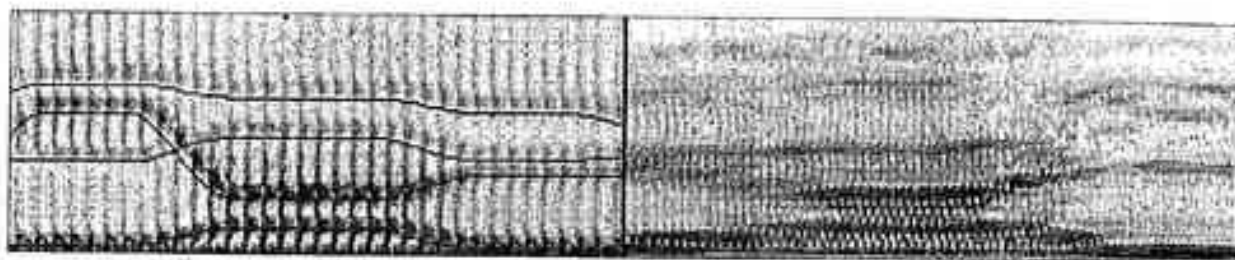
Différentes représentations paramétriques (codage) du signal sont couramment employées : du simple système MIC (Modulation d'Impulsions Codées : échantillonnage du signal), en

passant par des modèles plus « anthropomorphiques » essentiellement basés sur une séparation source-conduit vocal, ce dernier étant modélisé par un filtre constitué par des résonateurs en série et/ou en parallèle, jusqu'à l'analogie du conduit vocal (analogie électrique de la propagation d'ondes planes dans un ensemble de tubes cylindriques couplés), voire au modèle articulatoire qui propose un modèle de commande de la géométrie du conduit vocal par un certain nombre d'articulateurs (langue, lèvres, mâchoire).

Des bases de données de sons

Selon la technique de codage choisie, deux méthodes essentielles de synthèse peuvent être adoptées : soit la synthèse par unités stockées où le message à synthétiser est reconstitué à partir d'éléments sonores pré-enregistrés et codés, soit la synthèse par règles où les trajectoires des paramètres du codage sont interprétables directement et donc reconstituables par des connaissances explicites. Le polymorphisme des phonèmes, plus connu sous le terme général de coarticulation (les phonèmes sont produits par des gestes articulatoires continus et leurs caractéristiques articulatoires et acoustiques sont entachées par leur contexte phonétique), nécessite dans les deux cas l'enregistrement et l'étiquetage d'importantes bases de données de sons comprenant toutes les configurations acoustiques d'un même phonème. De ce corpus seront tirés soit

The generation of a specific signal: speech - The speech signal of speech can be coded with different techniques, on which depend two methods of synthesis, using either stored units or rules. These two ways are in competition: they allow to produce a synthesis of excellent quality but don't give a model of the production mechanism.



Synthèse des sons : /lay/. Comparaison des spectrogrammes d'un signal original (à droite), d'un signal synthétique obtenu par règles et utilisant la synthèse à formants (à gauche).

les éléments sonores (pour le français, 36 phonèmes - silence compris -, soit environ 1400 diphtonges - son qui va de la partie stable d'un phonème à la partie stable suivante -, soit environ 3 000 polysyllabes - extension des diphtonges aux éléments comprenant des phonèmes ne possédant pas de partie stable aisément définissable, par exemple, les semi-voyelles comme /j/, présentes dans hier et payer -), soit les règles qui vont proposer des cibles pour chaque phonème du message et des règles de coarticulation.

Deux modes de synthèse en concurrence

Les deux approches sont en compétition : synthèse par règles utilisant le codage par formants (contrôle explicite du filtre par ses résonances) ou synthèse par concaténation d'unités utilisant des techniques PSOLA (Pitch-Synchronous Overlap and Add : après avoir effectué sur le signal acoustique original un marquage en périodes - la période étant définie comme l'intervalle de temps séparant deux ouvertures successives de la glotte ou écartement des cordes vocales -, le contrôle du débit du signal de

synthèse est obtenu en dupliquant et/ou supprimant certaines périodes du signal original et le contrôle de la hauteur en étirant et/ou comprimant chaque période). Ces deux modes de synthèse sont actuellement en évaluation dans le projet européen SAM (Speech Assessment Methodologies). Nul ne connaît l'issue de cette éternelle confrontation entre lexicque et connaissances...

Cependant, si ces méthodes permettent de produire une excellente qualité de synthèse grâce à une prosodie adéquate (ensemble des paramètres contrôlant l'intonation et le rythme), elles ne modélisent pas les contraintes réelles de production. En effet, le système physique biologique constitué par les organes phonatoires - source d'énergie délivrée par le système poumons-larynx, résonances des cavités buccales et nasales contrôlées par la langue, les lèvres, la mâchoire et la position du vélum - impose ses propres contraintes sur l'ensemble des signaux qu'il peut générer ainsi que sur l'ensemble des trajectoires de contrôle admissibles. Ainsi, entre la transmission d'un code qui exige des gestes différenciables et le système contrôlé qui ne peut réaliser que des gestes lisses en fournissant un minimum

d'énergie, les contraintes sont négociées. Une nouvelle voie de recherches est en train actuellement de s'ouvrir, utilisant de nouvelles techniques : les modèles connexionnistes permettent de simuler les gestes articulatoires sous-jacents en prenant en compte les contraintes mécaniques et les fonctions de coût énergétique de chaque mouvement. Cette approche permet à la synthèse de parole de rejoindre les préoccupations anthropomorphiques des roboticiens et des psychomotriciens et de rallier enfin la conclusion de Stetson : « la parole est un geste rendu audible ».

Enfin, n'oublions pas le signal visuel, composante essentielle de notre communication parlée, dont l'importance a été longtemps occultée par le téléphone qui supprime ce surcroît d'intelligibilité. L'esquisse d'un « robot parlant » décrit plus haut aura en plus le mérite d'avoir un visage !

■ Gérard Bailly, chargé de recherche au CNRS, Institut de la communication parlée (URA 368 CNRS), Institut national polytechnique de Grenoble, 46, avenue Félix Viallet, 38031 Grenoble Cedex

Simuler l'espace sonore subjectif

Un traitement approprié des signaux permet de restituer sous écouteurs la sensation d'espace sonore. Une technique analogue pourrait s'appliquer en acoustique des salles.

■ Georges Canévet

La perception auditive résulte d'un traitement assez complexe des signaux acoustiques. Ils sont d'abord finement filtrés par l'oreille,

puis codés en séries d'impulsions nerveuses. Ces dernières sont elles-mêmes l'objet de traitements spécifiques, dans les diverses structures du système auditif, avant d'être intégrées et interprétées.

L'étude de ces transformations suc-

Simulate auditory space - By convolution of a signal with interaural transfer functions of a subject, spatial hearing can be simulated under earphones for the same subject. If the transfer function of a room is included, the acoustic quality of that room may be tested prior to its construction. Compensation for some hearing impairments is also possible.

cessives relève en partie de la physiologie, mais leur modélisation, sous forme de fonctions de transfert stimulation-sensation, constitue le domaine de recherche de la psychoacoustique. Une telle modélisation a pour but de com-



► prendre les mécanismes de la perception auditive, puis si possible de les simuler.

Parmi les applications principales de ces modèles, on peut citer à l'heure actuelle la simulation de l'espace sonore subjectif par écouteur et son exploitation en acoustique des salles, et le développement de transducteurs électroacoustiques à compensation.

Le traitement spatial

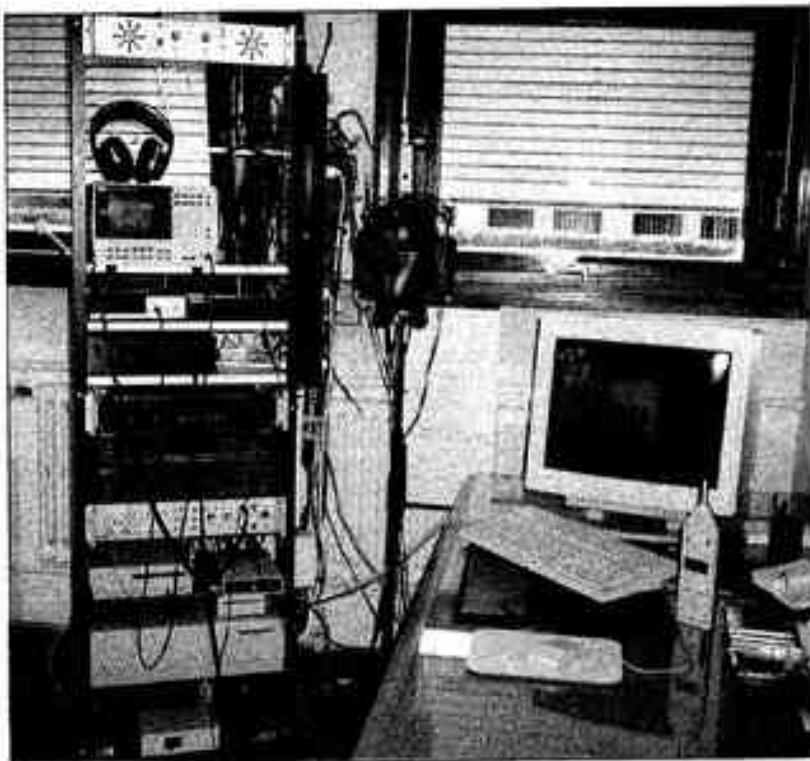
On sait depuis longtemps que la localisation de sources sonores est basée sur l'exploitation, par le système auditif, des différences interaurales de temps et de niveau. Celles-ci sont dues à un trajet inégal des rayons acoustiques entre la source sonore et chacune des deux oreilles, et aux effets de diffraction par le corps.

Ce que l'on sait moins, c'est que ces deux indices, temps et niveau, ne permettent à eux seuls qu'une vague estimation de la direction des sources, et à condition encore qu'elles ne soient pas situées dans le plan médian de l'auditeur. Une grande partie du façonnage acoustique nécessaire à la localisation est assurée par les pavillons des oreilles. Ces derniers impriment au signal acoustique incident une transformation unique de son spectre, dont les caractéristiques sont une fonction typique de la direction d'incidence. Les pavillons se comportent, suivant le point de vue, comme une série de résonateurs ou de réflecteurs multiples. Dans les deux cas le résultat est le même : les altérations spectrales produites, amplifications ou atténuations sélectives de certains intervalles de fréquences, constituent une clef ; elles ne sont pas perçues comme des modifications de timbre, mais comme des changements de direction d'un même signal.

La simulation de l'espace

Si les informations de direction sont entièrement contenues dans la fonction de transfert du champ acoustique, de l'extérieur au tympan, il est tentant de vouloir simuler ce transfert pour restituer l'espace auditif, uniquement au travers de deux écouteurs.

Plusieurs laboratoires dans le monde étudient ce problème. La démarche est coûteuse mais riche d'applications. Il faut tout d'abord procéder à l'enregistrement, sur un auditeur placé en chambre sourde, de la réponse des oreilles à une impulsion émise par un haut-parleur, à une distance et dans une direction données. En quadrillant convenablement l'espace autour de l'auditeur on peut ainsi obtenir un nombre satisfaisant de réponses impulsives, chacune représentative d'une direction de l'espace. La convolution d'un signal



Appareillage servant à étudier la restitution, en chambre sourde, de la sensation d'espace sonore.

brut quelconque avec l'une de ces réponses produit un couple de signaux qui, présentés par écouteurs, doivent être perçus comme provenant de la direction correspondant à la réponse choisie. Il faut bien sûr inclure dans ce traitement la correction des caractéristiques de transfert propres des écouteurs.

La qualité acoustique d'une salle

L'une des applications de cette simulation est l'examen direct de la qualité acoustique d'une salle, non plus après sa construction, mais dès sa conception. On peut très bien envisager qu'il sera un jour possible de calculer avec une précision suffisante le champ acoustique dans une future salle, simplement à partir de ses plans. En choisissant deux points voisins de la salle, correspondant aux deux oreilles d'un auditeur virtuel, on pourrait donc synthétiser deux signaux et les combiner aux fonctions de transfert mentionnées ci-dessus. L'écoute au casque des signaux résultants devrait alors permettre de simuler l'écoute dans la salle, d'évaluer sa qualité et d'y apporter les corrections nécessaires.

Vers un transducteur idéal

Ainsi, dans le principe, on conçoit que la restitution d'espace sonore par

écouteurs soit techniquement possible. En fait, l'une des faiblesses éventuelles réside dans la qualité globale des signaux restitués, en particulier s'il s'agit de musique. Cette qualité ne dépend pour le moment que des transducteurs utilisés. Evidemment la qualité des transducteurs, qu'il s'agisse d'écouteurs ou de haut-parleurs d'ailleurs, est éminemment subjective. Pourtant, à partir de méthodes psychoacoustiques appropriées, on peut aboutir à la définition de transducteurs de qualité optimale. De ce fait, en compensant les caractéristiques de transfert d'un transducteur donné par un traitement préalable des signaux électriques, on doit pouvoir simuler le transducteur optimal, et obtenir une réponse globale ayant la qualité souhaitée. On peut même envisager alors d'adopter à ce pré-traitement la compensation des pertes ou irrégularités auditives individuelles, selon un principe analogue à celui des téléphones à correction auditive.

■ Georges Canvet, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de mécanique et d'acoustique (UPR 7051 CNRS), 31, chemin Joseph Aiguier, BP 71, 13402 Marseille Cedex 09.

Des images 3D en microscopie électronique

Des méthodes d'analyse fondées sur des statistiques multifactorielles permettent de voir des particules isolées en trois dimensions.

■ Jean Lamy

Il y a longtemps qu'on sait observer les protéines isolées en microscopie électronique (ME). En coloration négative, la méthode la plus courante, la protéine est détruite lors de l'observation et seule subsiste son empreinte dans l'agent contrastant. Les images obtenues sont très bruitées et souvent difficiles à exploiter en terme de structure.

Les statistiques au secours de la microscopie

Afin de récupérer sur certaines images l'information détruite dans d'autres, Van Heel et Frank eurent l'idée d'appliquer l'analyse factorielle des correspondances (AFC) aux protéines. Cette technique d'analyse statistique multifactorielle permet de séparer des sous-populations d'images présentant des différences minimales. Par exemple, ils distinguèrent les faces opposées d'une même protéine et reconnurent des molécules reposant sur le film support dans des positions très voisines. En outre, des méthodes sophistiquées de classification automatique rendirent la séparation des sous-groupes indépendante de l'opérateur.

La reconstruction des molécules isolées

Dans la reconstruction de protéines à partir de cristaux bi- ou tridimensionnels (3D) observés en ME, la nécessité d'observer l'objet sous des angles

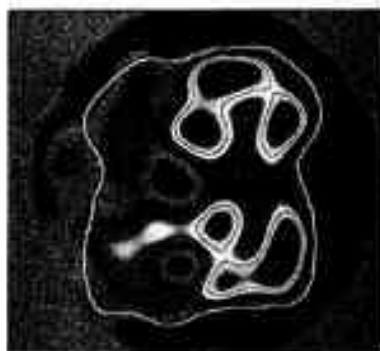


Fig. 1 – Section dans un volume de reconstruction 3D. L'hémocyanine incluse dans le colorant a été emprisonnée entre deux films de carbone puis examinée sous un angle d'inclinaison de 55 degrés. Les sous-unités apparaissent dans les sections sous forme de noyau d'exclusion du colorant (en rouge sur la figure).

d'inclinaison multiples dégrade progressivement le matériel biologique. Récemment Radermacher a mis au point

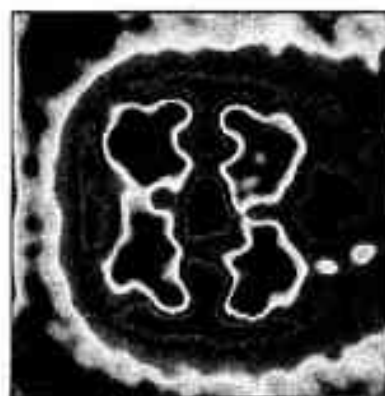


Fig. 2 – Image moyenne, obtenue par analyse factorielle des correspondances et classification automatique, d'un immunocomplexe composé d'hémocyanine et d'un anticorps monoclonal. Le point de contact entre l'antigène et l'anticorps et la différence d'orientation entre les bras d'anticorps sont très clairs.

une méthode de reconstruction 3D à partir de molécules isolées, colorées négativement et orientées au hasard dans le plan de l'image. Dans cette méthode, les données utilisées pour la reconstruction proviennent d'une seule exposition du spécimen aux électrons, ce qui limite fortement les destructions. On obtient ainsi un volume de reconstruction dont on peut étudier la surface externe ou les structures internes (Fig. 1).

Par ailleurs, le développement de la microscopie sur spécimens congelés-hydratés permet d'observer les macromolécules dans la glace amorphe sans film support. Cette approche, qui élimine les déformations induites par le colorant et par le film de carbone, permet d'observer sur une seule prise de vue l'objet sous toutes ses incidences. Elle a très vite conduit à une nouvelle méthode de reconstruction.

La localisation des déterminants antigéniques

Ces progrès ont permis la localisation topologique directe de déterminants antigéniques. La méthode consiste à préparer à l'aide d'anticorps monoclonaux des immunocomplexes qu'on colore négativement et qu'on examine en ME. Après une analyse d'images par AFC et une classification automatique, les images moyennes montrent le point de fixation de l'anticorps sur l'antigène à une résolution de 30 à 40 Å et indiquent qualitativement l'angle du bras de l'anticorps par rapport au plan support (Fig. 2). On construit alors une maquette qu'on utilise pour simuler une image de ME dont on vérifie l'exactitude par rapport à l'image authentique.

Grâce aux progrès du traitement du signal et des méthodes de reconstruction, la résolution atteinte en ME moléculaire augmente régulièrement. La localisation topologique des déterminants antigéniques, qui n'était jusqu'à ces dernières années possible que par cristallographie X, devient maintenant accessible à la ME sans autre limitation que la taille de la molécule. On peut donc prédire un grand avenir à la reconstruction 3D de molécules examinées à l'état congelé-hydraté.

Three-dimensional reconstruction and image processing of randomly oriented particles in electron microscopy – A combination of transmission electron microscopy and image processing based on multifactorial statistics has led to new methods of three-dimensional reconstruction of randomly oriented particles. These methods allow the direct topological localization of epitopes on the antigen surface.

■ Jean Lamy, professeur à la Faculté de pharmacie de Tours, directeur du Groupe d'analyse structurale des antigènes (URA 1334 CNRS), 2 bis, boulevard Tonnelé, 37042 Tours Cedex.

Analyse multivariée en imagerie spectroscopique

Comment extraire l'information significative d'un grand ensemble de données spectroscopiques ? Comment réduire le bruit ? Comment procéder à une extrapolation ? L'analyse statistique multivariée fournit des éléments de réponse.

■ Noël Bonnet,
Pierre Trebbia

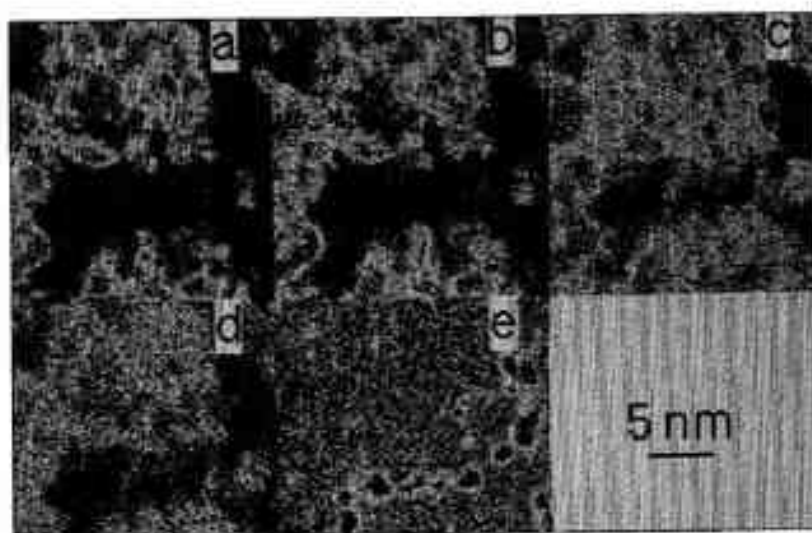


Fig. 1 - Série d'images de clusters d'uranium « décorant » un filament d'ADN (spécimen fourni par E. Delain, URA 158 CNRS, Villejuif). Ces images ont été obtenues avec des électrons ayant perdu respectivement 44, 69, 74, 89 et 112 électronvolts lors de leur interaction avec l'échantillon. Seule l'image (e) contient une information caractéristique de la présence des atomes d'uranium (perte d'énergie caractéristique du seuil 0 à 100 eV) mais les images filtrées (a), (b), (c), (d) sont nécessaires pour modéliser le fond continu et éliminer l'information non caractéristique. Les images filtrées ont été acquises à l'aide du système développé dans l'unité de service de Microscopie analytique et quantitative (C. Colliex, C. Mory, M. Yence) autour du microscope à balayage STEM d'Orsay.

Les développements récents de la technologie en matière de micro-analyse - et de nanoanalyse - permettent l'acquisition d'une quantité énorme d'informations sous la forme de différents signaux que l'on peut se représenter dans un espace multidimensionnel.

La spectroscopie classique fournit l'intensité d'un signal en fonction d'une variable liée à l'énergie émise ou absorbée lors de l'interaction entre les électrons incidents et les atomes en un point de l'échantillon. L'imagerie permet de dresser une cartographie de l'échantillon pour une valeur donnée de l'énergie émise ou absorbée. Des modes d'acqui-

sition plus sophistiqués (spectroscopie dépendante du temps, séquences d'images filtrées) ouvrent la voie à l'étude de la dynamique des éléments diffusibles, ou à la cartographie chimique élémentaire d'un échantillon.

C'est donc bien dans un espace à quatre dimensions (deux coordonnées spatiales, le temps et l'énergie) qu'évoque le microanalyste moderne.

Comment analyser ces vastes ensembles de données ? Comment en extraire l'information réellement pertinente ? Comment compacter ces données qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de mégaoctets par expérience ? Comment éliminer l'information redondante et la

Multivariate statistical analysis of sequences in spectroscopic imaging - Modern spectroscopic imaging provides a large amount of data in four dimensions (two spatial coordinates, time, energy). Multivariate statistical analysis appears to be a good candidate for investigating the useful content of these data. It allows for analysis of the sequences, for proceeding (noise reduction for instance) and for extrapolating (extrapolation to zero dose for instance).

partie nuisible (artefacts, bruits...)?

Chaque application particulière implique un ensemble d'outils spécifiques, mais un outil de choix semble être l'analyse statistique multivariée (ASM). D'abord appliquée à l'interprétation de tableaux de données numériques, son extension aux séquences de spectres et d'images semble être très prometteuse.

Analyser et traiter l'ensemble des données

En recherchant les sources d'information discriminantes dans l'ensemble des données expérimentales, en se débarrassant de l'information redondante qui cache la partie réellement porteuse d'information, l'ASM permet de visualiser les proximités entre images (ou spectres), qui débouchent sur une possibilité de classification automatique ; elle permet aussi de visualiser les proximités entre pixels (ou canaux énergétiques), qui débouchent sur la segmentation automatique, et également de modéliser les lois de variation d'une image (ou spectre) à une autre.

Les sources d'information significatives identifiées et isolées peuvent être filtrées à loisir et la séquence d'images peut être reconstituée en n'utilisant qu'une partie d'entre elles, rejetant celles qui sont jugées inutiles ou nuisibles. On dispose là d'un moyen original de filtrage multivariable du bruit.

Interpoler et extrapoler

Une application nouvelle de l'ASM est la possibilité d'« inventer » des données inaccessibles à l'expérience. En effet, l'interpolation, et à plus forte raison l'extrapolation, sont des opérations délicates pour des données bruitées. Le compactage de l'information qui est réalisé par l'ASM rend ces opérations sinon triviales du moins grandement facilitées. La reconstitution d'une image « fictive » peut être effectuée en utilisant les images factorielles issues de l'ASM

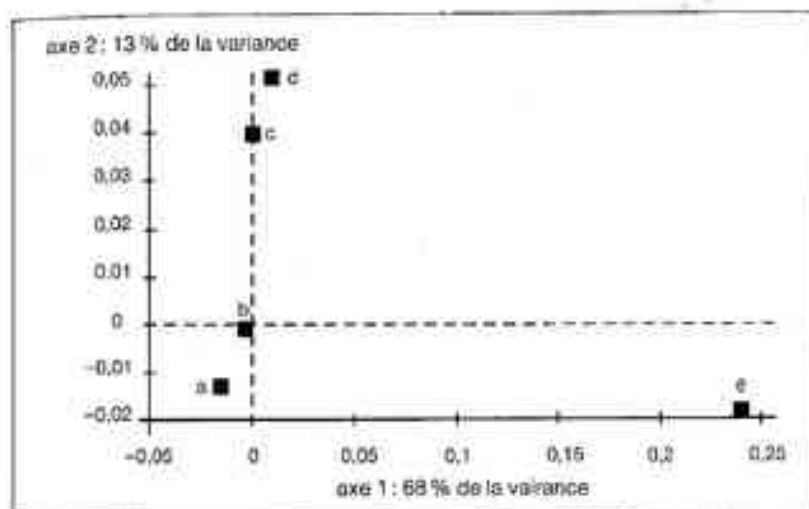


Fig. 2 - Projection des images sur les axes factoriels 1 et 2, qui contiennent 68 % et 13 % de l'information totale de la série. L'image (e) est clairement séparée des autres sur l'axe 1.

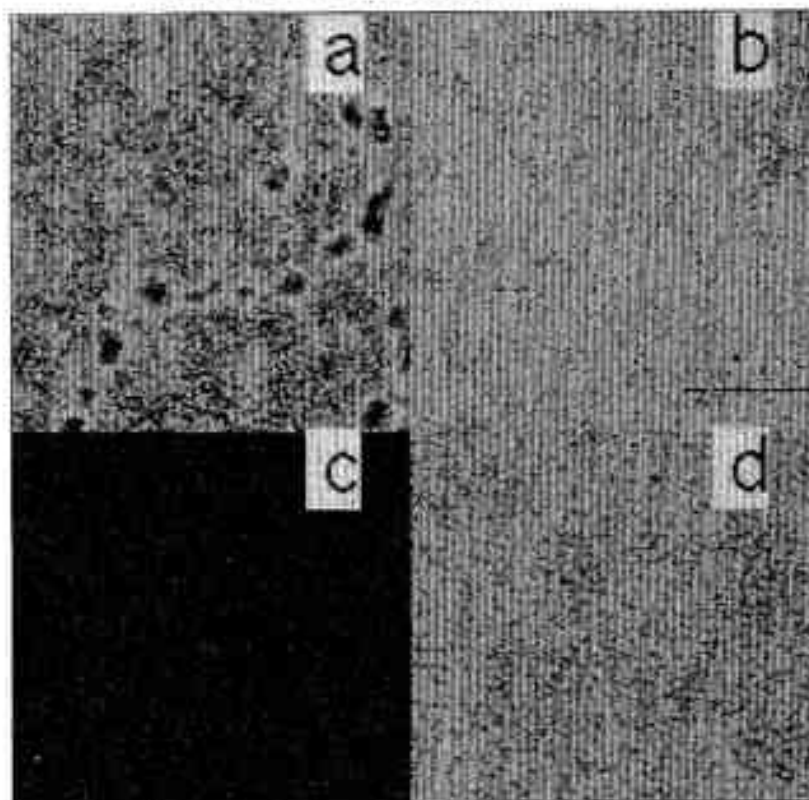


Fig. 3 - Projection des pixels sur les axes factoriels. Cette représentation, combinée avec celle de la figure 2, permet d'interpréter la décomposition en facteurs d'information. L'axe 1 distingue les pixels qui contiennent une information significative (contenu) de ceux qui n'en contiennent pas. Les axes 2, 3 et 4 sont représentatifs d'informations parasites : 50 Hz, bruit statistique, artefact d'acquisition en bas de l'image (c). La reconstitution de la série d'images initiale en conservant uniquement l'axe « utile » 1 permet de filtrer l'information « inutile » (50 Hz, bruit statistique...) et le traitement standard appliqué à cette séquence filtrée donne alors de meilleurs résultats que le même traitement appliqué à la séquence initiale.

et des poids fictifs déduits en interpolant les poids des images réelles. On dispose alors d'une nouvelle méthode de *synthèse d'images* (ou de spectres) *soit contrainte*.

Une application dans le domaine de la microanalyse est l'extrapolation à la dose nulle : pour connaître le spectre « fictif » d'un échantillon avant irradiation, on effectue une spectroscopie résolue dans le temps et on extrapole au temps zéro.

De manière générale, l'avantage de l'ASM sur les méthodes d'analyse classiques réside dans l'absence de nécessité de fournir un modèle explicatif a priori pour la séquence d'images ou de spectres. Des applications ont déjà été trouvées dans les domaines de la spectroscopie Auger et de la spectroscopie de pertes d'énergie. De nouvelles retombées sont attendues dans le domaine de la reconnaissance automatique des caractéristiques spectrales d'une zone d'échantillon.

■ Noël Bonnet, professeur à l'Université de Reims, Unité « analyse des conformations cellulaires et moléculaires » (U 314 INSERM), 21, rue Clément Ader, 51100 Reims.

■ Pierre Trebbin, professeur à l'Université de Reims, Laboratoire d'analyse des solides, surfaces et interfaces, BP 347, 51062 Reims Cedex.

CNRS - AUDIOVISUEL

1, place André-Braud 67083 Strasbourg Cedex

LA CAVERNE DE PLATON : CARTOGRAPHIE D'UNE NUIT DE SOMMEIL ET DE RÊVE

Alors que le Centre hospitalier Sainte-Anne ont été enregistrées les activités électroencéphalographiques (EEG) et polygraphiques de veille et de sommeil d'un sujet en parfaite santé, pendant huit heures. Le traitement informatique des enregistrements a permis d'établir une cartographie dynamique colorée de l'activité cérébrale.

Ce film se propose d'expliquer comment l'imagerie subjective de l'état d'endormissement et de sommeil paradoxal peut être reliée aux images des cartes EEG correspondantes.

Auteur - réalisateur : Pierre Etienne
Co-production : CNRS Audiovisuel, INSERM, SPECIA, et BIOCOM
25 minutes - 1986

L'infographie au service de la vision par ordinateur

Deux caméras couleur peuvent donner à un robot le sens de la vue. Elles ne lui permettent pas cependant de « comprendre » une scène à l'intérieur d'un bureau en utilisant uniquement la vision par ordinateur. L'usage de l'infographie devrait permettre de résoudre le problème.

■ André Gagulowicz

L'idée est de faire fonctionner vision par ordinateur et infographie, qui sont deux sciences duales, suivant une boucle de retour. On considère un bureau ; on positionne devant cette scène deux caméras sur un plan horizontal (en position stéréo) de telle manière que l'angle entre les deux caméras soit faible (de l'ordre de 5 à 10°) et telle que la distance entre les centres optiques des deux caméras soit faible vis-à-vis de la distance caméras/scène 3D. Ainsi les deux images de la scène sont très similaires car nous avons affaire à une projection quasi-cylindrique sur les deux caméras.

Obtenir un modèle synthétisable...

Nous proposons de mettre en œuvre une technique d'analyse qui produise un modèle synthétisable de la scène (ce n'est pas le cas des techniques existantes!). Un algorithme de synthèse utilisant ce modèle en entrée permet de générer des images de synthèse (couple stéréo). La boucle de retour se crée en

comparant les images naturelles des caméras avec les images de synthèse : on affine la modélisation en cherchant à minimiser l'erreur entre les deux couples d'images d'une manière aussi bien qualitative (type de modèle) que quantitative (valeurs des paramètres du modèle). Le modèle synthétisable à produire par analyse sera constitué de deux parties, une partie géométrique et une partie photométrique. La partie géométrique doit décrire la scène tridimensionnelle sous forme de facettes planes pouvant être réunies en polyèdres et hiérarchies de polyèdres, et également la localisation et l'extension géométrique des sources lumineuses. La partie photométrique spécifie les propriétés de réflectance des facettes (objets) et l'émission des sources lumineuses. Comment extraire ce modèle synthétisable d'une paire stéréo ?

La figure 1 montre un exemple très simplifié de paire stéréo issue d'une scène de bureau réalisée par synthèse pour tester notre méthode. On analyse d'abord séparément chaque image. Il faut en principe retrouver la projection de chaque objet et/ou de chaque facette de la scène vue sur le plan image. Pour

Using infography to enhance vision techniques - A new strategy is proposed to perform the vision task of a robot which is viewing an office using two cameras on an horizontal plane. The aim is to produce a synthetizable scene model, construct from it synthetic images and use the difference between the natural and the synthetic images to refine the vision technique. This provides a feedback loop approach instead of usual open loop ones.

ce faire, nous avons mis en œuvre des techniques de segmentation qui décomposent chaque image en régions présentant certaines similarités de couleur, d'intensité lumineuse.

Dans la deuxième étape, on cherche à trouver les régions de chacune des deux images qui sont en correspondance, c'est-à-dire, les régions qui sont issues du même objet, ou de la même facette 3D. Cette correspondance s'obtient en comparant les attributs des régions (taille, couleur, position du centre de gravité, variance...) qui doivent être similaires de par les conditions de prise de vue.

A partir de chaque couple de régions en correspondance obtenu et des données de calibration du système de prise de vue (position respective des deux caméras, focales, etc.), on a produit (étape 3) un algorithme global de reconstruction 3D (stéréo) qui donne l'équation de la facette 3D et sa position dans l'espace. Cet algorithme est global dans le sens où l'on utilise les paramètres globaux de chacune des régions (aire, centre de gravité...) pour obtenir le positionnement de la facette dans

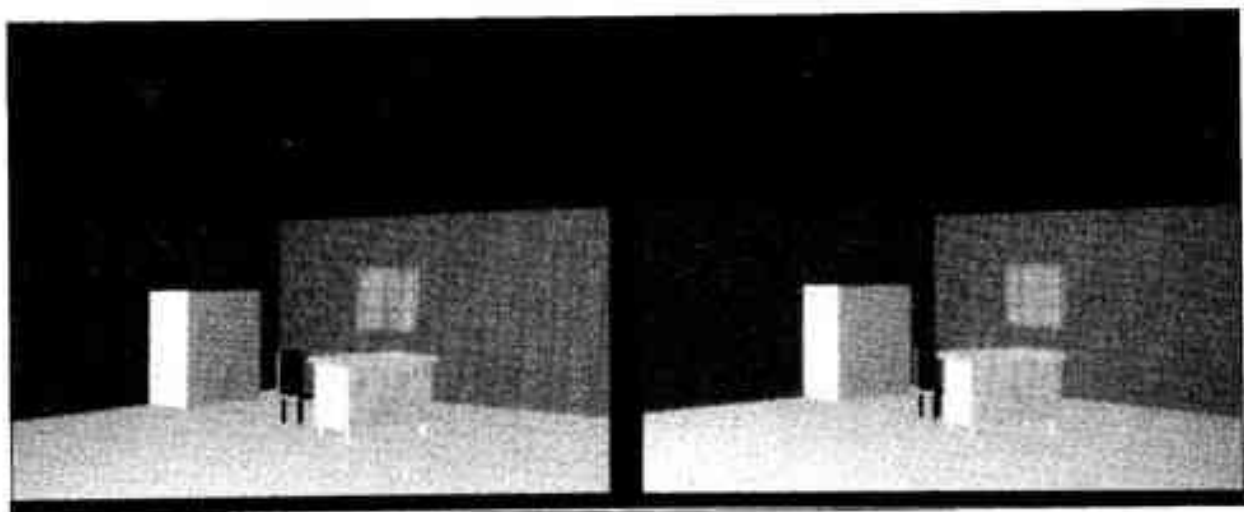


Fig. 1 - Une paire stéréo construite par synthèse et produisant une scène de bureau simple dont on connaît tous les paramètres.

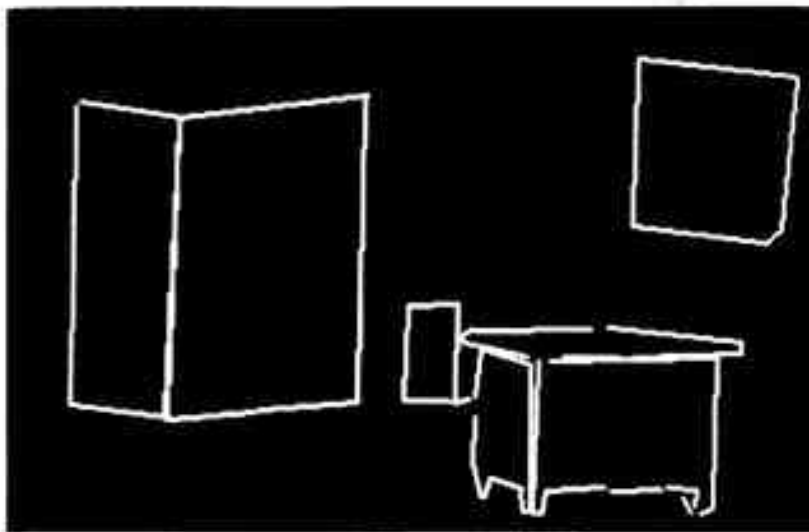


Fig. 2 - Résultat de reconstruction géométrique obtenu après la segmentation et la mise en correspondance de régions issues de la figure 1

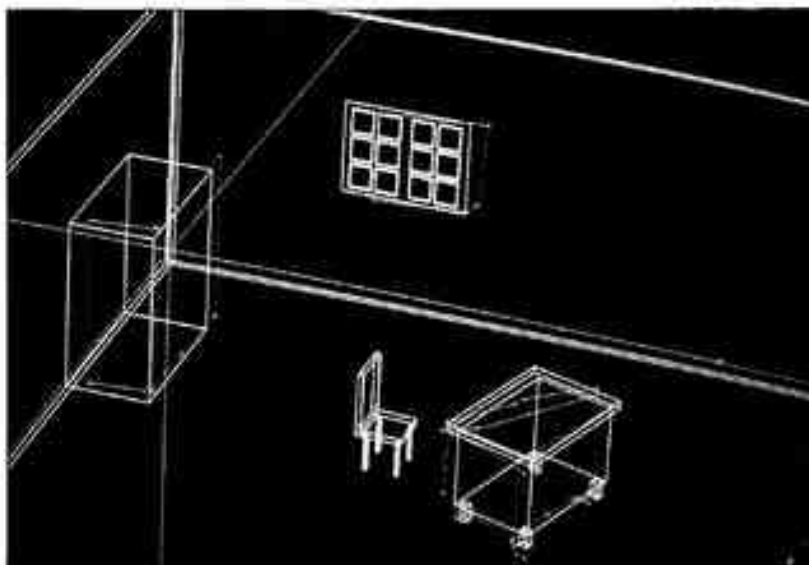


Fig. 3 - Interprétation géométrique de la scène simplifiée de la figure 1. On a représenté en vert les faces issues de l'étape d'analyse et en blanc les résultats de l'interprétation géométrique de la scène

l'espace sans passer par des correspondances point à point utilisées habituellement (Fig. 2).

... et sa partie géométrique...

L'étape 4 fournit la partie géométrique du modèle synthétisable. On suppose disposer d'un modèle géométrique du monde (ceci peut être un plan d'architecture d'un bâtiment par exemple) dans lequel le robot doit évoluer. Nous avons résolu le problème consistant à mettre en correspondance les facettes

issues de l'analyse et celles du modèle du monde, correspondances qui respectent la similitude des formes des faces et des contraintes de rigidité sur leur position respective. La technique permet de retrouver les faces des objets, qui ne se sont pas déplacés dans le repère du monde, ainsi que le déplacement entre le repère du monde et le repère des caméras (Fig. 3). On peut constater que peu de facettes ont été nécessaires pour obtenir une interprétation « exacte ». L'intérêt est que la projection du modèle 3D sur les deux plans images induit une segmentation fine pilotée par le mo-

dèle 3D. L'erreur de segmentation ne provient que de l'erreur d'estimation du déplacement. Toutes les faces y sont (même les non vues) et il devient possible d'utiliser la boucle de retour, tout d'abord géométriquement en comparant la segmentation induite par le modèle et la cohérence des pixels de chaque région obtenue. Nous explorons actuellement cette première voie de bouclage.

... puis photométrique

Le problème restant, et que nous avons commencé à étudier, concerne l'obtention de la partie photométrique du modèle synthétisable. Les données sont les résultats de l'interprétation géométrique ainsi que les deux images. La première modélisation que l'on étudie est une modélisation lambertienne. On suppose dans une première étape que le rayonnement des facettes est dû avant tout à l'éclairage direct des sources lumineuses (plus la lumière ambiante). On considère pour le moment le cas de facettes non texturées. En première approximation, si les facettes sont loin des sources lumineuses, alors leur intensité apparaît comme constante et identique quel que soit le point de vue. On a pu montrer qu'il est toujours possible de trouver des valeurs de paramètres de réflectance des facettes et d'émission des sources lumineuses répondant à la question. Cette modélisation génère sur les deux images synthétiques des régions qui sont des approximations constantes (égales à la moyenne sur la région) de l'intensité réelle de chaque région (approximation d'ordre zéro de l'image). Si l'erreur entre chaque image réelle et son approximation d'ordre zéro est trop importante, on pourra passer à une solution qui tient compte de l'énergie provenant de toutes les autres faces et pas seulement des sources (radiosité).

Si cette technique de radiosité est elle-même insuffisante, on abordera le problème du raffinement de la modélisation de la réflectance des facettes en incorporant une composante spéculaire au modèle.

En conclusion, on peut souligner que les résultats obtenus par l'approche analyse/synthèse sont très encourageants et qu'ils permettent d'entrevoir la solution du problème de l'analyse de scène de bureau par ordinateur.

■ André Gagalowicz, directeur de recherche à l'Institut national de recherche en informatique et en automatique, Domaine de Voluceau, Rocquencourt, 78153 Le Chesnay Cedex.

DECIDER ET CONTROLER

Au sens général du terme, le Traitement du Signal et de l'Image a pour vocation d'étudier, concevoir et réaliser des systèmes d'exploitation des signaux et des images, considérés comme véhicules de l'"information". Aussi, après avoir résolu les problèmes de protection contre les bruits et les intrus, de transmission, de réception (décodage), et de mise en forme (filtrage, restauration), le but ultime du traitement consiste à extraire le contenu informationnel des signaux et des images, en vue d'une prise de décision et donc d'une action.

Les termes signal et image sont alors pris dans un sens restreint ; ils représentent l'information utile, par opposition au terme bruit, celui-ci étant nuisible à celle-là. Il est à noter que la notion d'information intervient, en traitement du signal, à deux niveaux différents : quantité intéressante dont le signal et l'image sont le support, et connaissance nécessaire au traitement.

En reprenant une image anthropocentrique, cette extraction de l'information joue le rôle dévolu au siège de l'"intelligence". Les besoins de cette étape conditionnent, pour une large part, les problèmes posés dans les étapes de traitement amont.

Cette phase d'extraction de l'information peut être vue à deux niveaux différents. Le premier niveau qui correspond à une étape d'"exploitation" des signaux et des images, est de type es-

sentiellement numérique et algorithmique. Il consiste à réaliser les fonctions de détection, de localisation, de poursuite (ou trajectographie) et de classification, avec comme finalités principales la surveillance et le contrôle. Le deuxième niveau, qui fait l'objet du chapitre suivant, a trait à l'"interprétation" des signaux et des images, dans un but de reconnaissance et de compréhension automatiques des phénomènes : la reconnaissance automatique de la parole et la vision artificielle en sont deux exemples. Il s'agit ici de traitements dits de haut niveau pour lesquels l'ordinateur est censé reproduire au mieux le raisonnement humain, compte tenu de l'expertise disponible pour l'application envisagée. C'est bien entendu le domaine privilégié de l'intelligence artificielle, avec une utilisation croissante des systèmes experts.

En pratique, ces deux niveaux sont fortement interdé-

pendants et coopèrent. En effet, toute exploitation des signaux et des images n'a de sens et d'intérêt qu'en rapport avec l'interprétation qu'en donne l'utilisateur, que celle-ci soit préalable, concomitante ou postérieure à la phase d'exploitation.

Le présent chapitre se rapporte plus particulièrement à l'étape d'exploitation qui aboutit à une prise de "décision". Il s'agit en effet, d'une manière générale, de réaliser un choix en présence d'aléatoire, d'incertain, d'inconnu, d'incomplet, ... Ce choix s'appuie sur une observation aléatoire - le signal à traiter - et concerne un phénomène qui n'est pas observable directement, mais qui est sous-jacent au signal. Les aspects en sont très divers, et seuls certains pourront être présentés à travers quatre champs d'application distincts.

Le premier concerne la surveillance de structures mécaniques complexes (pla-



Groupe turbo-alternateur EDF du Blayais : les développements en cours conduiront à la surveillance et au diagnostic automatiques de ces ensembles industriels, grâce à des techniques de traitement du signal et d'intelligence artificielle. (Cliché G. Jaumotte, SODEL, photothèque EDF).

tes-formes off-shore par exemple) ou de machines tournantes, par l'analyse des vibrations. Il s'agit de détecter, et éventuellement de localiser et diagnostiquer (c'est-à-dire déterminer la nature et les causes) des anomalies ou des défauts à des fins de maintenance préventive, de détection de pannes ou, de manière plus générale, d'aide à la conduite de procédés industriels. Les approches utilisées reposent essentiellement sur l'analyse temps-fréquence et la détection de ruptures de modèle associée à une modélisation paramétrique du système à surveiller ou à contrôler.

Le deuxième champ d'application est celui de l'aide au diagnostic médical à partir du traitement de signaux électriques d'activité musculaire (EMG), cardiaque (ECG), ou cérébrale (EEG), ou encore d'images médicales (imagerie par résonance magnétique, imagerie par médecine nucléaire, échographie). Le diagnostic consiste ici à reconnaître certaines pathologies par des techniques de classification qui relèvent de l'analyse de données et de la reconnaissance des formes, combinées à une représentation paramétrique des signaux. De même, l'analyse d'images médicales permet de localiser une lésion et d'en caractériser la structure.

A ce champ d'application on peut associer également le décodage acoustico-phonétique, en vue de la reconnaissance ou de la synthèse (production) de la parole.

Le troisième champ d'application est celui de la surveillance du milieu sous-marin ou de l'espace aérien, à



Image en télédétection spatiale d'une zone de culture à parcelles morcelées situées dans le Lauragais. Le traitement utilisé vise à mettre en évidence l'humidité des sols. (© CNRS/CNRS/LERTS)

partir du traitement de signaux et d'images issus de sonars et de radars. Le problème consiste à détecter la présence d'un engin mobile (ou encore d'un banc de poissons), à le localiser puis le poursuivre (trajectographie) et l'identifier. La panoplie des outils est ici très vaste : méthodes d'analyse spectrale, de filtrage/estimation associées à des méthodes de détection de ruptures de modèle ; méthodes de détection de contours, de segmentation d'images et de classification. Pour améliorer les performances, des capteurs différents peuvent être utilisés, ce qui nécessite alors une fusion de données (association multicapteur).

Enfin, les deux derniers articles de ce chapitre concernent : d'une part, la modélisation numérique de terrain, obtenue à partir d'une télédétection aéroportée et satellitaire, avec comme domaines d'application privilégiés la géologie, l'hydrographie mais aussi la navigation autonome de systèmes d'armes ; d'autre part, la reconstitution de la stratification de l'atmosphère, couche par couche, très utile en astronomie. Ces deux dernières applications utilisent des procédés de triangulation.

Pour conclure cette introduction, nous devons souligner la complexité grandissante des systèmes à surveiller et à contrôler, rendant la prise de décision de plus en plus difficile, et, par voie de conséquence, nécessitant de mettre en place des systèmes de traitement de plus en plus élaborés : traitements robustes et adaptatifs (avec emploi de réseaux de neurones formels pour les aspects apprentissage), utilisation de moments d'ordre supérieur (à deux), coopération de méthodes, fusion multicapteur sont quelques exemples des approches les plus récentes en traitement du signal.

Devant cette complexification des traitements, l'outil informatique joue un rôle crucial, offrant des capacités de calcul toujours plus importantes. Il est à souligner qu'une interaction très forte existe entre les méthodes d'une part, et les architectures de circuits et de machines pour leur mise en œuvre d'autre part (circuits et processeurs spécialisés pour le traitement du signal et de l'image).

Cependant, ceci ne doit pas nous faire oublier que l'élément humain reste le "maillon" essentiel du processus global de décision. C'est pour cette raison que les aspects ergonomiques liés à la communication homme/machine occupent aujourd'hui une place grandissante dans la conception des systèmes de traitement.

Pierre-Yves Arquès,
professeur des universités

Gérard Favier,
chargé de recherche au CNRS

Structures mécaniques : surveiller les vibrations

Un traitement de signal multicapteur permet de surveiller le comportement vibratoire des structures mécaniques et des machines tournantes sous excitation ambiante et en fonctionnement.

■ Michèle Basseville,
Albert Benveniste

Les applications industrielles de la surveillance des vibrations in situ sont diversifiées, que ce soit pour des structures mécaniques complexes (plates-formes offshore, ponts, barrages, bâtiments) ou les machines (turbomoteurs, systèmes d'engrenage). Des outils de détection et de diagnostic de petits changements de caractéristiques vibratoires sont particulièrement utiles pour la mise en place de politiques de maintenance préventive basées sur l'évolution effective de l'état de la machine ou de la structure surveillée, et non sur une programmation a priori systématique. L'algorithmique originale développée, et en cours de transfert industriel, fournit des alarmes intelligentes, c'est-à-dire des alarmes donnant des causes profondes des défauts ou fatigues.

Les points-clés de la surveillance multicapteur

Ces outils résolvent trois points-clés d'une telle surveillance multicapteur :
- acquisition d'une signature modale ou « carte d'identité vibratoire » de la structure, au vu d'un enregistrement de signaux multicapteurs (d'accélérométrie par exemple), en fonctionnement normal ;

- génération d'une alarme « globale » par confrontation de cette signature à un enregistrement de mesures ultérieur, et ce dans les conditions de fonctionnement usuelles de l'objet surveillé, c'est-à-dire sans excitation artificielle ni ralentissement de machine ;

- diagnostic, ou génération d'indicateurs « intelligents » donnant la cause la plus probable de l'alarme précédente. Ce diagnostic peut être en terme de caractéristiques modales (fréquences, déformées) : les seules informations requises sont alors la signature de référence et les nouvelles mesures. Il peut aussi être en terme de caractéristiques mécaniques (masses, raideurs... avec une ébauche de leur localisation) : dans ce cas, il faut disposer en plus d'un modèle physique (approché) de la structure ou de la machine, fourni par le constructeur.

Un apprentissage en deux temps

En d'autres termes, on effectue un apprentissage d'une part de la signature, d'autre part des différents modes de fonctionnement inconnus. Entre ces derniers on saura discriminer (donc porter un diagnostic) à partir de la signature, des mesures enregistrées et de la règle de surveillance que l'on s'est fabriquée.

Cet apprentissage de modes inconnus

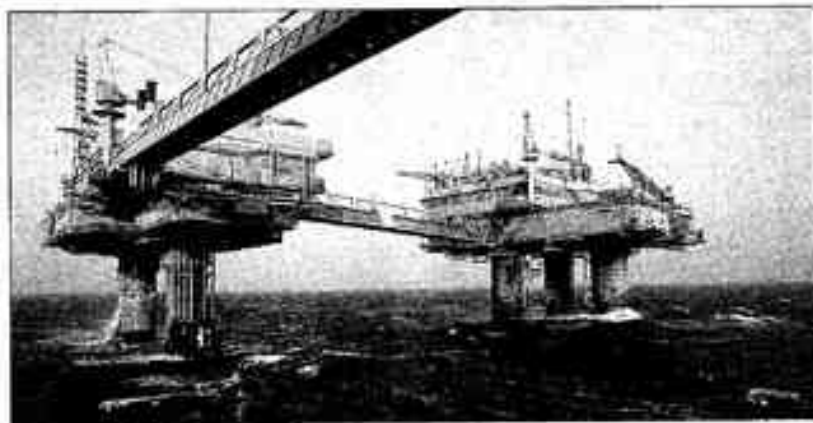
Model based monitoring and diagnosis: case studies in vibration mechanics - Convenient multi-sensor signal processing algorithms allow vibration monitoring for complex mechanical structures and rotating machines to be performed, when they are subject to surrounding excitation and in normal functioning mode. A signature of the structure or the machine can be extracted from a simultaneous record of several sensors (e.g. accelerometers or gauges). Intelligent alarms can be generated, which specify the possible origin of the deviations, with respect to this signature, of a subsequent multi-sensor record.

a priori est effectué de la façon suivante : étant donné une signature et un outil de surveillance (générateur de l'alarme globale), on définit quelles sont les situations de déviation par rapport à la référence que l'on peut discriminer ; cet apprentissage de directions de changement se fait essentiellement par classification. Ensuite, étant donné de nouvelles mesures, on les projette sur ces directions. La projection la plus grande donne la réponse au diagnostic. Cette projection se fait sans calcul d'une nouvelle signature pour les nouvelles mesures.

Ce qui assure la cohérence profonde de cette approche est que les deux opérations d'apprentissage par classification des directions discriminables et de projection sont effectuées à l'aide d'une même métrique qui est précisément celle de l'alarme globale.

Ces outils, qui peuvent être embarqués, permettent la détection de modifications non décelables au mono-capteur avec les outils classiques à base d'analyse de Fourier. Ils permettent aussi corrélativement de proposer un positionnement optimal de capteurs sur la structure pour la surveillance, par optimisation de l'efficacité des tests développés.

Cette démarche de surveillance a en fait été généralisée à des modèles numériques plus larges que ceux liés aux vibrations, et peut être utilisée dans le cadre de la surveillance pour l'aide à la conduite de procédés industriels (turbine à gaz, centrale électrique ou thermique, haut-fourneau...).



Un exemple d'application industrielle de la surveillance des vibrations in situ : la maintenance des plates-formes offshore. Ici, le champ de Frigg en mer du Nord, (Doc Elf Aquitaine).

■ Michèle Basseville, directeur de recherche au CNRS, Institut de recherches en informatique et systèmes aléatoires (URA 227 CNRS).

■ Albert Benveniste, directeur de recherche à l'INRIA, Institut de recherches en informatique et systèmes aléatoires (URA 227 CNRS), Université de Rennes I, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex.

A l'écoute des engrenages

Avant la panne – et ses conséquences économiques – on peut généralement détecter sur une machine des anomalies et porter un diagnostic. L'analyse des vibrations est la technique de surveillance la plus répandue.

■ Ménéad Sidahmed

La surveillance des machines industrielles est un moyen reconnu pour augmenter la disponibilité des machines, garantir la sécurité des personnes et réduire les coûts de maintenance. C'est une préoccupation importante des industriels en raison de l'emploi de machines de plus en plus complexes pour assurer des cadences de production élevées, une stricte conformité des produits fabriqués et ce, en respectant des normes de sécurité et de nuisance de plus en plus sévères.

Les vibrations : des indicateurs

Cette surveillance consiste à prélever sur les machines des grandeurs physiques diverses (vibrations, bruit, température, pression) que l'on sait porteuses d'informations sur leur état mécanique, à en extraire ces informations pour détecter des anomalies, les diagnostiquer

et en estimer la gravité. Le traitement du signal est la base de ce processus.

Actuellement l'analyse des vibrations est la technique la plus répandue pour la surveillance des machines tournantes ; en effet, la plupart des défauts se manifestent par des variations connues dans les signaux vibratoires, sa mise en œuvre est simple (capteurs, analyseurs de signaux temps réel...), et de plus il n'est pas nécessaire d'arrêter les machines et donc la production.

Dans les systèmes actuels, l'outil de base de traitement du signal est la transformée de Fourier. Bien adaptée à l'analyse des signaux harmoniques engendrés par les machines tournantes, elle présente néanmoins des limitations lorsqu'il faut détecter des défauts se manifestant par des non-stationnarités dans le signal (un choc, une variation brusque dans le signal...).

Les techniques de détection de non-stationnarités (ou de changements), d'analyse temps-fréquence, qui permettent de suivre le contenu fréquentiel au cours du temps, peuvent améliorer de façon significative la détection et le diagnostic de défauts. Citons comme exemple les engrenages. Les réducteurs (ou multiplicateurs) à engrenages sont universellement répandus en mécanique ;

Early detection of faults in gears – Machinery condition monitoring consists of using physical units carrying information on their mechanical state, the aim being diagnosis of faults and prevention of breakdown. Signal processing techniques (nonstationarity detection, time-frequency analysis) allow very good extraction of this information.

on les trouve dans tous types d'industries : l'automobile (boîtes de vitesses), l'aéronautique (hélicoptères), les industries à procédés continus (cimenteries, raffineries...). Ce sont des éléments mécaniques très sollicités, complexes à dimensionner et à réaliser (calcul, choix et traitement des matériaux, taillage des dents...), qui peuvent présenter des défaillances susceptibles de limiter leur durée de vie.

Des dents écaillées

Certains défauts, comme l'écaillage de dents dans les engrenages modernes cémentés trempés (qui permettent de passer des couples importants avec des volumes moindres), sont redoutés des industriels : ils conduisent très rapidement vers la rupture de dents et donc la mise hors service de l'engrenage. A l'état précoce, l'écaillage produit des chocs de faibles amplitudes qu'il est difficile, voire impossible, de détecter à l'aide des techniques traditionnelles dans le domaine.

Des expériences récentes, sur banc d'essai de grandeurs industrielles, ont montré que les méthodes de détection automatique de non-stationnarités, ainsi que les analyses temps-fréquence, améliorent de façon sensible la détection et le diagnostic de ce type de défaut. Les signatures vibratoires d'engrenages étant très complexes, il est naturel d'envisager leurs applications à d'autres types de machines.

Avec les progrès actuels des calculateurs, des processeurs spécialisés en traitement du signal, ces techniques sont aujourd'hui accessibles à des coûts modérés. Il est nécessaire cependant de posséder une certaine technicité pour les utiliser. Leur diffusion dans le milieu industriel ne peut être faite qu'avec d'étroites collaborations industries-recherche (logiciels conviviaux, formation...).

Engrenage endommagé.

■ Ménéad Sidahmed, ingénieur au Centre technique des industries mécaniques, 52, avenue Félix Louat, 60200 Senlis.



Interpréter l'activité électrique du muscle

La complexité du signal d'activité électrique des muscles recueilli en surface en fait un défi pour les méthodes de reconnaissance-classification de traitement du signal. L'arsenal actuel des techniques permet de le relever.

■ Francis Castané

Le signal électrique d'activité musculaire enregistré sous forme d'électromyogramme (EMG) est utilisé depuis longtemps à des fins de diagnostic, pour reconnaître un certain nombre de pathologies (neurogènes, myogènes, etc.). Pour en avoir une bonne discrimination à partir du signal électromyographique, le praticien doit avoir recours à un recueil de signal dit « de piqué », où il va chercher les potentiels d'action des unités motrices (notés MUAPT dans ce qui suit) à l'aide d'une électrode-aiguille. Malheureusement, les risques de contagion, réels ou supposés, pourraient condamner à terme ce type de recueil (certains pays européens le limitent déjà). Il est, de ce fait, important d'essayer de mettre en œuvre le diagnostic à partir des signaux recueillis en surface. Le signal est alors le résultat de la sommation spatiale de nombreux MUAPT, de leur filtrage par la transmittance des tissus, de l'interface peau-électrode, etc. Il est souvent inexploitable par l'expert humain, et aucun caractère réellement discriminant ne peut être dégagé par les méthodes classiques de traitement du signal, qui résiste à la dispersion inter-individuelle, aux conditions expérimentales, etc.

Une méthodologie à deux étages

Dans un problème de reconnaissance-classification automatique de signaux complexes, le traitement du signal pro-

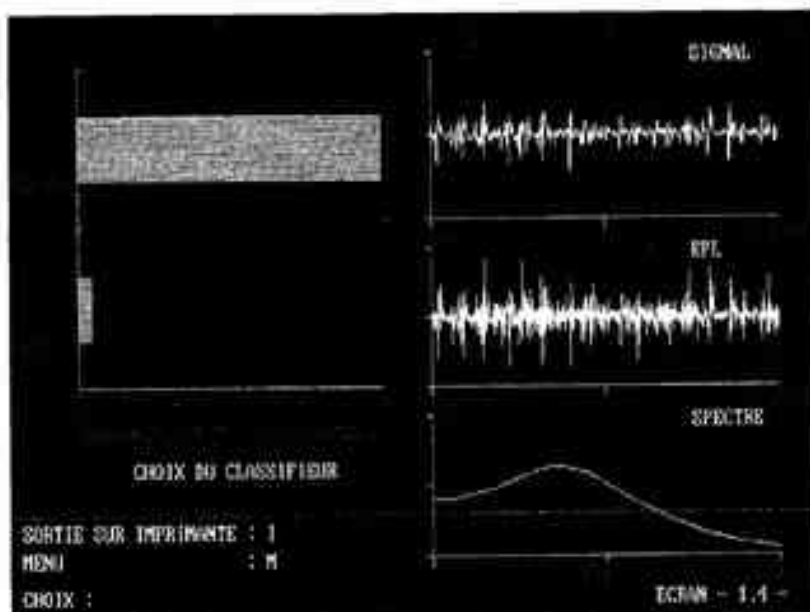
cède par une approche sur deux plans méthodologiques différents, mais très interdépendants, que sont la modélisation paramétrique et la classification. La modélisation repose fondamentalement sur l'idée de substituer aux concepts usuels de signaux (évolutions temporelle ou spectrale), une représentation paramétrique abstraite. Citons quelques mots du credo du « traiteur de signal » actuel : les modèles AR, ARMA, de Prony, par décompositions propres, etc. délivrent un vecteur de paramètres qui compacte l'information du signal, et auquel on peut appliquer des techniques géométriques, empruntées à l'analyse de données et à la reconnaissance des formes. Par exploitation des possibilités des deux domaines, on obtient un grand nombre de triplets (modèle/distance/règle de classification), qui sont évalués au sens de leur pouvoir discriminant sur un ensemble de signaux, expertisés par un spécialiste (base de test).

Des résultats significatifs

Une base de test a été constituée à partir de signaux recueillis en milieu hospitalier pendant des examens cliniques de routine, sur deux muscles (pédieux et court-fléchisseur) et pour des pathologies très répandues (atteintes neurogènes à différents stades). Les résultats obtenus sont très significatifs : autour de 85 % de bien classés pour des pathologies très proches, et au-delà de 90 % pour des pathologies plus éloignées. L'expert humain se déclare en général incapable de reconnaître les pathologies sur le tracé de l'EMG de surface, et doit avoir recours au recueil simultané en piqué.

L'ensemble des algorithmes peut être exécuté par un micro-ordinateur standard (de type compatible PC) en quelques secondes. Ces temps de calcul, et la modicité des moyens informatiques à mettre en œuvre, sont tout à fait compatibles avec la pratique médicale. L'écran de la figure illustre la sortie du diagnostic, en terme de pathologie reconnue. Les autres grandeurs affichées jouent un rôle de contrôle du recueil, pour praticien initié (tracé de l'EMG, spectre...).

Le traitement des EMG de surface n'est, à l'évidence, pas le seul signal complexe justiciable de ces techniques. Des choix judicieux du triplet cité plus haut conduisent à des résultats souvent spectaculaires dans des domaines d'application très éloignés : contrôle non destructif par courants de Foucault ou



Écran de sortie de l'aide au diagnostic en EMG de surface (cas neurogène/sain). Les barres vertes à gauche donnent le diagnostic du classifieur automatique, avec un index de distance entre les classes. La partie droite donne des représentations temporelle et fréquentielle du signal EMG.

Aided diagnosis by surface-recorded EMG signals - First, the complexity of aided diagnosis relying upon surface recorded EMG signals is discussed. The efficiency of the couple modeling/classification is then highlighted, and an overview of the relevant methodology is given. A learning base constructed with hospital recorded signals is finally used to illustrate the performance of a PC-based system.

ultra-sons, détection précoce de punnes par analyse de vibrations, contrôle d'allumage dans les moteurs... Les signaux physiologiques présentent une difficulté, supérieure d'un ordre de grandeur à celle des signaux industriels, qui est génératrice de progrès en traitement du signal même: l'EMG a, par exemple, suscité la mise au point de modèles originaux de signaux (entre autres Prony multi-impulsionnel). L'extension à des signaux physiologiques différents fait l'objet de travaux très actifs.

■ Francis Castanié, directeur du Laboratoire d'électronique de l'Ecole nationale supérieure d'électrotechnique, d'électronique, d'informatique et d'hydraulique de Toulouse, 2, rue Charles Camichel, 31071 Toulouse Cedex.

CNRS - AUDIOVISUEL

1, place Aristide-Briand 92110 Meudon Cedex

LE CHANT DES HARMONIQUES

Dans la pratique du chant diphonique, connu surtout en Asie Centrale, une seule personne chante à deux voix en émettant un son grave avec les cordes vocales, et en superposant une mélodie grâce aux harmoniques confinées dans les cavités bucco-pharyngiennes. Un atelier d'introduction à cette technique dirigé par Tran Quang Hai, un concert de chanteurs mongols et leurs imitateurs, des images radiologiques et spectrographiques en temps réel et son synchronisé, montrent le fonctionnement de cette singulière technique vocale.

Auteurs : Hugo Zemp et Tran Quang Hai
Réalisateur : Hugo Zemp
Co-production : CNRS Audiovisuel
et Société Française d'Ethnomusicologie
36 minutes - 1989

L'électrocardiographie à haute résolution

Cette technique apporte un effet de loupe par rapport à l'électrocardiographie classique en faisant apparaître une microactivité. L'exploitation de l'information utile, grâce au traitement du signal, devient un outil de plus en plus précieux pour le cardiologue.

■ Hervé Rix,
André Varenne

Depuis 1903 (Einthoven), on mesure l'activité électrique du cœur captée à la surface du corps par des électrodes. Les signaux recueillis (électrocardiogrammes) de l'ordre de quelques millivolts, traduisent les variations du courant électrique qui, à chaque battement, prend naissance au niveau du sinus et assure l'excitation - contraction des oreillettes, puis celle des ventricules - (Fig.1). Cette électrocardiographie classique (ECG) devrait, dans les années à venir, être remplacée par l'électrocardiographie à haute amplification ou à haute résolution (ECGHR) qui s'est développée depuis 1973, mais en restant l'apanage de quel-

ques laboratoires de recherche jusqu'en 1985. Cette technique tend actuellement à donner une description fine du signal électrique cardiaque, dont l'intérêt vient de se trouver accru par la découverte de micropotentiels pathologiques dus à des dépolarisations ventriculaires retardées, à l'origine de troubles graves du rythme cardiaque (potentiels tardifs).

Aligner des microsignaux

La technique de sommation synchrone utilise la répétitivité des battements cardiaques pour faire apparaître les perméances en atténuant ce qui est aléatoire ou qui n'est pas synchrone du rythme cardiaque. Son efficacité varie en fonction du degré de vérification des deux hypothèses de base :

- les signaux à détecter sont identiques d'un battement à l'autre ;
- on est capable d'aligner parfaitement ces signaux avant d'en faire une moyenne (synchronisation).

Dans le cas où il n'y a pas de stimulateur, le respect de la deuxième hypothèse est le problème essentiel. En effet, d'une part, il est impossible d'aligner

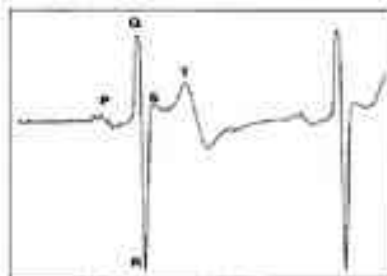


Fig. 1 - Exemple d'un électrocardiogramme : courbe de la différence de potentiel mesuré sur une dérivation ; on obtient les ondes : P (départ de la ligne de base), Q, R, S (départ de la ligne de base), T (repolarisation ventriculaire).

directement des microsignaux noyés dans du bruit : on se synchronise donc sur l'une des ondes principales, et le plus souvent sur le complexe QRS (onde de dépolarisation ventriculaire). D'autre part, la variabilité du rythme cardiaque crée des fluctuations de la distance temporelle séparant les micropotentiels du point de synchronisation choisi. On a donc un défaut d'alignement, phénomène de « jitter », dû à la fois à la méthode et aux fluctuations physiologiques, qui se comporte comme un filtre passe-bas. Ces remarques expliquent l'insuccès relatif de la méthode pour la détection du signal de His (conduction oreillette-ventricule), et son succès dans la recherche des potentiels tardifs ventriculaires généralement liés rigidement au complexe QRS. Pour étudier d'autres micropotentiels que ceux liés à QRS, par exemple la structure fine de l'onde P (ou T), il est nécessaire de pouvoir aligner les ondes P (ou T) en dépit d'un mauvais

High resolution electrocardiography - This technique has been enhanced by late potential detection. Indeed, coupled with signal processing, it would be able to extract the fine structure of electric heart activity through body surface records.

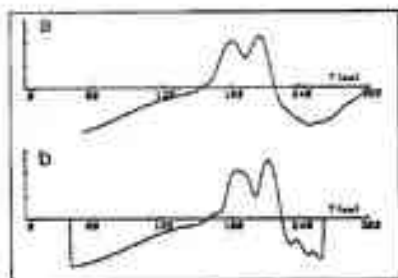


Fig. 2 - Exemple de 100 ondes P moyennées : (a) en alignant les ondes R, (b) en alignant les ondes P. On remarque que la courbe (b) présente des détails qui n'apparaissent pas sur la courbe (a) à cause d'un « jitter » lié aux fluctuations de l'intervalle PR.

► rapport signal sur bruit. De récents travaux permettent de réduire notablement l'effet de jitter dû aux variations de l'intervalle PR (ou ST). La figure 2 illustre ce résultat.

Des signaux répétitifs

Reste la première hypothèse qui suppose les signaux répétitifs. Pour s'en rapprocher, on regroupe les battements en fonction des écarts de forme entre les ondes P, ou QRS ou T, grâce à un algorithme permettant la mesure de faibles écarts de forme et peu sensible au bruit. La voie est donc ouverte à une étude sélective des micropotentiels cardiaques en fonction des activités de dépolarisation ou repolarisation des oreillettes et des ventricules.

Une autre approche, complémentaire de la recherche d'effets moyens, est l'analyse battement par battement qui met en évidence la variabilité du rythme, des intervalles, des formes. Cette analyse peut se faire par sommation spatiale où l'on moyenne une série d'enregistrements voisins d'un même battement, ou en améliorant la modélisation des micropotentiels dans une analyse temps-fréquence ou temps-échelle.

La technique d'ECGHR apporte donc une foule d'informations qui restent encore à exploiter. Cette technique devrait, dans un avenir proche, s'imposer pour le suivi des affections cardiaques ainsi que leur dépistage, et plus particulièrement la détection précoce des altérations myocardiques par l'étude fine des effets électrophysiologiques des médicaments.

■ Hervé Rix, professeur à l'Université de Nice - Sophia Antipolis, Laboratoire de signaux et systèmes et unité EBS (URA 1376 CNRS), 41, boulevard Napoleon III, 06041 Nice Cedex.

■ André Varenne, médecin des hôpitaux, directeur du Laboratoire de cardiologie, CRE-CEC, Hôpital Pasteur, Voie romaine, 06000 Nice.

Nécessité de l'analyse en imagerie médicale

La richesse en informations des images médicales numérisées rend difficile leur étude complète par le médecin. Une assistance par analyse de l'image est devenue souvent nécessaire.

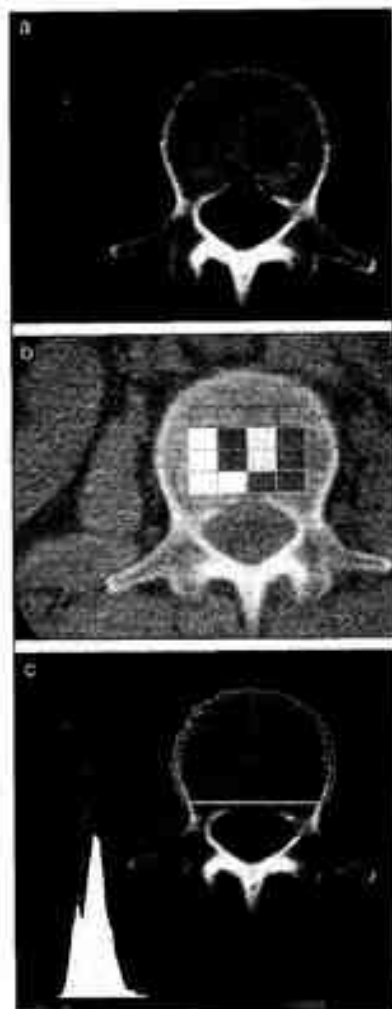
■ Anne-Marie Laval-Jeanter, Maurice Laval-Jeanter

Croire que le scanographe à rayons X ou l'imagerie par résonance magnétique révèlent sans difficulté les lésions les plus fines est une opinion courante mais fautive. Une analyse statistique de 200 examens scanographiques de cancers ou de lymphomes a montré que 55 % des localisations métastatiques vertébrales n'étaient pas décrites par des radiologistes expérimentés. Dans 74 cas, la lecture par le médecin des niveaux de gris correspondant à l'os n'avait pas été réalisée car elle nécessite un « fenêtrage » spécifique et la lecture avait été abandonnée après découverte d'une anomalie viscérale importante. Aucune explication n'a été trouvée au cours des 35 autres observations.

Une lecture incomplète des images

La grande dynamique de l'image du scanner apparaît donc comme la première responsable des erreurs de lecture : les informations acquises par le faisceau de rayons X sur les tissus traversés aboutissent au calcul des « nombres Hounsfield » (NH) en chaque point de l'image. Ceux-ci sont une expression du coefficient d'atténuation de chaque voxel (équivalent d'un pixel en trois dimensions), codé sur 4096 niveaux de gris. Pour lire les images avec un contraste suffisant, il est habituel de limiter la fenêtre d'examen à 100 ou 200 NH au moment de l'affichage sur l'écran et aussi lors de l'enregistrement sur film. Ainsi, la visualisation d'une image du foie ou des poumons est-elle faite aux dépens de l'image de l'os, qui est alors

complètement opaque et sans détails. A l'inverse, une fenêtre « osseuse » ne permet pas d'étudier correctement les tissus mous. Les réglages successifs qui permettraient une lecture complète sont rarement réalisés : le médecin centre la



Détection automatique d'une asymétrie de la texture vertébrale par « régions d'intérêt » apparues (b) et comparaison des histogrammes de densités des deux demi-vertèbres (c). La lésion était une métastase ostéolytique d'un cancer surrénalien (a).

The usefulness of medical image analysis - During interpretation of digital medical images, a large quantity of significant information is rejected or undetected. Automatic analysis of the spine and of the lungs in oncologic cases is able to recover important data with a sensitivity of 90 %.

« fenêtre » sur le type de tissu recherché en priorité, et ne procède pas toujours à l'étude des autres densités.

Alerter le médecin

L'analyse d'image apporte une solution à ce problème, elle peut employer aussi bien la simple mesure des densités associées aux pixels des images numérisées (exprimées en NH) que les méthodes de la morphologie mathématique, ou celles de l'analyse de texture. Ces dernières sont particulièrement adaptées aux études du poumon ou des vertèbres, qui sont les localisations préféren-

tielles des métastases cancéreuses.

La figure donne un exemple d'analyse d'une structure symétrique : le corps vertébral. Les localisations cancéreuses y sont toujours asymétriques. Toute différence de densité entre deux « régions d'intérêt » tracées symétriquement est donc suspecte. La comparaison des densités ou celle, paramétrée, des histogrammes assure une sensibilité de détection supérieure à 90 %, toutes pathologies confondues.

Ces méthodes n'ont pas encore pour but de faire des diagnostics complètement automatiques, mais d'alerter le médecin, lui suggérant de vérifier la na-

ture d'une anomalie détectée. Ces systèmes sont techniquement implantables dans les logiciels des appareils d'imagerie moderne.

■ Anne-Marie Laval-Jeantet, chargé de recherche au CNRS, directeur du Laboratoire de radiologie expérimentale, 10, avenue de Verdun, 75010 Paris.

■ Maurice Laval-Jeantet, professeur à l'Université Paris VII, chef du Département de radiodiagnostic, Hôpital Saint-Louis, 1, avenue Claude Vollefaux, 75010 Paris.

Imagerie médicale et infographie

Depuis quelle est devenue numérique, l'imagerie médicale basée sur l'analyse et le traitement mathématique des signaux permet de produire des images de synthèse, caractérisant la structure d'une lésion, la viabilité des tissus et ses propriétés fonctionnelles.

■ Jacques Chambron

L'imagerie médicale moderne reproduit avec une fidélité toujours plus fine l'anatomie du corps humain, sous forme d'images d'amplitude de signaux produits par les interactions des ondes avec les tissus vivants : rayons X, ultrasons, rayons gamma, radiofréquences. Mais ces signaux, dont l'amplitude dépend de paramètres caractéristiques des structures tissulaires : densité d'électrons, de protons, temps de relaxation, constante de diffu-

sion, etc. sont très riches en information ; leur traitement infographique permet de produire de nouvelles images de synthèse, véritable cartographie de paramètres physiques qui reflètent les propriétés structurales des tissus. Deux exemples, l'un en imagerie par résonance magnétique (IRM) à propos du cerveau, l'autre en médecine nucléaire sur le cœur illustrent ces nouvelles recherches technologiques infographiques.

Caractériser les lésions

En IRM, le contraste dépend de la densité de protons pondérée par les temps de relaxation des tissus qui caractérisent leur structure moléculaire dynamique. L'hétérogénéité de cette structure se traduit par des courbes de déclin d'aimantation multiexponentielles. L'imagerie conventionnelle qui consiste à pratiquer des images d'amplitude d'écho, à partir de quelques points de cette courbe, ne permet qu'une évaluation imparfaite de cette hétérogénéité. La visualisation de l'hétérogénéité structurale d'une lésion est par contre améliorée sur des images de synthèse reconstruites après une analyse mathématique des courbes d'aimantation.

Cette technique a été appliquée à l'étude de la structure de lésions de sclé-

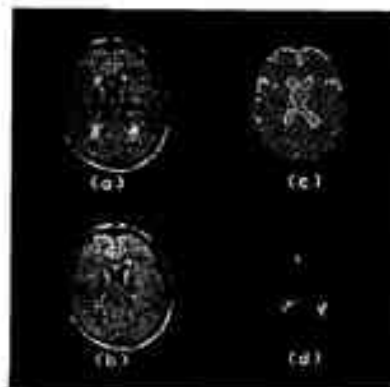


Fig. 1 - Imagerie RMN et sclérose en plaques : sur les images d'amplitude obtenues par renforcement du temps de relaxation T2, les lésions de sclérose en plaques apparaissent sous forme de taches brillantes disséminées dans la substance blanche : la brillance de l'image traduit la sévérité de l'inflammation et de l'œdème associé (a). Les zones d'intérêt peuvent être déterminées automatiquement par seuillage (b) ou par la méthode des nuées dynamiques (clustering) (c). L'image (d) représente une segmentation de la lésion basée sur l'analyse exponentielle des courbes de déclin d'aimantation T2 traduisant l'existence de structures histopathologiques caractéristiques de la lésion.

rose en plaques, dont les images d'amplitude soulignent la localisation sous forme de taches brillantes disséminées dans la substance blanche. L'analyse des courbes de déclin d'aimantation, pixel par pixel, permet d'en savoir plus. Les courbes de la substance blanche, libre de plaques, sont monoexponentielles avec des constantes de temps T2

The contribution of infographics to medical imaging - Medical imaging is most efficient when convenient infographical methods are used. The following two examples illustrate its potentiality: firstly, in magnetic resonance imaging, the image reconstruction based on true relaxation times, T2, capable of visualizing fine histopathological structures characterizing the pathology; secondly, in nuclear medicine, the cartography of a perfusion tracer triggered by ECG gives the best assessment of the infarct lesion's extent and of the myocardial kinetics.

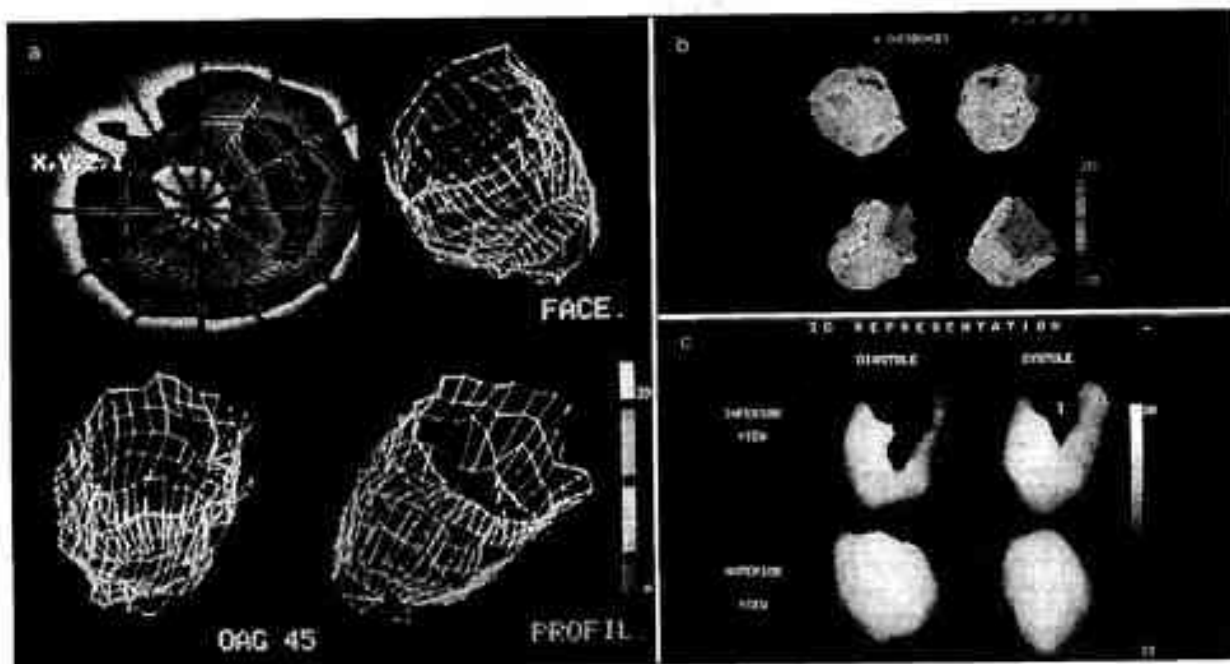


Fig. 2 - L'imagerie tridimensionnelle du cœur en médecine nucléaire: (a), représentation 3D par maillage. Elle consiste à représenter la surface externe qui enveloppe le volume du ventricule gauche par un réseau dont les nœuds sont des points de contour définis sur les coupes grand axe du cœur par leur activité (I) maximum et les trois coordonnées spatiales x, y, z . La visualisation en perspective est réalisée par la projection du réseau sur un plan focal, matérialisé par l'écran vidéo, à partir de la position d'un observateur ou point de vue; par rotation du point de vue, le réseau est visualisé sous plusieurs incidences; (b), représentation par facettes. Sur une représentation par maillage, il est parfois difficile de distinguer l'image d'une lésion postérieure, à travers le maillage antérieur. Cet inconvénient est levé par une représentation par facettes quadrangulaires limitées par les contours des mailles. Le déplacement du point de vue autour du cœur entraîne la rotation de l'image et permet de découvrir successivement les différentes faces de celui-ci. (c), représentation dynamique. Les images précédentes représentent l'activité moyenne du cœur au cours d'un cycle cardiaque. Un enregistrement de l'activité synchronisée sur le battentier cardiaque permet d'obtenir des images à chaque instant du cycle. L'utilisation de l'échelle de fausse couleur «fer porté au rouge» (hot iron) améliore la perception des défauts.

supérieures à la normale, traduisant l'existence de lésions microscopiques. Par contre, les courbes de déclin des lésions sont biexponentielles, la composante longue caractérisant les remaniements cellulaires plus importants dont les lésions sont le siège.

Les distributions de ces temps de relaxation T2 longs calculés sur chaque pixel sont généralement multimodales, les modes les plus longs correspondant à l'œdème, et les modes les plus courts à la démyélinisation et à la gliose réactionnelle. Sur les images reconstruites en assignant à chaque pixel le mode de la fenêtre de l'histogramme à laquelle il appartient, la lésion apparaît segmentée et formée de parties de pixels contigus (Fig. 1). Cette segmentation est le reflet de la coexistence des diverses structures histopathologiques caractérisant la lésion.

En IRM les efforts de recherche portent sur l'amélioration de la spécificité de la caractérisation tissulaire; ils s'attachent, en médecine nucléaire, à améliorer la localisation et la détermination du volume d'une lésion.

Le cycle cardiaque en 3D

En utilisant les nouveaux agents de perfusion marqués au technécium, des images tridimensionnelles du cœur, par maillage ou par facettes, peuvent être reconstruites à chaque instant du cycle cardiaque. Les lésions d'infarctus sont alors visualisées au cours de la contraction cardiaque, ce qui permet d'éliminer le flou cinétique et préciser ses conséquences sur les contractions des parois myocardiques périlésionnelles.

Les programmes de visualisation par maillage consistent à reconstruire une image tridimensionnelle en formant un réseau à partir des éléments du contour des coupes perpendiculaires au grand axe dont la couleur est le reflet de leur activité (Fig. 2a). Dans ce mode de représentation, la visibilité d'un défaut sur une face du cœur peut être hypothéquée par la superposition de l'image en réseau de l'autre face. Cet inconvénient est éliminé par une représentation par facettes d'une maille dont la couleur représente l'activité moyenne de ces contours (Fig. 2b). La rotation de l'ima-

ge permet de dévoiler les faces cachées. L'effet de relief est amélioré en appliquant un programme de lissage et dégradé par ombrage. La restitution séquentielle des images, en appliquant un mode ciné, simule le battentier de la lésion et ses conséquences sur la cinétique du muscle cardiaque (Fig. 2c).

Ces exemples illustrent les améliorations des performances des imageries médicales obtenues par les méthodes infographiques, autant dans le domaine morphologique que fonctionnel.

Jacques Chambon, professeur à l'Université Louis Pasteur, directeur de l'Institut de physique biologique, Unité « applications biologiques et médicales de la RMN et GBM » (URA 117) CNRS, 4, rue Kirchleger, 67083 Strasbourg Cedex.

Le phonème : onde ou corpuscule ?

Existe-t-il une analogie entre la physique de la matière et la physique des sons de la parole ? ou, peut-on définir des unités phonétiques facilement localisables dans le signal ?

Jean Caelen,
Paul Déléglise

Une certaine vision atomiste du signal considère que la parole est constituée de phonèmes* – sons élémentaires pertinents vis-à-vis de la description phonologique de la langue – et est organisée comme une chaîne d'éléments séparables. Pour le prouver, il suffit d'inscrire ces sons élémentaires sur une bande magnétique puis de la découper judicieusement pour disposer d'une base de sons pouvant servir ensuite, par collage de divers morceaux, à « synthétiser » un discours quelconque. Hélas, cette synthèse à peu de frais tentée par Harris en 1953, conduisit à un échec : les mots ne peuvent pas être considérés comme la mise bout à bout des prototypes sonores de phonèmes.

Des micro-segments acoustiques

Pourtant l'idée de la séparabilité de la parole a quelque fondement dès que l'on casse les atomes pour y découvrir des particules plus fines, les micro-segments acoustiques. Ces derniers sont bien définis sur le plan acoustique pour lequel on dispose de critères objectifs de séparation : stationnarité locale, discontinuités spectrales, ruptures, etc. Si ceci reste possible au sens mathématique du

terme, on constate cependant que ces « particules » ont un comportement incohérent avec une représentation phonétique : certains micro-segments appartiennent à deux phonèmes simultanément, d'autres sont « immatériels » (un phonème ne se réalise pas vraiment, il reste « intentionnel »), d'autres sont des artefacts articulatoires qui n'appartiennent à aucun phonème. De plus l'influence du contexte (par exemple le /a/ de « pot » est différent du /a/ de « sot ») fait que les micro-segments ont de multiples façons de se réaliser. Ces micro-segments ne sont donc pas très productifs vis-à-vis du décodage acoustico-phonétique.

De ceci se dégage les notions de « cible acoustique » – ou réalisation idéale d'un phonème – et de trajectoire, transitions de cible à cible dans un espace de

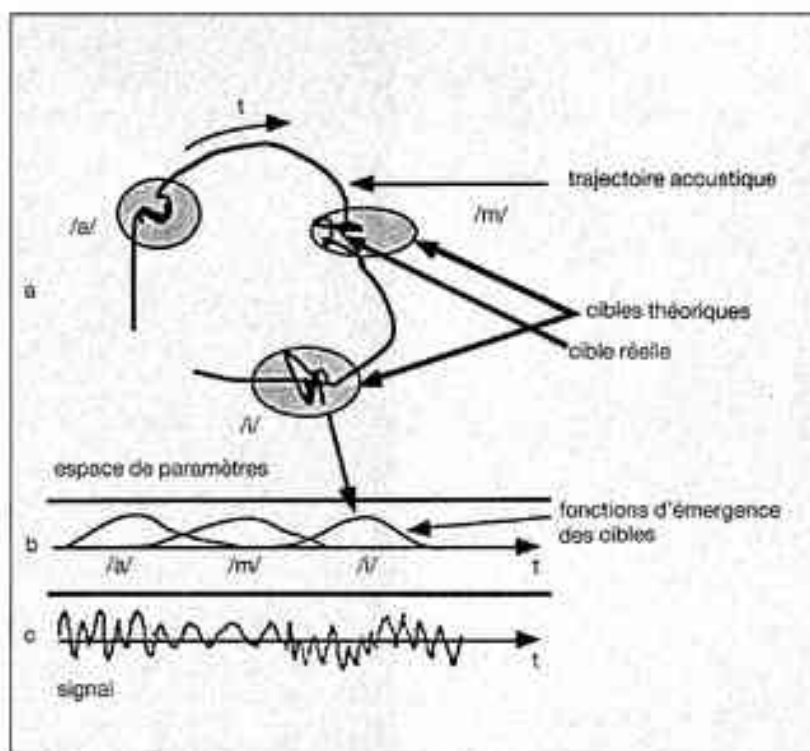
représentation adéquat (on peut choisir par exemple l'espace des paramètres spectraux). Le décodage acoustico-phonétique revient dans ces conditions à « suivre » un point évoluant sur sa trajectoire (définie par sa courbe paramétrique) pour y détecter les cibles acoustiques (fig. 1). Cela revient donc à considérer qu'une certaine particule se déplace dans un espace multidimensionnel de manière déterministe.

Le problème est-il ainsi mieux posé ? Les phonèmes sont-ils bien de nature corpusculaire ? ou bien ce point de vue « cible-trajectoire » ne cache-t-il pas l'autre nature – ondulatoire – des phonèmes ?

La nature ondulatoire des phonèmes

Reconsidérons le problème. Du côté production de la parole, il est évident qu'un ensemble de « gestes » articulatoires (mouvement de la langue, des lèvres, etc.) concourent à produire les sons de parole. Ces gestes n'atteignent pas tous leurs cibles ; pour s'en convaincre, il suffit d'accélérer le débit d'élocution pour montrer que le nombre de phonèmes bien articulés (ayant atteint leur cible) diminue de plus en plus. Le nombre minimum de cibles atteintes, qui garantit l'intelligibilité du message ▶

Phoneme, wave or particle? – It is not easy to detect elementary units (particles) on the speech signal because phonemes have neither fixed boundaries nor a single pattern. It is more efficient to consider speech as a series of articulatory gestures in terms of acoustical targets and transition between two consecutive targets as a trajectory. Given these conditions, a probabilistic function can be associated with the position of targets along the trajectory, in the space of acoustical parameters. This point of view gives a double vision on the phoneme – as in quantum mechanics, wave and particle – which can allow us to solve the critical problem of the segmentation.



Signal du mot « ami », en bas (c) ; trajectoire acoustique correspondante, en haut, avec les trois cibles des phonèmes /a/ /m/ /v/ (a), et fonction d'émergence temporelle de ces phonèmes au milieu (b).



sonore, est le résultat d'une négociation entre le locuteur et l'auditeur : trop peu de cibles atteintes et le message ne sera plus compris. Ces cibles sont donc des « lieux de l'espace de représentation » où la probabilité qu'a l'auditeur de percevoir un phonème est suffisante. Comme le physicien, l'auditeur devient un observateur qui interagit sur l'observation. Autre analogie avec la physique quantique, une cible réelle (fig. a) — c'est-à-dire de notre point de vue, un phonème — sur la trajectoire sonore n'est évidemment qu'une approximation d'un lieu « idéal » et « flou » assorti de surcroît d'une probabilité d'émission, celle de se trouver dans le message émis par le locuteur. Si tel est le cas, le phonème est bien de nature ondulatoire : une « fonction d'émergence » (fig. b) peut être calculée le long de la trajectoire, elle est vue comme la probabilité de présence d'un phonème sur la trajectoire acoustique. La variabilité due à la coar-

tification et au timbre des locuteurs ajoute une incertitude supplémentaire sur la position absolue de la cible.

Des idées venues de la mécanique quantique

Fort de ce constat, il devient possible de mettre en œuvre des techniques de mesure de la « déviation » de la trajectoire pour détecter la présence d'une cible, ou des méthodes de « décomposition temporelle » pour calculer les fonctions d'émergence. Ceci ne peut se faire avec de bonnes performances que par rapport aux cibles détectées au pas précédent, ce qui pose le problème du « bootstrap » c'est-à-dire de la détection des premières cibles. On ne peut donc résoudre ce conflit que si une reconnaissance a été faite au préalable en localisant certains micro-segments, les moins sensibles au contexte, ce qui revient à utiliser certaines propriétés « corpuscu-

laire » des phonèmes...

En conclusion, la double nature du phonème — onde et corpuscule — doit être utilisée en décodage acoustico-phonétique par analogie avec des idées venues de la mécanique quantique.

**Les codes phonétiques ont été fixés par une commission de l'API (alphabet phonétique international) en 1935. Par exemple, le mot « phonétique » se note ifonetikl.*

■ Jean Caelen, chargé de recherche au CNRS, Institut de la communication parlée (URA 368 CNRS), Institut national polytechnique de Grenoble, 46, avenue Félix Viallet, 38031 Grenoble Cedex.

■ Paul Déléglise, maître de conférences à l'Université Paris V, Laboratoire traitement et communication de l'information (URA 829 CNRS), Ecole nationale supérieure des télécommunications, 46, rue Barrault, 75634 Paris Cedex 13.

Le goniomètre adaptatif

La mesure des directions est une fonction essentielle pour les radars et les sonars. Utilisant les progrès réalisés en traitement du signal, le goniomètre adaptatif présente aujourd'hui des performances aux limites du possible.

■ Laurent Kopp

La goniométrie, mesure de directions, évoquera sans doute un appareil utilisé en radio pour déterminer l'origine d'une émission : un opérateur oriente une antenne dont la directivité possède un « zéro » jusqu'à obtenir un minimum de réception qui lui indique que le zéro est tourné vers l'émetteur.

The adaptive goniometer - At the origin of high resolution methods in spatial processing, the adaptive goniometer is close to optimal for estimating the bearings of several emitters simultaneously. It has applications in radar, sonars and spectral analysis.

Le goniomètre adaptatif résulte, pour l'estimation des directions, des progrès réalisés en traitement du signal. Ces progrès concernent d'abord l'utilisation d'un réseau de capteurs fixes avec lesquels on utilise une méthode de pointage électronique (il n'y a plus de mouvements mécaniques), ensuite la mesure ne fait plus intervenir l'opérateur mais un algorithme qui pointe l'antenne automatiquement, enfin le traitement permet de prendre en compte simultanément plusieurs émetteurs dont le nombre et les directions sont estimés automatiquement.

Le principe du traitement consiste à combiner linéairement les signaux d'un réseau de capteurs en jouant sur les déphasages et atténuations relatives (pondérations), de manière à minimiser l'énergie totale de sortie avec la contrainte que la puissance du bruit en sortie soit fixée.

Pour calculer pratiquement le jeu des pondérations à utiliser, on estime la ma-

trice interspectrale des signaux reçus par les capteurs et on la réduit en éléments propres. Les vecteurs propres associés aux plus petites valeurs propres constituent des jeux de pondérations qui conviennent. Les pondérations étant connues, les directions des émetteurs s'obtiennent simplement en examinant les directions pour lesquelles la fonction de directivité du réseau ainsi pondéré présente des minima (idéalement des zéros).

On a pu montrer que cette méthode était optimale au sens du maximum de vraisemblance pour estimer simultanément la direction de plusieurs émetteurs.

Le goniomètre adaptatif a d'abord été développé comme traitement d'antenne (analyse spatiale : estimation des directions, des distances) et, à ce titre, trouve une application privilégiée dans les sonars et les radars, mais il s'utilise également pour séparer des ondes sinusoïdales de fréquences voisines (analyse spectrale : estimation des fréquences).

■ Laurent Kopp, chef du service Traitement du signal, Thomson Sistra, Activités sous-marines, Parc de Sophia Antipolis, 525, route des Dolines, BP 138, 06561 Valbonne Cedex.

Le sonar et la fonction de pistage

Le sonar évolue vers un grand système à traitements d'image interactif faisant appel à des techniques aussi variées que l'analyse statistique, l'ergonomie cognitive et l'imagerie informatique.

■ Georges Thomas,
Claude Jauffret

Un sonar de veille (passif ou actif) est un système destiné à renseigner un observateur sur les objets présents dans le milieu sous-marin, et ce en général dans un domaine de grandes dimensions. Il exploite pour cela l'information contenue dans des signaux transportés par des ondes acoustiques. L'information utile, dans les systèmes passifs, est contenue dans les bruits rayonnés par les mobiles à repérer; elle est transportée, dans les systèmes actifs, par l'écho du signal d'émission du sonar causé par la présence d'un objet. Dans les deux cas, le signal utile est perturbé par le bruit ambiant.

Les sonars actuels sont des systèmes complexes, multi-senseurs et multifonctions; leur rôle est de fournir *in fine* les paramètres cinématiques des cibles visées. Pour cela, il leur faut dans un premier temps dégager du bruit de fond les signaux acoustiques captés par des hydrophones: les techniques traditionnelles de traitement du signal (spatiales, temporelles, fréquentielles) assurent cette première tâche. Ensuite, des techniques avancées de traitement de l'information sont mises en œuvre afin d'extraire, de localiser précisément et de poursuivre les cibles visées.

Localiser et poursuivre des cibles

Le traitement d'image à plusieurs dimensions est une des techniques avancées de traitement de l'information, de type non-paramétrique, utilisées actuellement en sonar; il analyse globalement le champ intrinsèquement multidimensionnel des données (distance, temps, fréquence, azimut...) sans tenir compte des paramètres cinématiques de la cible. Ce traitement, dit d'extraction, présente

Sonar and tracking function - System sonar concept is presented, then a survey of the techniques of tracking, extraction and target motion analysis is given, implying an improvement of human-computer interaction.

une panoplie d'outils bien adaptés à des tâches de détection, d'estimation et de reconnaissance: restauration du signal bruité, augmentation de contraste, segmentation de l'image en régions, caractérisation, recensement et classification d'objets au moyen d'algorithmes de morphologie mathématique. Ces procédés s'appliquent dans le domaine des coordonnées naturelles des images (azimut ou distance-temps, fréquence-temps) ou dans le domaine des fréquences spatiales associées. Les systèmes actuels permettent la mise en œuvre de ces procédés, en temps réel.

Les fonctions de pistage (trajectographie) font appel aux techniques de traitement de l'information de type paramétrique: on cherche à estimer un ensemble de nombres (vecteur d'état) représentant les *éléments-but*, c'est-à-dire la position, la vitesse, et même la signature spectrale; cette opération s'appuie sur des pistes, résultat de l'opération d'extraction; elle s'effectue sous l'hypothèse d'un modèle de trajectoire; elle consiste à rechercher le vecteur

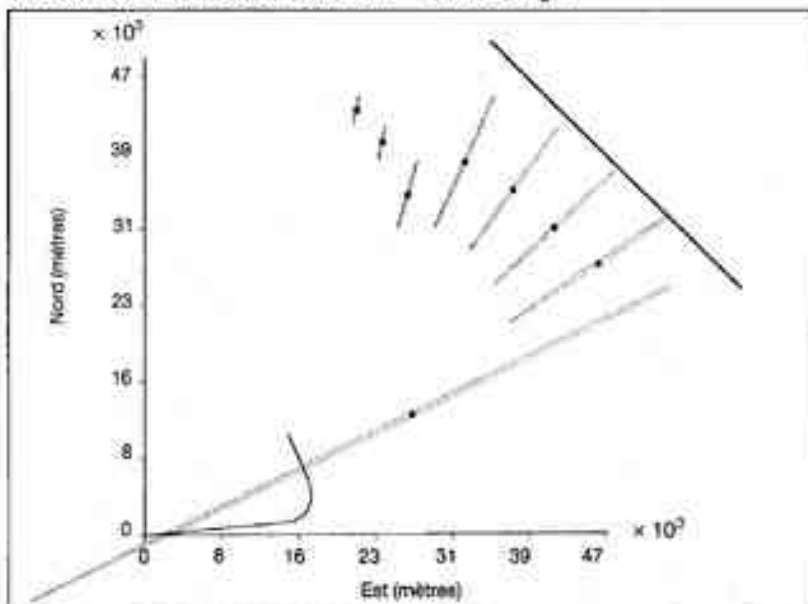
d'état maximisant un critère statistique donné. La figure montre les positions estimées au cours du temps d'un bruité détecté par un sonar passif, ainsi que les domaines de probabilité de présence correspondants.

Un dialogue homme-machine

Par rapport à l'exploitation visuelle et auditive - toujours nécessaire - des données issues du traitement du signal traditionnel, les techniques précédentes nécessitent un aménagement du dialogue homme-machine: l'opérateur est confronté à la supervision de systèmes automatisés, à l'interprétation de données synthétiques et symboliques, et à la prise en compte d'informations en provenance des autres systèmes du navire. C'est pourquoi il est devenu indispensable de recourir aux techniques de communication homme-machine et à l'ergonomie au sens large, pour la définition, la conception et la réalisation d'interfaces homme-machine efficaces en exploitation opérationnelle.

■ Georges Thomas, ingénieur de recherche de l'Établissement des constructions navales de Toulon, Groupe d'études et de recherches de détection sous-marine.

■ Claude Jauffret, ingénieur de recherche de l'Établissement des constructions navales de Toulon, Groupe d'études et de recherches de détection sous-marine, Le Brusc, 83140 Six-Fours-les-Plages.



Résultats d'une trajectographie d'un bruité se déplaçant à 7 m/s et à cap constant, par un sonar passif, à partir de mesures d'azimuts, l'hypothèse d'une fourchette de vitesse étant faite (entre 10 et 15 m/s). Trait rouge plein: trajectoire réelle, points rouges: positions estimées (avec leur intervalle d'incertitude), trait bleu: trajectoire du porteur de sonar.

Systèmes de veille et fusion de données

La surveillance aérienne exploite les informations délivrées par divers types de capteurs. La fusion de ces données est une des clés du système de veille global.

■ Bernard Lachèse,
Pierre-Yves Arquès

La raison d'être principale d'un système de veille sur un navire est la détection, la localisation, la classification, la trajectographie et l'identification des mobiles aériens dans l'ensemble de l'espace à surveiller. Un système de veille peut rassembler un ou plusieurs radars, des capteurs de veille panoramiques en infrarouge ou dans le domaine visible, des dispositifs d'écoute électronique; il est illustré par la figure qui présente un exemple d'un ensemble d'antennes ou « aériens ». L'une des difficultés du problème à résoudre réside dans la recherche d'une « fusion » de données complémentaires mais de caractéristiques différentes: chaque système engendre une représentation élémentaire de l'espace, et l'ensemble de ces interventions doit concourir à une description unique de celui-ci. En effet, les représentations élémentaires diffèrent en raison de l'emploi de senseurs actifs (radars) ou passifs (infrarouge, détecteurs), de l'aspect asynchrone des mesures, de la cadence de renouvellement, ou des précisions variables selon les senseurs et parfois selon le lieu de l'espace observé...

Un système complexe de décision

Il faut bien voir que les capteurs sont appelés à travailler dans un environnement perturbé soit naturellement (fouillis de mer radar, infrarouge ou visible...), soit artificiellement (brouillage, leurre électromagnétique, leurre infrarouge...). Pour résoudre le problème de fusion, il est nécessaire de recher-

cher les complémentarités à exploiter sur les plans de la présence et de l'importance des perturbations: celles-ci sont généralement décorréliées d'un senseur à l'autre sur ces deux plans. En conséquence, l'association multisenseur doit prendre en compte la connaissance que le système peut avoir de l'environnement et des éléments perturbateurs artificiels, les capacités propres à chaque senseur, la connaissance possédée sur les mobiles à détecter, ainsi que les règles de compatibilité électromagnétique permettant de limiter les gênes intersenseurs. Un tel problème correspond donc à un système complexe de décision, en présence d'une information disponible fluctuante et parfois faible. Il est alors impératif de suivre une méthodologie stricte d'exploitation de la théorie et de l'expérimentation pour établir les règles de fusion à retenir pour le système spécifique étudié.

L'étude théorique de la fusion fait appel à divers domaines du traitement du signal (détection, estimation, filtrage...) et semble actuellement se proposer l'utilisation de concepts ou théories récentes en particulier développés dans le cadre de l'intelligence artificielle. De manière pratique, les algorithmes à développer dépendent de manière importante du système informatique d'implantation, l'aspect temps réel (pour des mobiles très agiles) des événements inattendus



Ensemble d'antennes ou « aériens » sur un navire.

et brutaux et des réactions nécessairement rapides étant primordial. Enfin, le résultat obtenu dans le problème de fusion, et donc la qualité de la description du milieu extérieur, conditionne la solution à apporter à la partie interface homme-machine, problème fondamental dans la conception des systèmes complexes de décision.

■ Bernard Lachèse, ingénieur à la Direction des constructions navales de Toulon (CESDA) et conseil scientifique de la sous-direction Etudes).

■ Pierre-Yves Arquès, professeur à l'Université de Toulon et du Var, président du conseil scientifique de la sous-direction Etudes de la Direction des constructions navales de Toulon. BP77, 83800 Toulon naval.

CNRS - AUDIOVISUEL

11, place André Blond 91196 Mennecy Cedex

LE ROBOT, LE CHIRURGIEN ET LES MATHÉMATICIENS

L'équipe de neurochirurgie du Professeur Benabid, assistée par un robot mis au point à l'hôpital de La Tronche à Grenoble, pratique une biopsie crânienne stéréotaxique. Un logiciel permet, grâce à une modélisation 3D, à partir d'imagerie RMN et X, de piloter le robot qui permettra au chirurgien d'optimiser la définition de la trajectoire des instruments. Dominique Hoffmann, neurochirurgien, le Professeur Benabid, chef du service de neurochirurgie et le Professeur Demongeot, chef du service d'informatique médicale, expliquent comment le travail des mathématiciens et des informaticiens a permis la réalisation de la numérisation d'un atlas du cerveau, la représentation 3D des images médicales et la mise en correspondance de toutes ces données.

Image, son, montage et réalisation: Jean-François Dars et Anne Papillault
Conseillers scientifiques: Philippe Cinguin et Stéphane Lavallée

Documents: TIMB
Production: CNRS Audiovisuel
17 minutes - 1990

Survey systems and data fusion - The big aerial survey systems use information given by several sensors based on different physical phenomena. By taking into account the medium, a main signal processing problem exists in the fusion of the obtained data. The global system performances depend on the retained solution.

Classification d'objets en imagerie sonar

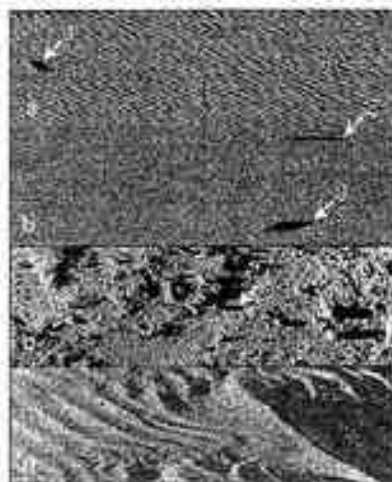
Comment faire la différence, parmi la masse d'images haute-résolution des fonds sous-marins rapportées par les sonars, entre les objets naturels et ceux créés par l'homme ?

■ **Benoît Zerr,**
Jean-Pierre Kernin

L'exploration et la surveillance des fonds marins à grande échelle fait appel à l'emploi de systèmes sonar haute résolution. L'accroissement de leurs performances en termes de résolution et de vitesse de fonctionnement, se traduit par une augmentation importante du volume de données à traiter. Ce volume pouvant atteindre plusieurs dizaines de giga octets par jour, il est nécessaire d'automatiser l'extraction de l'information. C'est dans cette optique que des études sont

menées au GESMA (Groupe d'études sous-marines de l'Atlantique) depuis 1987 afin de définir les algorithmes permettant la détection et la classification automatique des objets présents sur les fonds marins.

Le but recherché dans le domaine de la classification est, dans un premier temps, d'être à même de pouvoir différencier les objets naturels des objets créés par l'homme. Cette séparation sommaire en deux classes est fondée sur le fait que, contrairement à un objet naturel, un objet créé par l'homme est a priori constitué d'un assemblage d'éléments de forme géométrique simple. Ces objets se traduisent sur l'image sonar par la présence d'ombres (voir figure) dont le contour présente des segments de droites, des arcs de cercles ou d'ellipses... La recherche de telles caractéristiques peut être effectuée, moyennant quelques prétraitements, par emploi de la transformée de Hough. Comme l'ont montré les tests, cette méthode est peu sensible au bruit de codage des contours, et très efficace en présence d'objets de forme cylindrique. Les résultats obtenus sur les autres objets sont plus nuancés, les caractéristiques de certains cailloux et des objets de type



Extraction d'objets géométriques appliquée à différents types de terrain. (a) objet cylindrique (1) sur fond de rides; (b) objets cylindriques (2 et 3) sur fond de sable; (c) objet sphérique (4) sur fond de cailloux; (d) pas d'objet géométrique sur fond de dunes.

sphérique étant très voisines.

Cette méthode de traitement permet une classification relativement grossière des objets présents sur les fonds marins. Elle devra être associée à d'autres méthodes (réseaux neuromimétiques, classification statistique...) pour obtenir une classification plus fine.

■ **Benoît Zerr**, ingénieur à la Direction des constructions navales, Groupe d'études sous-marines de l'Atlantique.

■ **Jean-Pierre Kernin**, ingénieur à la Direction des constructions navales, Groupe d'études sous-marines de l'Atlantique, 29240 Brest Naval.

Object classification in sonar imaging. - Existing sonars give very high resolution images of the seabed. However, as data volume and processing time allowed do not increase in the same way, all elementary functions must be done automatically. This is also the case for detection and classification used to find objects lying on the seabed. Here a classification method used to separate natural objects from man made objects is presented.

Le traitement du signal et le pêcheur

L'appauvrissement des zones de pêche rend nécessaire l'optimisation de l'exploitation de la ressource. L'amélioration des techniques de détection acoustique peut y contribuer.

■ **Roland Person**

La gestion optimale de la ressource halieutique repose sur deux aspects principaux : la connaissance précise du stock disponible en taille et

tonnage - qui permet de définir l'effort de pêche acceptable - et le respect par les pêcheurs des quotas fixés. Les techniques de détection acoustique y contribuent.

L'écho-intégration est utilisée depuis de nombreuses années pour évaluer les

stocks d'espèces pélagiques. Mais la précision de cette méthode est, en particulier, tributaire de la connaissance de la relation entre l'énergie acoustique de l'onde sonore et la quantité de poisson détectée. Celle-ci varie avec la taille et l'espèce du poisson, mais aussi avec son comportement.

Des sondeurs large-bande...

L'utilisation de signaux large-bande dans la gamme 20-100 kHz, imposée par les portées exigées des sondeurs, est prometteuse. L'usage du filtrage adapté rend possible la combinaison des propriétés de grande portée et de bonne résolution. Par ailleurs, l'emploi de signaux large-bande permettra d'avoir une valeur de la section efficace du pois- ➤

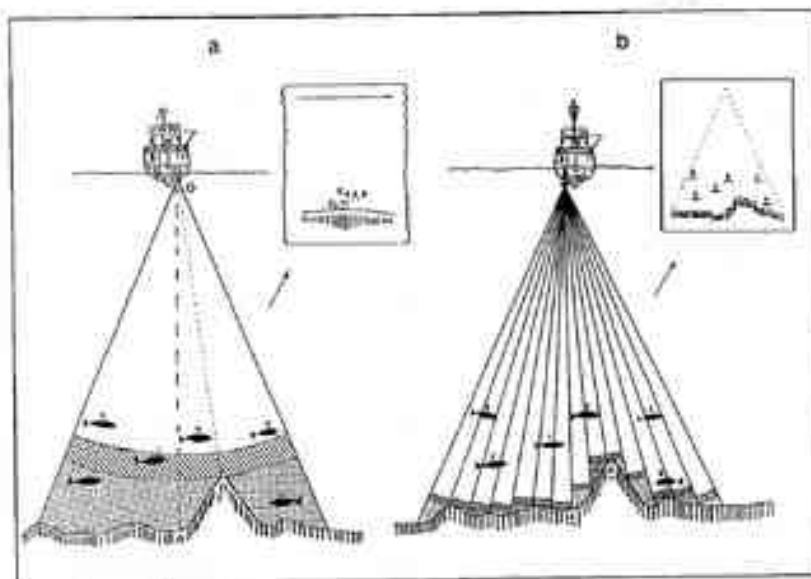


Fig. 1 - (a) Sondeur classique (monofaisceau) : à proximité du fond, il existe une zone d'ombre dont le volume augmente fortement en présence d'aspérités. Les poissons (2) et (3) ne sont pas détectés ; (1) donne un écho confondu avec celui du fond ; (4), (5), et (6) sont détectés sous la forme d'un seul écho ; (b) Sondeur multifaisceau (16 x 2°) : le volume de la zone d'ombre est grandement diminué. Les poissons (1), (2), et (3) sont détectés parfaitement ; (4), (5), et (6) donnent des échos séparés et repérés par rapport à l'axe du navire. En cartouche, les poissons détectés sur écran.

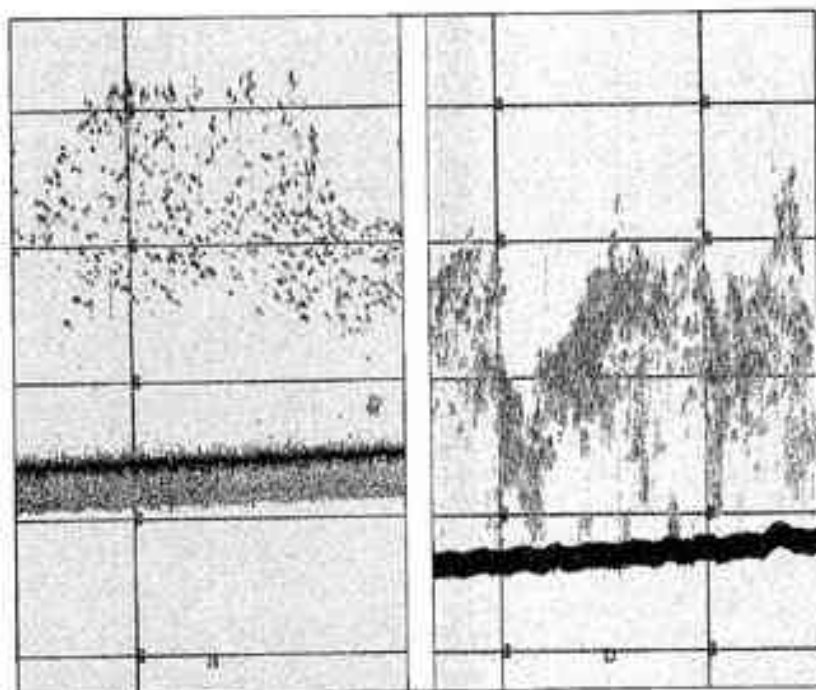


Fig. 2 - (a) Sondeur large-bande : détection d'un banc de chinchards. Le banc étant peu dense, la grande résolution en distance du sondeur permet de détecter pratiquement chaque poisson isolément (échos simples). Bande 40-60 kHz ; $t = 10$ ms ; sortie du filtre corrélateur traitée par le système NES-MOVIES ; (b) Sondeur Simrad EK 400-38 kHz : détection d'un banc de chinchards similaire à celui de la figure 2 (a), mais en sondage classique.

Signal processing and fishing - New echosounders, using advanced signal processing are under development to improve acoustic estimation of fish and classification of detections. Wide-band modulation and multibeam techniques give promising results.

son moyennée sur la gamme de fréquences utilisée, moins sensible aux effets comportementaux. L'analyse de la signature spectrale est également prometteuse. Une amélioration de la précision des résultats des campagnes d'écho-intégration et de l'identification des détections en est attendue.

...ou multifaisceaux

Une autre technique, celle du sondeur multifaisceaux, apporte elle aussi, des progrès importants par rapport au sondeur monofaisceau usuel, d'autant que la réalisation, à un coût relativement faible, des transducteurs complexes nécessaires pour cette application, a été rendue possible par la mise au point de techniques originales. Les détections au voisinage du fond sont réalisables grâce à la réduction de la zone d'ombre ; les épaves et les croches, souvent à peine visibles sur un sondeur usuel, sont mises en évidence et peuvent être positionnées précisément par rapport au navire ; les informations recueillies en temps réel sur la topographie permettent d'identifier immédiatement les fonds rocheux, et celles collectées sur la répartition spatiale des détections améliorent leur classification.

Dans le futur, l'association de ces deux techniques pourra déboucher sur un outil puissant de gestion des ressources. En assurant la localisation, l'identification et l'évaluation d'une ressource, il contribuera à son exploitation sélective.

Roland Person, ingénieur à l'IFREMER, Centre de Brest, BP 70, 29280 Plouzané.

CNRS - AUDIOVISUEL

1, place Aristote-Bernard 62105 Montbéliard Cedex

HISTOIRE D'ISTAR OU SPOT EN RELIEF

Conception : Robert Clarke
Documents : INRIA, Intervenant :
Pierre Leymarie et Laurent Remouard
Réalisation : Jean-François Dars
et Anne Papillault
Production : CNRS Audiovisuel
6 minutes - 1990

Problématique de la détection de contours

La détection de contours passe nécessairement par une définition précise du contour, la conception de détecteurs adéquats et la mise au point d'une méthodologie.

■ Djemel Ziou,
Brigitte Wrobel-Dautcourt

Une image est généralement une projection d'une scène tridimensionnelle (3D) sur un plan bidimensionnel (2D). Elle est formée par contact des rayonnements des objets de la scène avec un dispositif physique. Formellement, c'est une fonction discrète à deux variables $N \times N \rightarrow [0, n]$, où n est le niveau de gris d'un point de l'image (luminance). L'image est une structure contenant une quantité considérable d'informations, ambiguës et difficiles à exploiter de façon automatique. Parmi ces informations, on distingue les frontières des objets présents dans la scène. Cette information est nécessaire à la perception de l'univers; il a été montré en particulier que l'être humain est capable d'identifier un objet seulement à partir de ses frontières. Les frontières sont représentées dans l'image par des variations du niveau de gris. Ces variations sont appelées contours. A chaque point de contour on associe sa position, sa force, son échelle, etc. (voir sur la figure, où seule l'information de position apparaît).

Caractériser un contour...

Un contour peut être caractérisé par sa force et son type; la force exprime son degré de plausibilité dans l'image, le type exprime sa signification dans la scène. Il existe plusieurs types de contours, par exemple «les marches» qui se situent généralement entre deux zones de niveaux de gris quasi constants mais distincts. Intuitivement, ce sont les frontières des objets de la scène. Un point de contour de type «marche» correspond à un point d'inflexion de la fonction image. Il peut être mis en évidence soit par la recherche du maximum de la première dérivée, soit par la recherche du passage par zéro de la dérivée seconde.

Problems in edge detection - Edge detection is the process that attempts to select information related to the structure of the objects present in an image. Edge specification, numerical differentiation and elaboration of a methodology of edge detection are discussed.

En 2D, la dérivée seconde peut être approchée par le laplacien.

...pour pouvoir le détecter

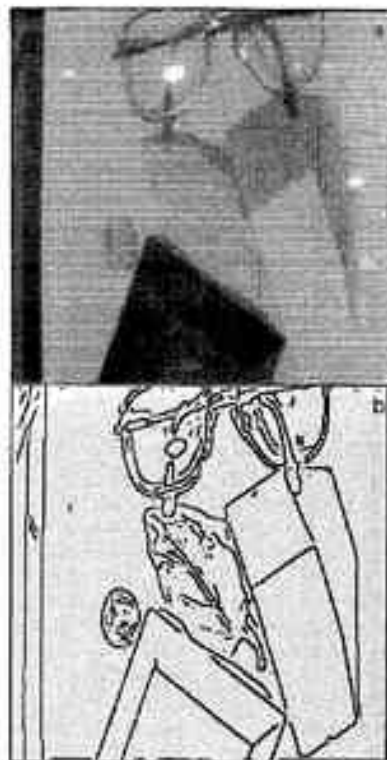
La détection de contour est souvent la première étape dans un système de vision. Son objectif est de fournir une description complète de l'image en terme de contours. D'après la définition donnée précédemment, un contour peut être détecté simplement par le calcul des dérivées de l'image. Or, la différenciation (le calcul des dérivées) d'une fonction discrète et bruitée (l'image) est un problème mal posé; c'est-à-dire qu'elle est affectée par le bruit. En conséquence, un détecteur doit comporter au moins deux étapes: lissage puis différenciation. C'est le type du contour et son utilisation ultérieure qui dirigent le choix du type et de l'ordre de l'opérateur de différenciation (gradient, laplacien, deuxième dérivée directionnelle...).

Après quoi, il faut lisser...

Le lissage comporte des effets négatifs comme la création de nouveaux points de contour, l'élimination de certains d'entre eux ou leur déplacement. Cet effet s'aggrave en fonction du degré de lissage: fort, il ne donne que les contours significatifs, mais ils sont mal localisés; faible, il fournit trop de détails, mais les contours sont bien localisés. D'une façon générale, l'exhaustivité dans la détection et l'erreur de localisation sont deux critères antagonistes.

...pour des résultats souvent décevants!

Malgré les efforts considérables effectués dans ce domaine, les résultats de la détection de contour sont souvent décevants. Les causes sont multiples. Un premier problème est de trouver une définition complète, précise et globale du contour et d'utiliser celle-ci pour concevoir des détecteurs plus adaptés. Un second problème est lié à la méthodologie de la détection de contour, car on intègre généralement dans un système de vision un détecteur de contour choisi d'une façon «presque» arbitraire qui est alors exécuté sur toutes les images utilisées. Or:



Un exemple d'image à niveaux de gris et les contours de type «marche» extraits. Les contours en (b) représentent les informations relatives aux structures des objets présents dans l'image (a).

- les détecteurs existants sont spécialisés pour un type de contour particulier et ne peuvent fournir tous les contours souhaités dans l'image;
- les contours d'un type donné apparaissent dans une image à des échelles différentes. Or les détecteurs sont souvent paramétrés par l'acuité du résultat à obtenir;
- les caractéristiques d'un détecteur (filtre à support fini, type de l'opérateur de différenciation...) influencent directement la qualité des résultats: contours formés, rectilignes, bruit dans l'image...

Il apparaît donc nécessaire d'exécuter plusieurs détecteurs sur une même image; en conséquence, il faut définir des critères de sélection d'un détecteur, des lois pour calculer ses paramètres, des méthodes de fusion des résultats obtenus... Ceci constitue une nouvelle et importante voie de recherche.

■ Djemel Ziou, chercheur au Centre de recherche en informatique de Nancy (URA 262 CNRS).

■ Brigitte Wrobel-Dautcourt, maître de conférences à l'Université Nancy I, Centre de recherche en informatique de Nancy (URA 262 CNRS), Université Nancy I, Campus scientifique, BP 239, 54506 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex.

Le terrain et sa représentation numérique

A partir des couples de vues stéréoscopiques réalisées par des avions ou des satellites, une modélisation géométrique et radiométrique permet de produire de manière quasi-automatique un modèle numérique de terrain.

■ Guy Ruckebusch

Le domaine de l'information géographique est en pleine expansion, pour des applications civiles (géologie, hydrographie, équipement...), ou militaires (systèmes de commandement, navigation autonome de systèmes d'armes...). Son élaboration suppose un modèle numérique de terrain (MNT), qui synthétise la connaissance tridimensionnelle du terrain naturel et des infrastructures.

L'observation de la Terre par télédétection aéroportée et satellitaire permet, grâce à l'émergence de méthodes sophistiquées de traitement du signal et de l'image, de produire, quasiment en automatique, des MNT sur de grandes zones à un coût très faible comparé aux méthodes utilisant des équipements au sol. L'obtention du MNT à partir d'images de télédétection repose, en général, sur le principe de la vision stéréoscopique : deux (ou plusieurs) images d'une même scène vue sous des angles de visée différents permettent, par triangulation de points homologues (points dans chaque image correspondant au même point au sol), de remonter à l'information 3D de la scène (Fig. 1).

Une large variété de capteurs

La télédétection offre une large variété de capteurs autorisant la vision stéréoscopique : capteurs passifs tels que caméras photographiques ou électro-optiques (matricielles, linéaires telles que celles équipant le satellite SPOT, ou de type scanner comme pour le satellite Landsat), ou capteurs actifs tels que les

imageurs radar. Le calcul automatique du MNT à partir d'un couple d'images stéréoscopiques (éventuellement issues de capteurs différents) s'effectue en deux opérations : calibration géométrique relative des processus de prises de vues (essentielle pour la triangulation) et mise en correspondance d'un champ dense de points homologues. Ces deux opérations reposent sur une modélisation géométrique et radiométrique (délicate dans le cas d'images à fort diachronisme) de la chaîne image, incluant chaque capteur et la scène observée.

La démarche sera illustrée ici uniquement pour un couple d'images SPOT panchromatiques (images noir et blanc formées de 6 000 prises de vues successives d'une barrette de 6 000 photodétecteurs, correspondant à un pas au sol de 10 m en visée verticale). La grande taille des images SPOT fait qu'il est économiquement très rentable de remplacer les procédés classiques de stéréores-

titution analytique, où le processus de mise en correspondance repose entièrement sur un opérateur humain, par la méthode automatique, décrite ci-dessous, complétée éventuellement par une phase de validation et de correction confiée à l'opérateur humain.

La modélisation géométrique...

La modélisation géométrique vise à représenter paramétriquement la transformation géométrique entre les coordonnées géographiques d'un point au sol et les coordonnées de ses projections sur chacune des images. Pour SPOT, huit paramètres modélisant l'orbite et l'attitude du capteur pendant la durée de prises de vues, suffisent à localiser chaque pixel à mieux que 1 mètre au sol. Les seize paramètres du modèle global sont estimés par des techniques de moindres carrés à partir d'un petit nombre (typiquement une dizaine) de relevés (manuels ou automatiques) de points d'appui (points remarquables d'une image à coordonnées géographiques connues), et de points homologues caractéristiques. Cette calibration géométrique permet de rééchantillonner les deux images dans une géométrie, dite quasi-épipolaire, où tous les points homologues se trouvent, à un écart inférieur au mètre près, sur les mêmes lignes d'image. Cette propriété est cruciale pour l'opération de mise en correspondance, qui se réduit alors à une recherche ligne à ligne. En outre, la fonction

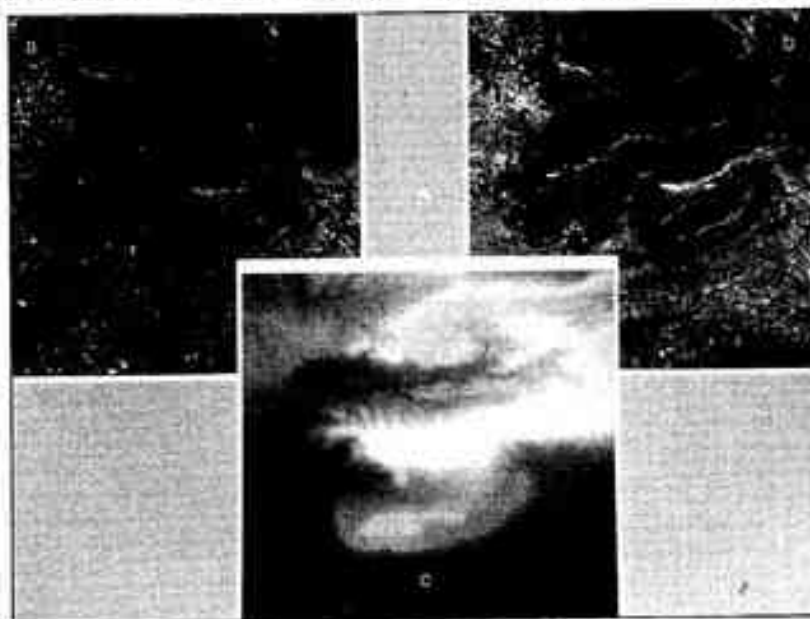


Fig. 1 - Elaboration d'un modèle numérique de terrain (MNT) (c) à partir d'un couple d'images SPOT panchromatiques (a) et (b) dont les angles de visée sont différents. En blanc apparaissent les altitudes élevées (relief), et en noir les altitudes basses (vallées).



Fig. 2 - Vue perspective obtenue en « habillant » le MNT par les pixels de l'image SPOT.

de disparité (décalage entre points homologues le long d'un couple de lignes épipolaires) est proportionnelle à l'altimétrie du point au sol correspondant.

... et la modélisation radiométrique

La modélisation radiométrique du couple d'images SPOT justifie d'utiliser,

comme critère local de mise en correspondance dans le cas de diachronisme modéré, l'inter-corrélation de vignettes. L'optimisation de ce critère est effectuée par une technique de programmation dynamique, afin de respecter la structure d'ordre sur les pixels homologues, ainsi que la continuité de la fonction de disparité. Le modèle géométrique a priori de la scène (altimétries

maximum et minimum, pentes maximales) est utilisé pour contraindre la mise en correspondance (effectuée avec une stratégie hiérarchique à résolution croissante) et dans l'élaboration finale du MNT.

La faisabilité de l'obtention automatique de MNT à partir d'images stéréoscopiques SPOT est démontrée, au moins dans le cas d'images de bonne qualité et à diachronisme modéré, où les performances sont voisines des performances théoriques (précision altimétrique de cinq mètres pour deux images à dépointage maximum de 27°). Les travaux de recherche sont axés actuellement sur les thèmes suivants : couplage avec l'interprétation d'images (en particulier dans le cas d'images à diachronisme fort), stéréoscopie à partir de capteurs hétérogènes (tels que radar et optique), amélioration d'un MNT par prise en compte récursive d'une nouvelle image de la scène, stéréoscopie haute résolution (pixel au sol inférieur au mètre) pour la restitution d'infrastructures.

■ Guy Ruckebusch, directeur scientifique à la société Matra-MSTI, responsable du Laboratoire de traitement des images et du signal, directeur de recherche associé au CNRS, Unité « analyse et modélisation stochastique » (URA 1378 CNRS), 38, boulevard Paul Cézanne, 78052 Saint-Quentin-en-Yvelines Cedex.

« Scidar » pour cartographier la turbulence atmosphérique

Cent microsecondes suffisent pour altérer la cohérence de la lumière qui nous vient des étoiles lors de la traversée de notre atmosphère : évaluation des dégâts !

■ Jean Vernin

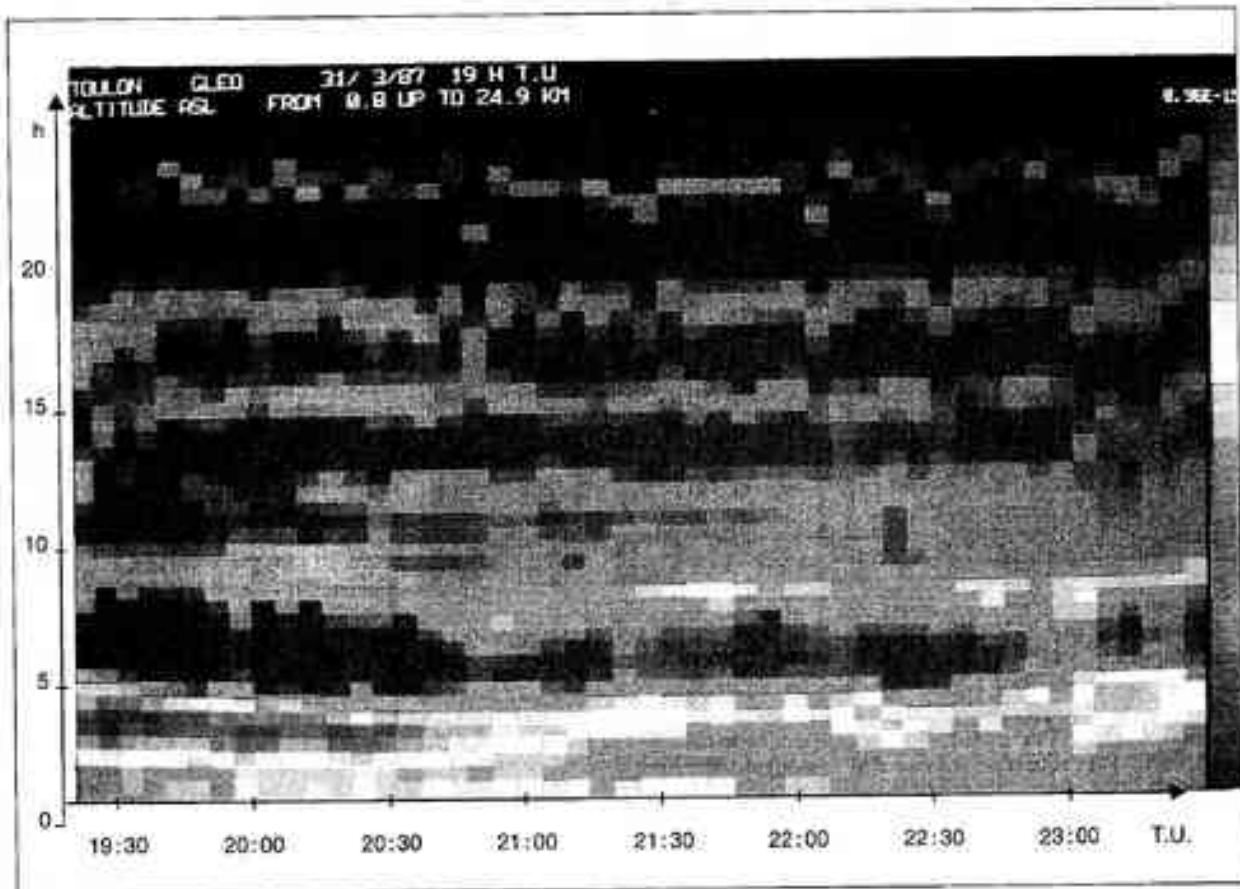
En dehors de quelques cas très simples, aucun modèle n'est capable de simuler l'écoulement d'un fluide tel que notre atmosphère, même en utilisant les ordinateurs les plus puissants. Par exemple, on n'a qu'une idée très vague de la taille des tourbillons

atmosphériques qui sont à la charnière entre la turbulence isotrope, pleinement développée, et la turbulence quasi-bidimensionnelle imposée par la structure thermique de l'atmosphère.

Pour aborder ce problème, nous utilisons une méthode indirecte qui consiste à éclairer l'atmosphère et à étudier dans quelle mesure la propagation des ondes lumineuses est affectée. Pour se faire

Atmospheric turbulence profiling by the Scidar technique - The statistical analysis of stellar scintillation is a powerful tool to study dynamical processes in the atmosphere as well as astronomical site testing. The insight of these two different physical aspects can be surprisingly related through the use of image processing.

une idée, que le lecteur observe l'éclairement du fond d'une piscine, et il pourra remarquer notamment des marbrures lumineuses qui semblent se déplacer dans la même direction que les vagueslettes qui agitent la surface de l'eau. De même, dans notre atmosphère, des relations de cause à effet lient la présence de tourbillons et l'éclairement fluctuant qui nous vient des étoiles : la scintillation. ▶



Evolution dans le temps de la turbulence située dans les vingt premiers kilomètres d'atmosphère par la technique Scidar. On remarque clairement la nature stratifiée et horizontale de la turbulence. Par contre, sa nature non-stationnaire met en péril les hypothèses communément admises en traitement du signal.

La turbulence et l'acuité des télescopes

Très loin des équations de l'hydrodynamique sont les préoccupations des astronomes qui enregistrent des images du ciel tellement brouillées par la turbulence qu'elles semblent provenir d'un télescope de 10 cm de diamètre, alors qu'en réalité ils utilisent d'immenses miroirs de 10 m ! Cette énorme perte d'acuité est causée par quelques couches d'atmosphère qui se comportent comme autant de lames de verre de mauvaise qualité. Autant dire que les astronomes sont exigeants sur les qualités d'un site avant d'y bâtir des instruments comme le Very Large Telescope (4 télescopes de 8 m) de l'European Southern Observatory, qui coûtera environ 1 milliard de francs aux contribuables européens !

Techniquement, avec des caméras très sensibles, on enregistre des images de la scintillation produite par deux étoiles. Par un procédé de triangulation, on remonte à la détermination de l'altitude des couches perturbatrices (voir figure) : c'est la technique Scidar (scintil-

lation detection and ranging) par analogie avec le radar. Huit milliards d'informations élémentaires sont traitées en temps réel dans des processeurs spécialisés pour extraire les paramètres statistiques pertinents. La contraction de l'information s'effectue en calculant

des fonctions de corrélation ou des densités spectrales d'image. La reconstitution de la stratification de l'atmosphère, couche par couche, se fait par une technique d'inversion d'équation intégrale qui maximise à la fois l'entropie du bruit (lié à la nature photonique de la lumière) et celle du signal (la présence ou l'absence d'une couche turbulente).

Il peut sembler magique que l'on puisse étudier deux phénomènes aussi différents que la dynamique atmosphérique et la qualité des images astronomiques par une observation aussi banale que la scintillation des étoiles. C'est finalement la théorie de la propagation de la lumière et l'utilisation massive des techniques de traitement d'image qui ont décloisonné ces deux aspects de la physique.

CNRS - AUDIOVISUEL

1 - Jean-François Baudry, 30 rue de la République, 06100 NICE Cedex 4

ORAGES ÉTROITEMENT SURVEILLÉS

Observation des orages en régions tempérées à partir d'investigations à distance (radars météorologiques) et d'investigations in situ (avions instrumentés pénétrant dans l'orage).

Auteurs :

Paul Aimy et Jacques Testud

Réalisateur : Caroline Roulet

Co-production : CNRS Audiovisuel,

CNET, Météorologie Nationale,

Ministère des Transports et

LAMP Direction scientifique TOAE

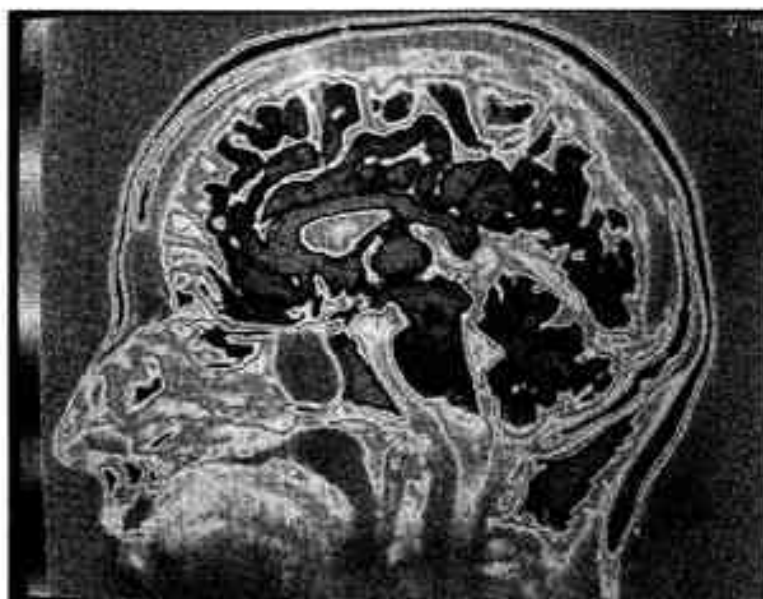
1985 - 52 minutes

■ Jean Vernin, chargé de recherche au CNRS, directeur du Département d'astrophysique de l'Institut de mathématiques et sciences physiques (URA 709 CNRS), Université de Nice-Sophia Antipolis, Parc Valrose, 06034 Nice Cedex.

INTERPRETER ET RECONNAITRE

Interpréter, c'est d'une certaine façon tenter de comprendre, et comprendre, c'est relier des informations entre elles à divers degrés de profondeur (ou niveaux d'abstraction); c'est donc remonter des effets aux causes (expliquer ce qui a provoqué ce qu'on observe, par exemple les mouvements articulaires dans le cas de la parole), ou décrire les relations sémantiques entre les observations, ou identifier des groupes d'observations vis-à-vis d'un code abstrait (remonter du signifiant au signifié, du signal "chien" au concept qui le représente). Ces trois points de vue – inversion, expertise, reconnaissance des formes – développés ci-après donnent trois lectures des articles de ce chapitre.

En terme d'inversion, interpréter consiste à chercher à expliciter les causes qui ont engendré les faits observés. On ne dispose généralement que de ces faits, parfois du contexte dans lequel ils sont produits et dans les meilleurs des cas, de modèles générateurs. Dans une certaine mesure donc, interpréter est synonyme d'"inverser", c'est-à-dire remonter aux causes originelles à travers le modèle générateur. C'est le cas par exemple de la parole produite par un système complexe



Etude anatomique de l'encéphale et du tronc rachidien sur une coupe sagittale médiane de cerveau normal, obtenue par IRM (imagerie par résonance magnétique). Ce type d'examen simple et rapide tend à devenir routinier pour le dépistage d'incidences inflammatoires: il permet de voir l'hypophyse, le sinus veineux et le corps calleux. (© Service de radiologie, Hôpital Saint-Louis).

d'articulateurs et de cavités de résonance: retrouver les commandes de ce système permettrait d'identifier les sons analysés. On montre qu'en général ce problème est mal posé c'est-à-dire qu'il n'admet pas de solution unique ou pas de solution du tout. Il faut donc contraindre l'espace de recherche au maximum pour focaliser une et une seule solution possible. Ce problème est traité plus en détail dans le chapitre "Filtrer et synthétiser".

Lorsqu'on ne possède pas de modèle générateur, inter-

préter consiste à relier des phénomènes entre eux, que ces phénomènes soient visibles ou supposés exister, en utilisant l'expertise disponible dans le domaine d'application concerné. Il faut alors passer par une étape de paramétrisation – toujours délicate puisqu'elle dépend précisément de l'interprétation ultérieure – puis, en supposant une certaine "invariance" des phénomènes, par une étape de traitement contextuel de ces paramètres. L'image du plancton recueillie en surface dépend de ▶

INTERPRETER ET RECONNAITRE



Reconnaissance de forme par traitement du signal infrarouge au cours d'une observation nocturne. (© SAT).

► nombreux facteurs et la "forme" analysée n'a d'invariante que celle que lui prête l'observateur humain vis-à-vis du "signifié" de l'objet représenté. Une méthode consiste donc à mettre en œuvre des systèmes experts dans lesquels un maximum de sources de connaissances hiérarchisées doivent coopérer (pour la parole : lexique, syntaxe, sémantique ; pour les images, divers niveaux d'abstraction mis en œuvre : vision, segmentation et analyse de scènes) pour interpréter le signal. Cependant, la principale pierre d'achoppement reste l'"invariance" qui est souvent illusoire : un même objet peut prendre de multiples formes et inversement deux objets différents peuvent avoir des formes proches, indiscernables par des techniques d'analyse simples. Il faut donc bien séparer les niveaux d'abstraction, l'analyse de détail et l'analyse de la structure, et mettre en œuvre des stratégies d'identification très complexes avec toutes les ressources qu'offre l'intelligence artificielle.

Une autre voie possible est la "re-connaissance" c'est-à-dire l'identification d'une forme déjà connue. La méthode

est simple : emmagasiner et classer les formes caractéristiques à reconnaître, en choisir des prototypes pour l'apprentissage, puis, au moment de la reconnaissance, comparer la forme inconnue aux références stockées dans un dictionnaire. La mise en œuvre n'est évidemment pas si simple dès lors que les notions de distance (tolérance aux déformations acceptées) et de représentativité des prototypes restent très liées au corpus d'apprentissage. De plus le "rejet" – rejet d'une forme n'appartenant pas au dictionnaire – est difficile à définir puisque précisément toute forme nouvelle n'appartient pas de facto au dictionnaire de référence. Le problème du diagnostic – variante du problème d'interprétation – devient lui aussi délicat puisqu'il faut raisonner sur des informations absentes ou incomplètes et sur des phénomènes qui ne sont pas toujours répertoriés à l'avance. Une même image médicale peut prendre des aspects nouveaux pour chaque cas analysé.

Il peut sembler illusoire, après toutes les difficultés recensées ci-dessus, d'interpréter des signaux qui ne sont bien souvent que la "surface" d'un code caché. Cependant, des progrès spectaculaires sont à attendre du traitement de signaux multicapteur (RMN, image de visages + parole, etc.) ou de capteurs nouveaux qui permettront d'avoir des points de vue complémentaires sur ce code. A l'heure actuelle, aucune technique n'émerge vraiment et toutes (modélisation, raisonnement expert, apprentissage/comparaison)



Système d'authentification automatique par empreinte digitale. Après saisie de l'image de l'empreinte à l'aide d'un capteur optique, une matrice de directions (orientations des crêtes de l'empreinte) et un détail de l'image de l'empreinte (une petite zone riche en informations caractéristiques) sont extraits puis comparés à la référence. Le taux de bonne reconnaissance est de 99% pour un seuil de sévérité moyen. (© SEPT).

ont un quelconque degré d'insuffisance. Des architectures de systèmes tentent donc actuellement d'harmoniser ces techniques entre elles. Les articles qui suivent montrent quelques aspects de ce difficile problème à travers des domaines comme la parole, l'acoustique sous-marine, la robotique, les images médicales, géologiques ou astronomiques et les signaux biologiques. Les solutions ne sont à ce jour que partielles et sont spécifiques des signaux étudiés.

Jean Caalen,
chargé de recherche au CNRS

Roger Mohr,
professeur à l'Institut national
polytechnique de Grenoble

Peut-on entendre les formes du conduit vocal ?

La reconnaissance de la parole serait-elle un problème mal posé ? Le traitement du son à bas niveau (sans syntaxe et sans sémantique) pourrait bénéficier d'une formulation – déjà courante en vision par ordinateur – celle de l'inversion.

■ Christian Abry,
Gang Feng

«**P**eut-on entendre la forme d'un tambour ? » C'est la question que posait déjà en 1966 le mathématicien américain Marc Kac. Depuis, Tomaso Poggio du MIT a montré tout le bénéfice que l'on pouvait retirer d'une formalisation du traitement de la vision *bas niveau* (rétinienne), en reprenant les principes énoncés par le grand mathématicien français Hadamard, lequel identifiait dès 1923 la classe des problèmes mal posés. Parmi ceux-ci figure l'*inversion optique*, c'est-à-dire la récupération de la forme tridimensionnelle de l'objet à partir de ses images rétiniennes ; et bien sûr, aussi, la récupération de la forme du tambour à partir du son émis : c'est l'*inversion acoustique* proprement dite.

Qu'est-ce qu'un problème mal posé ? Selon Hadamard, dans un problème mal posé, on n'est pas sûr : 1° que la solution existe ; 2° que la solution soit unique ; 3° que la solution dépende de manière continue des conditions initiales. Pour poser correctement ce problème, il faut introduire des *contraintes*, c'est-à-dire des *régularités* tenant à la nature des objets qui doivent être récupérés par inversion. Dans le cas de la parole, si le but est de récupérer, par exemple, les gestes articulatoires qui produisent les sons, il s'agit alors de faire entrer dans la régularisation du problème les contraintes qui tiennent, parmi d'autres, au contrôle dynamique de ces gestes.

Can we hear the shapes of the vocal tract? – Could low-level speech recognition be considered as an ill-posed problem, specifically, as an inverse acoustics problem, which has not yet found a proper solution? To solve inverse problems, in acoustics as well as in optics, one has to introduce constraints in order to regularize their solutions. This has been done successfully in robotic vision. Improvements in speech recognition could be made using specific constraints to recover speech gestures.

Du son aux gestes

La recherche, à partir du son, des gestes qui sous-tendent la production de la parole, n'est pas nouvelle. Dès les années 60, une théorie a été formulée dans ce but précis par Liberman et ses collaborateurs. Cette théorie, dite *motrice*, a été révisée récemment : elle maintient que la perception des sons de la parole n'est pas essentiellement un phénomène auditif. De même que la chauve-souris possède un mécanisme d'écho-localisation pour repérer obstacles et proies, de même le son émis par le sujet parlant ne servirait à l'auditeur qu'à explorer l'espace des gestes articulatoires de son interlocuteur. En d'autres termes, si la chauve-souris se sert des ultra-sons pour « voir » l'espace, l'homme se servirait du son de la parole pour récupérer les intentions gestuelles vocales de ses semblables.

Deux remarques s'imposent sur ces ambitions théoriques. D'une part, jusqu'à présent, la théorie motrice ne s'est jamais dotée de moyens computationnels explicites, c'est-à-dire d'un ensemble d'algorithmes qui permettent de passer du son aux gestes. D'autre part, la théorie motrice fuit l'hypothèse que le mécanisme qui effectue ce traitement est inné et propre à l'homme.

Le fait de resituer ces ambitions théoriques dans le cadre de l'inversion présente au moins deux avantages : rendre calculable la récupération des gestes et ne pas dépendre de l'hypothèse d'innéité anthropocentriste. Celle-ci reste en

effet pour l'instant une hypothèse relativement lourde qui ne semble pas nécessaire, si l'on veut bien constater que beaucoup d'organismes vivants, autres que l'homme, ont la capacité d'« entendre la forme d'un tambour » ou de voir des objets tridimensionnels.

A la recherche de contraintes

Mais comment résoudre pratiquement un problème mal posé en utilisant des contraintes ? Nous illustrerons ceci par un exemple très simple. Supposons que l'on dispose d'une série de mesures discrètes sur un mouvement articulaire particulier : par exemple, la position verticale de la mâchoire inférieure, telle qu'elle est donnée par un film radiographique, image par image. On veut calculer la vitesse de cet articulateur. Dans la mesure où l'on peut faire passer une infinité de courbes par les données brutes, le calcul de la vitesse est impossible : c'est bien un problème mal posé. Pour le résoudre, on peut introduire une contrainte simple, laquelle oblige une courbe lissée à s'ajuster au mieux à ces données, en minimisant sa distance à celles-ci, tout en minimisant sa propre courbure. Avec cette contrainte, convenablement estimée, la solution devient unique et le calcul de la vitesse possible.

Dans le cas de la vision ou dans celui de la parole, la résolution des problèmes inverses est généralement beaucoup plus complexe. Mais le principe reste le même. L'essentiel est de pouvoir identifier et formuler correctement les contraintes et les intégrer dans des algorithmes spécifiques. Nous citerons en exemple les succès remportés, dans le domaine de la restauration des images, par la méthode du *maximum d'entropie*.

En ce qui concerne la parole, de nombreuses études permettent d'envisager dès maintenant un avancement important dans la formulation de contraintes sur les mouvements articulatoires et sur les commandes motrices.

CNRS - AUDIOVISUEL

1, place André-Braun 91196 Mennecy Cedex

ARGOS ET L'ALBATROS

Pierre Jouventin, chercheur au CNRS (CEBAS), « voulait connaître les trajets et les distances parcourus par les grands albatros qui nichent aux îles Crozet (près des Kerguelen). Il les a donc équipés de balises Argos reliées à un satellite de navigation pour savoir à tout moment leur position. On peut ainsi reconstituer le trajet effectué (36 000 km en un mois) par ces albatros qui utilisent le vent au maximum, et mieux comprendre leur mode de vie.

Document : Pierre Jouventin
Réalisateur : Jean-François Dars et Anne Papillault
Production : CNRS Audiovisuel
5 minutes - 1999



► Le cas des voyelles nasales

Un cas difficile de l'inversion en parole reste celui des voyelles nasales comme *an, in, on*. On sait que pour produire de telles voyelles, le geste articulatoire est relativement simple : il suffit en principe d'abaisser le voile du palais, permettant ainsi au son de rayonner à la fois par le nez et par la bouche. Ceci donne cependant un produit acoustique extrêmement complexe : le spectre des voyelles nasales ne présente pas une série de résonances simples comme c'est le cas

pour les voyelles orales. Et pourtant, le résultat perceptif de ces voyelles est aussi simple que le geste qui les a produites : on identifiera aisément que le son est nasal. Ici donc, le rôle de l'inversion apparaît fondamental pour la reconnaissance de la parole.

D'autres exemples pourraient montrer que l'on peut ainsi « entendre » les gestes de la langue, comme ceux des lèvres, aussi bien que l'on peut percevoir les configurations du larynx. La recherche de contraintes n'en est, en parole, qu'à ses débuts : on vient tout juste de

se rendre compte que le problème était mal posé !

■ Christian Abry, maître de conférences à l'Université Stendhal, Institut de la communication parlée (URA 368 CNRS).

■ Gang Feng, maître de conférences à l'École nationale supérieure d'électronique et de radioélectricité, Institut national polytechnique de Grenoble, Institut de la communication parlée (URA 368 CNRS), BP 25 X, 38040 Grenoble Cedex.

Reconnaissance acoustique en sonar passif

L'utilisation conjointe de techniques de traitement du signal et d'intelligence artificielle apporte aux nouveaux sonars une fonction de reconnaissance des mobiles largement automatisée.

■ Christian Plumejeaud

L'un des problèmes à l'ordre du jour dans la conception des systèmes de veille et de surveillance du milieu sous-marin, c'est-à-dire des systèmes sonar, est celui de l'identification ou reconnaissance des mobiles détectés et trajectographiés. Ce problème est beaucoup plus complexe que les précédents en raison, en particulier, des connaissances très restreintes détenues par l'observateur sur les mobiles possibles, de leur grande variété, et de l'évolution de leurs caractéristiques dans le temps. La présence de ces mobiles se traduit par des bruits (rayonnés par les bâtiments) perturbés par le bruit ambiant sous-marin. L'ensemble des bruits rayonnés par un navire représente sa « signature acoustique », la reconnaissance acoustique s'appuie sur l'analyse de cette signature.

Acoustic recognition with passive sonar - New sonar must have an automatic recognition function of detected ships. It results in the joint use of signal processing and artificial intelligence techniques.

Le bruit rayonné par un bâtiment peut avoir des composantes de types variés : bruits impulsifs (d'une durée, lors de leur émission, de l'ordre de la seconde et moins), bruits continus (d'une durée de l'ordre de la dizaine de secondes et plus), périodiques ou non, ou encore large bande ou bande étroite, et bruits transitoires (transition entre deux phénomènes probablement continus).

Un système expert interprète le bruit

La reconnaissance d'une signature est basée sur l'interprétation des caractéristiques statiques et dynamiques des composantes de ce bruit rayonné ainsi que sur les relations existant entre ces composantes. Ces caractéristiques et relations sont analysées par des techniques élaborées de traitement du signal et leur interprétation est effectuée au moyen d'un système expert. Le contrôle de cette interprétation, par un opérateur, nécessite la mise en évidence visuelle ou auditive de ces éléments. Celle-ci résulte de l'utilisation d'une importante batterie d'algorithmes, essentiellement basée sur la production d'images temps/fréquence dans lesquelles les différentes composantes de la signature acoustique sont discernables. On développe ainsi

des algorithmes divers d'analyse temps-fréquence (Fourier court terme, Wigner-Ville, ondelettes...). Pour tous ces algorithmes, une paramétrisation spécifique doit être trouvée afin de mettre en exergue le phénomène particulier à détecter.

Pour atteindre l'objectif d'aide à l'opérateur, il faut ensuite extraire des images obtenues les données pertinentes et les qualifier. Les techniques de traitement d'image interviennent alors pour améliorer le contraste des indices acoustiques à extraire. Plus généralement, ce problème de reconnaissance acoustique intervient de manière très importante dans l'élaboration de l'interface homme-machine du sonar. Ainsi a été développée une maquette temps réel permettant de mesurer l'intérêt de l'ensemble de ces concepts pour l'opérateur.

■ Christian Plumejeaud, ingénieur au Groupe d'études et de recherche de détection sous-marine, chef du Laboratoire de reconnaissance acoustique des bruits sous-marins, Le Beuse, 83140 Six-Fours-les-Plages.



Editions du CNRS

Vient de paraître
**Téledétection
et Tiers-Monde**

Dir.: M. Pouyllau
1991 - 400p. - ill. 16x24
br. 300F

Diffusion: Presses du CNRS

Segmentation d'images

La segmentation extrait les éléments pertinents pour l'interprétation d'images. Il n'y a pas d'approche unique, la recherche actuelle s'oriente vers la coopération de méthodes.

Jean-Pierre Cocqueret

La segmentation d'une image consiste à créer une partition de cette dernière en éléments composés de points connexes. L'objectif est que les éléments de la partition coïncident avec des éléments pertinents de l'image appelés primitives qui doivent être exploitables pour les traitements postérieurs à la segmentation. Les primitives de base sont les régions (ensembles de points ayant des propriétés similaires) et les contours (zones de transition entre régions homogènes). Il existe des primitives plus élaborées comme les segments de droite et les angles. La segmentation est qualifiée de traitement bas-niveau pour au moins deux raisons : elle précède des traitements plus complexes, comme par exemple la reconnaissance des formes et l'interprétation de la scène observée, et les connaissances utilisées sont le plus souvent du domaine de l'image numérique, donc sémantiquement assez pauvres.

Il existe plusieurs techniques de segmentation plus ou moins bien adaptées à la nature de l'image (présence de bruit, contours flous, etc.), aux opérations situées en aval de la segmentation (reconnaissance de formes), aux primitives à extraire (contours et segments de droite, régions et taches, textures), et enfin aux contraintes d'exploitation de la méthode (complexité algorithmique et aspect temps réel, taille de l'espace mémoire de travail nécessaire en machine).

Malgré cette diversité, il est possible de distinguer trois grandes classes d'approche : l'approche « frontière » qui regroupe toutes les techniques d'extraction de contours, l'approche « régions » qui comprend toutes les méthodes d'extraction d'ensembles connexes de pixels ayant des propriétés communes,

et l'approche « rupture de modèle » dans laquelle on modélise les caractéristiques d'ensembles de pixels et dans laquelle on regroupe les points correspondant au même modèle.

Choisir la bonne méthode

Le problème est de choisir la bonne méthode avec le bon paramétrage ou de faire coopérer plusieurs méthodes. Par ailleurs, il apparaît de plus en plus que pour extraire certaines caractéristiques d'une scène, il est utile de disposer du maximum d'informations, donc de segmenter des images d'une même scène provenant de différents capteurs ou prises à des moments différents. Il convient alors de fusionner des données qui sont le résultat de plusieurs segmentations.

Les études menées actuellement en recherche concernent, d'une part, la mise en place de procédures d'évaluation pour les différentes méthodes de segmentation et, d'autre part, l'élaboration automatique ou faiblement interactive d'un descriptif d'images utilisable pour le choix d'une méthode ou de plusieurs méthodes de segmentation.

Par ailleurs, la segmentation peut être abordée comme un ensemble de processus coopérant sous les aspects suivants : utilisation conjointe de différentes techniques de segmentation sur une même image (coopération région-contour), application d'une même technique de segmentation sur des images semblables (stéréovision, séquence d'images), et mise en œuvre simultanée de techniques de segmentation appliquées sur des images d'une même scène fournies par des capteurs différents ou représentées à des échelles différentes (approche multi-échelle, ondelettes).

Dans ce cadre, le contrôle global de la segmentation de l'image est fondamental. Pour chaque type de coopération, les points suivants font l'objet d'études particulières : échanges entre processus de segmentation, fusion des données, et définition de critères de qualité et d'arrêt.

Jean-Pierre Cocqueret, professeur des universités, Equipe « Traitement des images et du signal », École nationale supérieure de l'électronique et de ses applications, impasse des Chênes pourpres, 95014 Cergy-Pontoise Cedex.

Image segmentation - Presentation of the features which are commonly used for pattern recognition and image analysis. There are many techniques for image segmentation. Yet, it is possible to distinguish different classes which are given. To date, research in this field uses the contribution of several methods.



Fig. 1

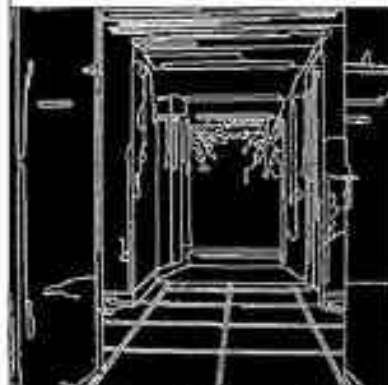


Fig. 2



Fig. 3

Une banque d'images de test pour la comparaison des différentes méthodes de segmentation a été constituée au sein du Groupement de recherche 134 du CNRS « Traitement du Signal et Images ». Sur l'une des images de cette banque, une segmentation par extraction de contours, fermeture et extraction de composantes connexes a été appliquée.

Fig. 1 - Image de test
Fig. 2 - Extraction des contours
Fig. 3 - Fermeture des contours et extraction des régions

De l'image animée à la mesure du mouvement

Scènes naturelles complexes, conditions d'éclairage variables, objets déformables : la détermination du contenu dynamique d'une image, le mouvement, doit appréhender une variété de situations toujours plus large.

Patrick Bouthemy,
Georges Tziritas

La visualisation de séquences d'images de sources diverses est désormais ancrée dans la vie quotidienne comme moyen d'investigation : séquences d'images satellitaires au bulletin météorologique du journal télévisé, séquences d'images échographiques chez le praticien en sont deux exemples frappants. L'étape suivante est d'ores et déjà atteinte dans des contextes de recherche ou même des contextes industriels : passer d'un simple affichage des images à une mesure automatique de leur contenu à caractère temporel, le mouvement. Des efforts de recherche importants dans la dernière décennie ont en effet conduit à l'élaboration d'un ensemble de méthodes de détection, de segmentation, d'estimation et d'identification du mouvement apparent.

Modéliser finement

De toute évidence, l'analyse du mouvement est un sujet difficile car confronté à deux problèmes majeurs qui sont la perte d'une dimension (passage d'une scène à trois dimensions à son observation ou image à deux dimensions) et l'imbrication de questions du type « l'œuf et la poule » : une mesure fiable et précise nécessitant de connaître les frontières des différentes zones en mouvement, une délimitation de celles-ci ne pouvant s'obtenir qu'au regard d'une information de mouvement non directement délivrée par le capteur.

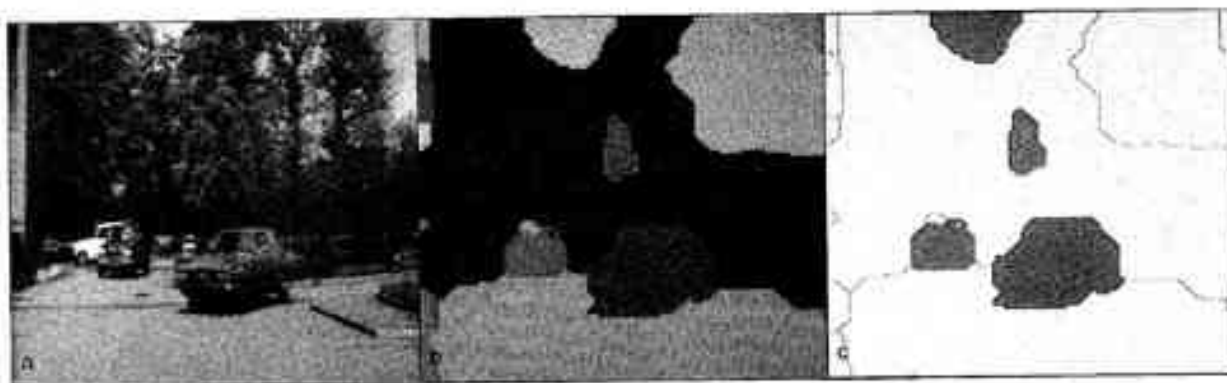
Le traitement de ces problèmes requiert donc une phase de modélisation relativement fine. Par ailleurs, la mesure obtenue peut être dense ou éparse selon que l'on s'appuie sur les variations spatio-temporelles de la fonction d'intensité lumineuse en chaque point ou que l'on considère l'appariement d'élé-

From image sequence to motion analysis - Motion analysis in an image sequence has become a subject of high interest in computer vision in the last decade. The number of application fields is also still growing. This topic is basically an ill-posed problem since data only partially constrain the solution. Moreover motion discontinuities and occlusions must be taken into account. Deterministic and statistical regularization techniques yield attractive frameworks to introduce the required contextual models.

ments distinctifs préalablement extraits des images.

Estimer le mouvement

L'estimation du mouvement est généralement un problème mal posé au sens où les données n'imposent que des contraintes partielles sur la solution. On fait alors appel à des techniques de régularisation, qu'elles soient déterministes ou statistiques (critères bayésiens et modèles markoviens). Celles-ci permettent d'exprimer les propriétés contextuelles attendues de la solution, c'est-à-dire essentiellement cohérence locale du mouvement (variations lentes) avec préservation des éventuelles discontinuités (frontières des différents mouvements présents dans l'image). Le schéma d'estimation quant à lui peut être itératif



Un objectif générique en analyse de scène dynamique est de repérer les objets mobiles dans la scène. Si la caméra est elle-même en mouvement, le problème est alors relativement complexe, car tout élément dans l'image possède alors un mouvement apparent. Nous l'illustrons par l'exemple suivant :

(a) - Deux voitures se déplacent dans ce parking, les arbres notamment au centre bougent au vent, enfin la caméra effectue un panoramique (donc, mouvements rigides et non rigides). Il est tout d'abord nécessaire de segmenter l'image en zones à mouvement apparent cohérent.

(b) - Une couleur est attribuée à chaque région (les modèles de mouvement sont linéaires et la méthode de résolution suit une approche statistique).

(c) - Une description symbolique du mouvement dans chaque zone est dérivée par un critère statistique. Avec la simple connaissance du type de mouvement imprimé à la caméra et sans mesures explicites 3D, les zones correspondant à des entités mobiles dans la scène sont alors reconnues (en bleu). (Cliché IRISA / INRIA Rennes).

(relaxation) ou récursif (filtre de Kalman par exemple).

Les enjeux actuels sont de plusieurs types. Il s'agit tout d'abord d'améliorer encore ces méthodes en robustesse et fiabilité pour appréhender une variété de situations toujours plus large : scènes naturelles très complexes, conditions d'éclairage quelconques et variables, objets déformables. D'un point de vue informatique, il faudra aboutir à des implantations assurant des temps de réponse réclamés par les applications et

supportés par des machines de faible dimensionnement. L'ensemble de ces progrès permettra d'élargir constamment la gamme d'applications où l'analyse du mouvement trouve naturellement sa place. Elle concerne déjà, bien sûr à des degrés différents de maturité, des sujets aussi variés que la transmission de la télévision haute définition ou de la vidéoconférence, l'établissement de cartes de champs de vent à partir de l'évolution de la couche nuageuse du globe, l'étude d'un organe comme le

cœur, la surveillance du trafic routier ou la navigation d'un robot mobile.

■ Patrick Bouthemy, directeur de recherche à l'INRIA, Institut de recherche en informatique et systèmes aléatoires (URA 227 CNRS), Campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex.

■ Georges Tziritas, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire des signaux et systèmes (UMR 14 CNRS), Ecole supérieure d'électricité, Plateau du Moulon, 91192 Gif-sur-Yvette Cedex.

Vision par ordinateur : comment interpréter les images

Pas d'interprétation d'image sans modélisation des objets du monde réel. Mais comment exprimer la connaissance de ces objets ? Comment passer d'une connaissance « inconsciente » inexprimable, à une connaissance consciente transmissible ?

■ Gérard Giraudon,
Monique Thonnat

La vision par ordinateur ou encore vision artificielle est une discipline scientifique en pleine expansion. A l'instar du système de perception visuelle chez l'homme, la vision artificielle prend en compte la totalité de la chaîne de traitements depuis l'acquisition de l'image jusqu'aux capacités cognitives du cerveau raisonnant sur des représentations des objets du monde physique.

Schématiquement, on peut considérer que la vision artificielle se décompose en trois niveaux d'abstraction diffé-

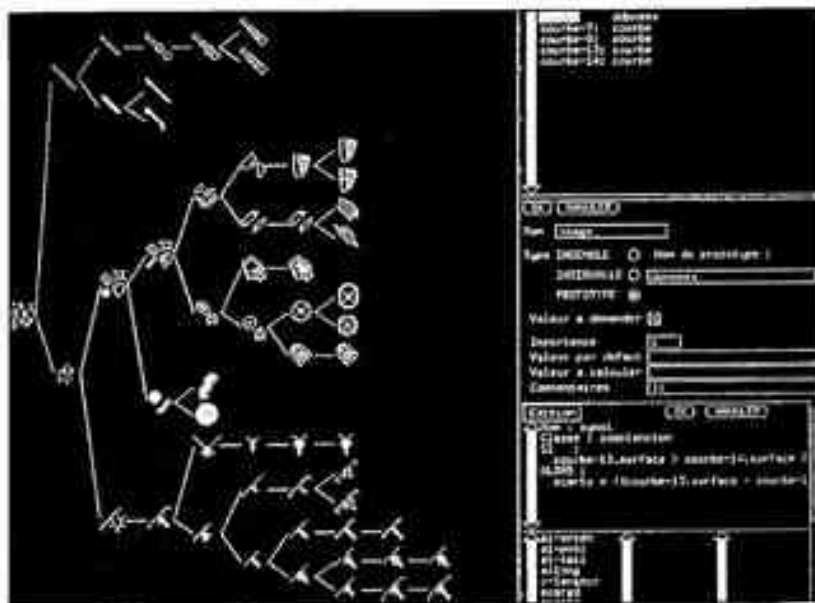
rente : le bas niveau ou vision préattentive où règne le numérique, le niveau intermédiaire ou segmentation d'image, et enfin le haut niveau ou encore analyse

de scène dont le but est l'identification et la localisation des objets qui composent la scène. Il s'agit non seulement de reconnaître les objets, c'est-à-dire les classer, mais aussi de les replacer dans leur contexte, ceci afin de « comprendre » la scène.

Deux types de connaissance

La mise en œuvre de tout processus lié à l'interprétation finale d'une scène suppose a priori la connaissance de modèles. Un modèle sert de référence. Il s'agit donc de mettre en correspondance des informations issues de l'image avec une description du modèle. Plus l'objet est abstrait ou générique, et plus est grande la difficulté de l'exprimer en des caractéristiques directement mesurables dans l'image. On peut alors consi-

The role of recognition in image interpretation - The problem of the interpretation in computer vision is discussed. The role and the nature of models for object recognition are explained. Two examples are presented: the first one deals with building recognition in aerial images; the second one describes an expert system for the classification of zooplankton.



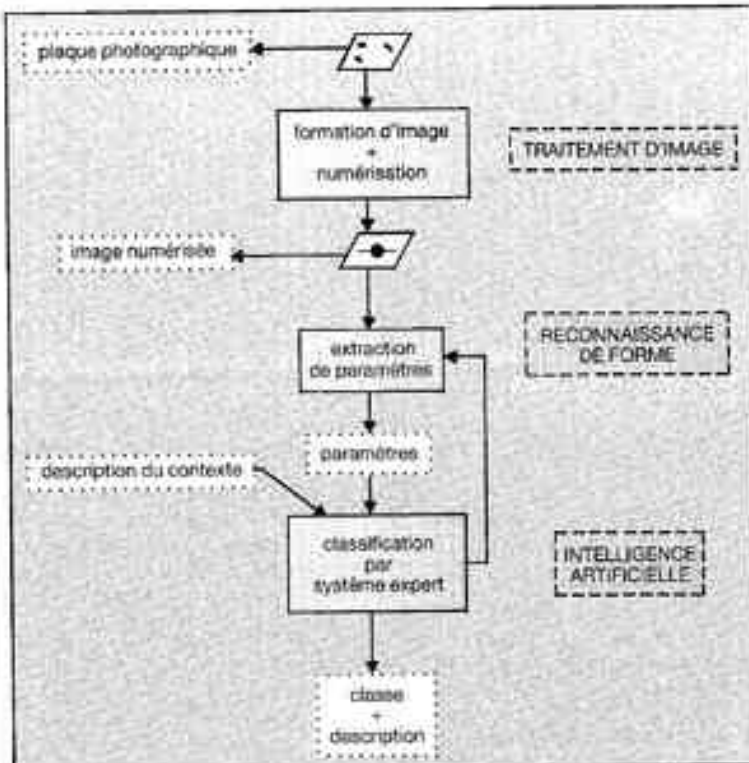
La hiérarchie des classes de zooplanctons.

Le système expert SYGAL

La reconnaissance automatique du type morphologique d'une galaxie à partir d'une image est particulièrement difficile. En effet, les galaxies sont des objets tridimensionnels dont les formes sont généralement anisotropes, et les instruments d'observation ne nous fournissent qu'une projection bidimensionnelle de ces objets.

Pourtant, les experts du domaine sont capables, à partir d'une image de bonne qualité (et des connaissances sur les conditions d'observation telles que le temps de pose ou la longueur d'onde), de déduire certaines caractéristiques morphologiques de la galaxie et le plus souvent sa classe. Le système expert SYGAL (construit à partir du moteur CLASIC) cherche à simuler le raisonnement d'un astronome lorsqu'il classe une image de galaxie. La figure montre le schéma général du système complet : une plaque photographique contenant une galaxie est numérisée, l'image ainsi formée est traitée par divers programmes de reconnaissance de formes ; les résultats de ces traitements sont en sortie 35 paramètres numériques qui décrivent la galaxie (surface, compacité, orientation...).

Ces paramètres, ainsi que des éléments décrivant le contexte d'obtention de l'image (type de télescope, temps de pose), sont four-



nis au système expert SYGAL.

Ce système expert utilise la connaissance sur les différentes classes et sous-classes de galaxies (implémentées sous forme d'une arborescence d'objets structurés). De

plus, le système utilise des critères de déduction pour passer des caractéristiques observées sur l'image à des entités morphologiques, implémentées sous forme de règles de production.

- dérer que le problème vient de la difficulté d'exprimer la connaissance que nous avons des objets qui nous entourent. En fait, on peut dire qu'il y a essentiellement deux types de connaissance liée à la vision :

- une connaissance « inconsciente » qui, de base, est celle du sens commun, que tout humain possède pour vivre dans le monde qui est le sien. La difficulté est ici très grande à faire exprimer un quelconque modèle à un individu pour ce qui concerne la plupart des objets qui l'entourent. Essayez d'imaginer le modèle d'un objet aussi banal qu'une table ;
- une connaissance « consciente ». Celle-ci est alors liée à une expertise acquise par un individu et qui peut normalement la transmettre ou du moins l'expliquer. Il s'agit alors d'un géologue qui « voit » des failles sur une image satellite, d'un médecin qui « voit » une tumeur sur une radio ou bien encore d'un zoologiste qui reconnaît instantanément un zooplancton. Encore existe-t-il un gouffre entre le géologue qui donnera sa

connaissance sous forme d'exemple et le zoologiste qui s'appuyera plus sur l'aspect morphologique du zooplancton.

Tenir compte du « point de vue »

Aujourd'hui, la modélisation des objets emprunte largement les outils de l'intelligence artificielle liés à la représentation des connaissances. Ainsi, on peut décrire des modèles comme différents « points de vue ».

Si la description géométrique et radiométrique est nécessaire, la connaissance liée au contexte dans lequel cet objet peut être vu, ou plus encore la fonction même de l'objet, ont une importance pour la compréhension de la scène. Les outils utilisés vont des simples règles de production au système à base de *blackboard* (système avec plusieurs sources de connaissance distribuées), en passant par des représentations à base de *frame* (objet structuré).

Prenons l'exemple de reconnaissance de bâtiments dans une image aérienne. Un bâtiment est une forme géométrique simple, de radiométrie claire, mais dont le contexte suppose l'existence d'une ombre. Un tel résultat, aussi banal pour l'œil humain, a nécessité l'utilisation d'un système à base de *blackboard* dans un environnement multispecialiste. Il peut s'avérer indispensable de définir des modèles symboliques d'un degré d'abstraction encore plus élevé. En effet, un même objet peut avoir des apparences très différentes (selon l'angle d'observation, ou pour des objets déformables selon leur attitude). La nécessité d'utiliser des modèles plus abstraits est particulièrement forte pour la reconnaissance d'organismes vivants.

L'application au vivant

Le cas de la reconnaissance de zooplanctons marins est un bon exemple (voir figure). Il existe une grande variabilité des formes à l'intérieur d'une

même classe (en fonction de l'âge, du sexe, de l'alimentation...). De plus, les formes des organismes de classes différentes peuvent être très proches, leur discrimination s'appuie alors sur des critères très subtils.

Le système expert que nous avons développé à partir du moteur CLASSIC s'appuie sur l'expertise consciente du domaine, c'est-à-dire, la taxonomie des classes et la description symbolique des caractéristiques de chaque classe. Par exemple, une méduse a une forte transparence, des structures centrales, une circularité importante, une ombrelle tourmentée...

Des algorithmes de traitement d'image décrivent l'image en termes de paramètres numériques : ces paramètres sont utilisés par des règles de production qui implémentent les critères de reconnaissance des caractéristiques symboliques décrivant chaque classe, par exemple :

- si $\text{elongation} < 1,3$, alors circularité importante ;
- si $\text{densité objet/fond} < 0,2$, alors transparence importante.

Une mise en correspondance de l'objet ainsi décrit avec les modèles des classes est réalisée en procédant par raffinements successifs. A chaque classe de la hiérarchie est associée une base de règles. Cette base est activée lorsque l'objet est compatible avec la classe correspondante. L'objet est ensuite comparé aux sous-classes jusqu'à ce que plus aucune règle n'apporte de nouvelle information. Si nécessaire, de nouveaux algorithmes spécialisés de traitement d'image sont appelés par des règles, en fonction d'un contexte particulier, pour fournir de nombreux paramètres numériques.

Une telle méthodologie s'est avérée bien adaptée à des domaines tels que l'astronomie (SYGAL : système expert pour la reconnaissance automatique du type morphologique d'une galaxie, voir encadré), l'ichtyologie (tri de poissons) où il existe une expertise consciente. Pour l'interprétation de scènes complexes ou robotiques (où l'expertise consciente est inexistante), il s'avère nécessaire de développer des processus d'auto-apprentissage. C'est un problème qui reste ouvert.

■ Gérard Giraudon, directeur de recherche à l'Institut national de recherche en informatique et en automatique.

■ Monique Thonnat, chargée de recherche à l'Institut national de recherche en informatique et en automatique, 2004, route des Lucioles, BP 109, 06561 Valbonne Cedex.

L'œil du robot

S'il disposait d'un modèle géométrique de son univers d'évolution et d'une image de luminance de la scène qu'il observe, un robot serait aujourd'hui à même de s'y localiser.

■ Marc Richetin,
Michel Dhome

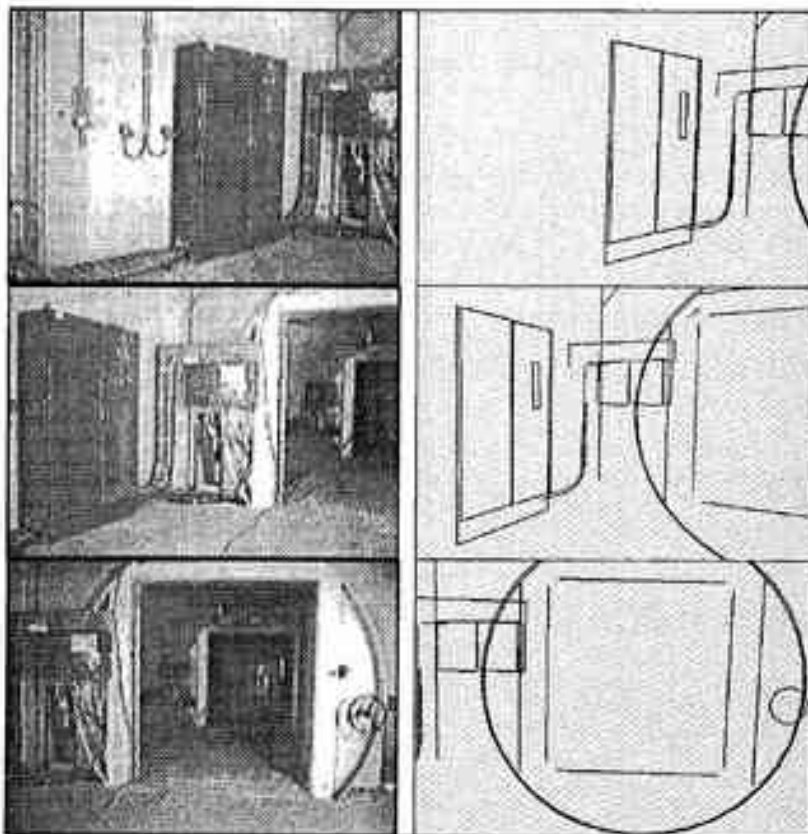
Les robots industriels ou domestiques du futur seront à coup sûr dotés d'un sens aigu de la vision. Les recherches les plus avancées visent à construire des programmes informatiques capables d'interpréter automatiquement les images délivrées par des caméras pour la modélisation par apprentissage, la reconnaissance ou la localisation des objets naturels ou artificiels.

La localisation par vision monoculaire, c'est-à-dire à partir d'une seule image, n'est réalisable qu'à la condition qu'un modèle physique et géométrique

des objets soit disponible au préalable. Le cas des objets transparents comme un verre de table est exclu pour l'instant, l'image qu'ils renvoient étant dépendante du contexte dans lequel ils se trouvent placés. Les caméras et les optiques utilisées produisent des images qui sont avec une bonne approximation des projections perspectives du monde visible tridimensionnel.

La typologie des objets ainsi localisables ne cesse de s'enrichir : les polyèdres, les objets de révolution, certains cylindres généralisés et même des montages ou des sites industriels dès lors qu'ils sont composés d'objets élémentaires localisables.

Localiser un objet, c'est trouver la position de son modèle dans l'espace, plus ▶



Localisation pour la navigation d'un robot dans les parages du sas d'entrée d'une centrale nucléaire : les images de la colonne gauche ont été obtenues à la suite du déplacement d'une caméra. Les figures de la colonne droite donnent à chaque étape la projection du modèle géométrique partiel, de type fil de fer, du sas d'entrée, une fois calculée l'attitude de ce modèle par analyse automatique de chacune des images de la séquence.

Robot's eye - Knowing a geometrical model of its surrounding world and a brightness image of the observed scene, a robot could nowadays find its location on its own. The automatic localization is obtained through the tri-dimensional interpretation of the projection of some geometrical features on the surface of the viewed objects. An application to the navigation of an autonomous mobile robot in the area of the airlock of an Electricité de France nuclear power plant is presented.

► précisément dans le repère de la caméra, de telle sorte que la projection perspective de ce modèle coïncide avec celle de l'image de l'objet.

Formellement, la transformation à trouver est donc une inversion non ambiguë de la projection de l'objet. Pour

ce faire, les mises en coïncidence portent sur des indices visuels géométriques remarquables: n-uplets de segments de droites, arcs de conique, points d'inflexion ou anguleux de courbes, pour l'instant.

Vers un robot mobile autonome

La tâche la plus complexe à réaliser, parce que de nature combinatoire, est la mise en correspondance de ces indices visuels et des lignes ou points associés sur la surface du modèle de l'objet à localiser. Elle est assimilable à une reconnaissance des formes qui doit faire appel à des traitements intelligents de l'information.

Lorsque la mise en correspondance exacte est achevée, la transformation inverse est obtenue par résolution soit directe, soit itérative, d'équations non linéaires.

Les temps de calcul ne sont pas encore compatibles avec les exigences des applications envisagées. A terme rapproché, lorsqu'on disposera de machines informatiques spécialisées, ces applications pourront concerner la préhension ou l'inspection automatique d'une pièce ou d'un assemblage de pièces par un robot manipulateur, ou la navigation d'un robot mobile autonome dans un site industriel (voir figure).

■ Marc Richetia, professeur à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, directeur du Laboratoire d'électronique (URA 830 CNRS).

■ Michel Dhome, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire d'électronique (URA 830 CNRS), Université Blaise Pascal, 24, avenue des Landais, 63177 Aubière Cedex.

Vision et robotique mobile

Comment permettre à un robot mobile de se reconnaître dans un environnement afin qu'il puisse y vaquer ? Il est nécessaire d'intégrer des outils géométriques, le mouvement du capteur, le filtrage de données mais aussi des outils d'intelligence artificielle permettant d'interpréter ces résultats intermédiaires.

■ James L. Crowley,
Roger Mohr

Répérer les boîtes qu'il va falloir diriger, se retrouver dans un dédale d'entrepôts pour livrer le colis à sa destination, voilà quelques tâches futuristes pour un robot autonome. Leur réalisation passe par la capacité du robot à percevoir son environnement et à l'interpréter. Forts de cette préoccu-

Vision and mobile robot - Vision is a natural method for a mobile robot to sense its environment. Results obtained in the vision community presently allows a robot to build a 3D representation from multiple views and to locate itself with respect to such a modeled universe. Interpretation goes above such a geometric model and requires tools from artificial intelligence; significant results in interpretation are yet to be achieved.

pation, des chercheurs ont travaillé à mettre au point des fonctions partielles de cet objectif ambitieux. En particulier, la vision du robot mobile est un des thèmes de recherche du projet national «communication homme-machine».

La dépendance des principales fonctions à réaliser rend l'étude difficile car :

- l'estimation de la position du robot passe par l'identification de points de repère;

- l'identification des objets présents demande une modélisation qui structure spatialement l'ensemble des indices visuels qui peuvent être perçus;

- la modélisation nécessite un apprentissage durant lequel sont fusionnés les différentes vues et leurs indices, cette fusion exigeant une estimation correcte du déplacement du robot entre chaque prise de vue.

La vision stéréoscopique

Si le modèle existe et est suffisamment simple, on peut se repérer à partir



Fig. 1 - Le robot mobile du LIFA équipé d'un couple de caméras pour la vision stéréoscopique.

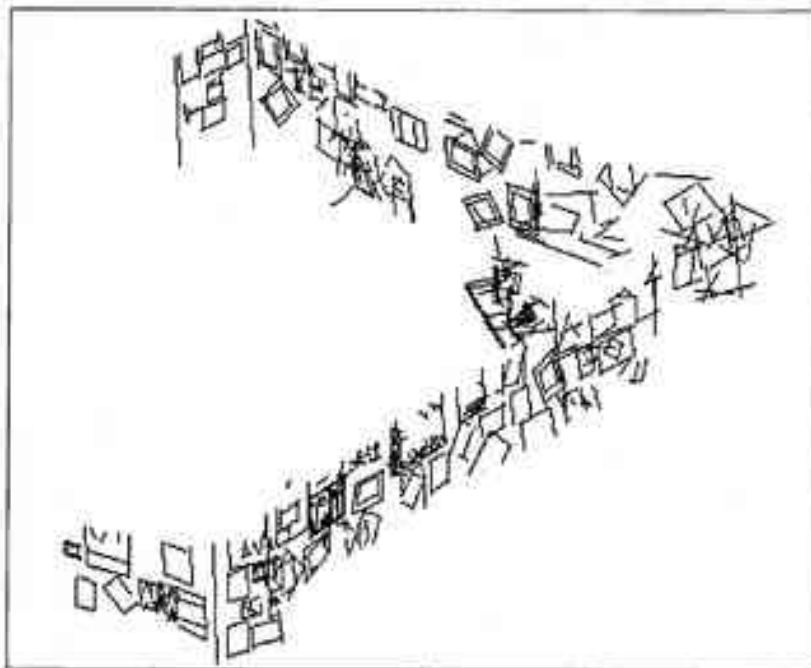


Fig. 2 - Après intégration de 40 vues stéréoscopiques, une vue illustrant le modèle géométrique de la pièce qui a été reconstruit (Résultats de Z. Zhang et O. Faugeras, INRIA, Sophia-Antipolis).

d'une seule image (voir l'article de M. Richetin et M. Dhôme). Si l'on doit opérer une modélisation géométrique, l'état actuel des techniques nécessite d'équiper le robot d'un système de prise de vue stéréoscopique (à deux ou trois caméras, voir figure 1) : la fusion des

deux ou trois images permet une reconstruction partielle de l'espace. Ces mesures sont cependant peu précises : en effet la résolution des images électroniques (quelques centaines de milliers de points) reste bien faible en regard de ce qu'offre l'œil ou le support photographi-

que. Donc, il sera nécessaire de conjuguer les différentes mesures prises lors d'un déplacement afin de filtrer les mesures et les affiner. La figure 2 offre une image de ce qui peut être obtenu à l'heure actuelle : on y voit la projection d'une pièce reconstituée à l'aide de 40 vues stéréoscopiques.

L'interprétation d'une scène passe par une identification des différents objets qui y sont présents. Sur des considérations purement géométriques, on est actuellement capable d'identifier des objets simples qui diffèrent peu d'un modèle rigide. En revanche, les objets définis moins précisément à l'aide de mesures ne peuvent pas être actuellement identifiés. Que l'on songe à ce que peut être une chaise sur le plan géométrique ! Les approches nécessaires pour ce faire doivent utiliser des raisonnements déductifs propres à l'intelligence artificielle. Il est nécessaire d'intégrer des informations relatives au contexte : selon leur environnement, deux surfaces géométriquement identiques pourront être vues par exemple comme un ballon ou un globe de lampe. Les techniques décrites dans l'article de G. Giraudon et M. Thomnat sont une voie possible.

James L. Crowley, professeur à l'Institut national polytechnique de Grenoble, Laboratoire d'informatique fondamentale et d'intelligence artificielle (URA 394 CNRS).

Roger Mohr, professeur à l'Institut national polytechnique de Grenoble, Laboratoire d'informatique fondamentale et d'intelligence artificielle (URA 394 CNRS), 46, rue Félix Viallet, 38031 Grenoble Cedex.

Le robot aux champs

Par temps couvert ou sous le soleil, le robot cueilleur doit reconnaître un fruit plus ou moins bien formé et à la coloration variable. Comment pourrait-il se passer de « vision » ?

Gilles Rabatel,
Pierre Baylou

L'automatisation intégrale de l'agriculture ne pourra s'achever que grâce à l'introduction de moyens robotisés permettant d'intervenir sur des objets biologiques eux-mêmes disposés dans un environnement biologique. La variété de formes et de couleurs, la dispersion de la position des

objets suggèrent que la vision par ordinateur est un moyen privilégié pour détecter et localiser ces objets en vue de fournir les informations nécessaires pour une intervention sélective.

Parmi les problèmes les plus étudiés actuellement figurent la traite des vaches et la récolte des fruits fragiles, ce dernier étant exemplaire des difficultés rencontrées par le concepteur.

Divers éléments contribuent à détec-

The agricultural robot - Automation of agricultural tasks can be achieved by the introduction of robots able to intervene on biological objects located in a biological environment. The wide range of colours and shapes, and the unpredictable position of objects to be handled imply that artificial vision can be suited to their detection and location. Attention is mainly focused on fragile fruit harvesting.

miner l'aspect d'une scène fruitière : les caractéristiques intrinsèques de ce type de scène (disposition spatiale et propriétés de réflexion des objets) mais aussi du type d'éclairage qui l'illumine. Ceci nous a conduits à élaborer un modèle permettant de décrire, en particulier, les



■ Prototype de robot de récolte « Magali 1 ».

► variations de l'apparence colorée du fruit en fonction des conditions météorologiques. En effet, le modèle révèle que l'apparence colorée des fruits se modifie selon que le temps est ensoleillé (éclairage direct monodirectionnel) ou qu'il est couvert (éclairage diffus); dans ce cas, la participation des rayons réfléchis sur les feuilles contribue à accentuer la composante verte des rayons provenant des fruits.

S'adapter aux conditions d'éclairage

Ces résultats ont été utilisés pour mettre en œuvre une approche de segmentation ponctuelle (c'est-à-dire indépendante du contexte de l'image) basée sur des critères polychromatiques, en prenant en compte la variabilité de l'éclairage dans des limites que la modélisation précédente a permis de préciser.

La minimisation du taux d'erreur d'étiquetage des pixels (en fruit/non-fruit) a permis de déterminer le capteur polychrome optimal qui tire le meilleur parti de la différence entre la réflectance des fruits et celle des autres objets composant la scène. Il a été démontré que l'utilisation de deux bandes spectrales (dont l'une dans le proche infrarouge et l'autre spécifique du fruit) apporte une solution bispectrale satisfaisante.

La segmentation ponctuelle issue du traitement précédent fournit une image binaire comportant des pixels mal éti-

quetés, mais aussi des blocs connexes représentant des images d'amas de fruits qu'il est nécessaire de diviser.

Des critères de taille (aire de blocs connexes) et de forme (ratio longueur/largeur, régularité du contour) permettent d'aboutir à la détermination de blocs de pixels représentatifs de fruits isolés.

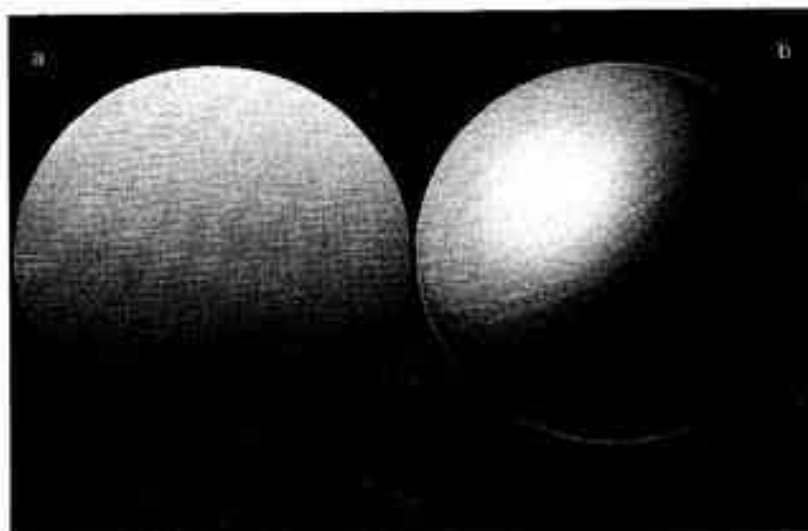
Les paramètres de segmentation sont

automatiquement ajustés lors d'une phase d'apprentissage au cours de laquelle on désigne au système des exemples de pixels appartenant à une région « fruit » et à une région « non-fruit » pour la prise en compte des variations d'aspect induites par les conditions météorologiques.

Les algorithmes de traitement ont été implantés sur des moyens de calcul bas de gamme qui rendent possible cependant la localisation d'un fruit en quelques dixièmes de seconde. Le capteur est composé de deux caméras miniatures dont l'une est équipée d'un filtre interférentiel à 950 nm. Il a permis de détecter correctement des pommes de couleur verte (Granny Smith) qui se caractérisent par un faible contraste colorimétrique par rapport au feuillage. Toutefois, en présence d'un ensoleillement intense, la dynamique des intensités d'éclairement perçue dans la scène nous a amenés à introduire des non-linéarités dans l'algorithme de segmentation polychrome et à ajouter un éclairage d'appoint pour illuminer, en particulier, les fruits ne percevant pas le rayonnement direct du soleil.

■ Gilles Rabatol, ingénieur de recherche au Centre national du machinisme agricole du génie rural des eaux et des forêts, Groupement de Montpellier, 361, rue J.F. Breton, BP 5095, 34033 Montpellier Cedex 1.

■ Pierre Baylou, maître de conférences à l'Ecole nationale supérieure d'électronique et de radioélectricité de Bordeaux, 351, cours de la Libération, 33405 Talence Cedex.



■ Modélisation de différentes situations d'éclairage sur un fruit sphérique : (a) éclairage diffus (ciel); (b) éclairage directionnel (soleil).

Le robot dans la mine

La robotisation de l'abattage sélectif dans les mines nécessite de doter les machines de capacités visuelles qui leur permettent d'agir sur un environnement évolutif.

Jean-José Orteu,
Maurice Briot

L'abattage sélectif dans les mines tient compte de la localisation de la minéralisation dans la section creusée. Si l'on veut robotiser les machines de creusement à attaque ponctuelle, il faut organiser l'abattage en fonction de cette information. Cette automatisation est intéressante à plusieurs titres : gage de qualité et productivité accrue, mais aussi amélioration de la sécurité et des conditions de travail.

C'est ainsi qu'un projet de recherche a été entrepris en vue d'automatiser l'abattage sélectif dans une mine de potasse située près de Barcelone en Espagne. Dans ce type d'exploitation on trouve de la sylvinite (minéral riche), du sel (stérile, c'est à dire économiquement inexploitable), et de la carnalite (roche dure utilisée pour un soutènement naturel).

Réaliser une « carte de la paroi »

Les moyens à mettre en œuvre pour assurer l'automatisation consistent à munir la machine des capteurs extéroceptifs adéquats et à utiliser les capacités de perception de la machine pour produire une « carte de la paroi » destinée à guider le module chargé de générer automatiquement la trajectoire de l'outil. La réalisation de cette carte passe par deux étapes : reconnaître la distribution



Fig. 1 - Machine ALPINE AM-100 en action.

du minéral sur le front de taille, traduire cette distribution en termes de coordonnées 3D afin de la localiser dans un repère lié à la machine.

La finalité du projet est de munir une machine de tous les capteurs, actionneurs, structure de contrôle et moyens informatiques embarqués nécessaires pour mener à bien l'abattage sélectif automatique (Fig. 1).

La détection de la minéralisation valorisable différant selon le type de minéral et de gisement, le point de départ a consisté en une investigation des interfaces minéral/stérile et des moyens de les détecter. C'est la vision par ordinateur qui s'est imposée comme la solution la plus prometteuse pour se substituer à la vision humaine afin de reconnaître la composition du front de taille à abattre. Les mineurs semblant utiliser notamment l'information colorimétrique (la sylvinite présente un aspect plus rouge que le sel qui est plutôt orange ou blanc, voir la figure 2), notre choix s'est porté sur une approche « segmentation d'image couleur ».

Segmenter et classer

Le problème peut être divisé en deux : un problème classique de segmentation où il s'agit de découper l'image en régions d'aspect visuel homogène ; un problème de classification, puisqu'il faut déterminer pour chacune de ces régions s'il s'agit de carnalite, de sylvinite ou de sel.

Le premier problème a trouvé une solution grâce à un algorithme de séparation-fusion basé sur des critères d'uniformité colorimétrique. La procédure d'identification est basée, quant à elle, sur les règles de décision obtenues lors d'une étape préliminaire d'analyse discriminante. Celle-ci exploite l'information apportée par un ensemble de proto-



Fig. 2 - Image brute du front de taille.



Fig. 3 - Résultat de la classification des régions obtenues par segmentation de l'image du front de taille.

types (apprentissage) pour déterminer les caractéristiques statistiques de chacune des classes en présence (trois dans notre application) et permet d'implanter une stratégie de classement optimal.

Pour fournir une « carte de la paroi » dans un repère lié à la machine d'abattage, il faut être en mesure d'identifier la relation existant entre un point d'une image et le point 3D du front de taille qui lui correspond. Ce problème a été résolu en définissant un modèle de caméra (du deuxième ordre puisqu'intégrant le phénomène de distorsion géométrique lié à l'utilisation d'objectifs grand-angle) et en calibrant les paramètres gouvernant la transformation entre un point 3D et le point image correspondant : paramètres du modèle de la caméra et position de celle-ci sur la machine.

Le front de taille ne pouvant être embrassé depuis un point de vue unique, nous avons dû prévoir deux caméras (chacune d'elles voyant une partie de la paroi) et reconstruire une image unique. Pour cela, nous avons utilisé la connaissance précise de la géométrie du système stéréoscopique fournie par le cali-

Computer vision applied to selective cutting in a potash mine. - Automation of mining operations involves the use of sensing, remote monitoring and control systems to confront a variety of situations and environmental conditions. In order to separate rich ore from waste at the cutting stage, the problems to be solved are those of modelling an uncontrolled, changing mine environment and programming the machine to cut a pattern accordingly. Color image segmentation, automatic image classification, camera calibration and 3D scene perception can cooperate to solve such a complex problem as selective cutting.

► brage pour concaténer les images après projection de celles-ci sur le front de taille, sans qu'aucun appariement entre primitives extraites dans chacune des images ne soit nécessaire.

Ce système est en cours d'installation sur une machine et des essais ont commencé afin de tester in situ la fiabilité

des logiciels et méthodes développées, et d'assurer les diverses mises au point nécessaires pour faire du système un véritable prototype industriel.

Travail réalisé dans le cadre d'une convention de recherche avec le CERCHAR devenu l'INERIS depuis le 01/01/91.

■ Jean-José Orteu, chercheur au Laboratoire d'automatique et d'analyse des systèmes (UPR 8001 CNRS).

■ Maurice Hriot, professeur à l'université Paul Sabatier, Laboratoire d'automatique et d'analyse des systèmes (UPR 8001 CNRS), 7, avenue du Colonel Roche, 31077 Toulouse Cedex.

De l'image à l'intervention chirurgicale

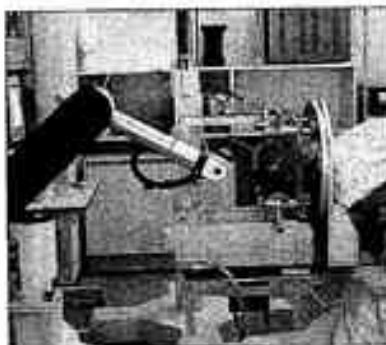
La modélisation d'images médicales diversement acquises permet d'aider un médecin ou un chirurgien à comprendre une pathologie, mais aussi à planifier et à réaliser une intervention avec précision et facilité.

■ Jacques Demongeot, Stéphane Lavallée, Philippe Cinquin

Le but du programme de recherche *Gestes médico-chirurgicaux assistés par ordinateur* est d'aider les médecins et les chirurgiens à planifier et à réaliser des interventions en traitant des images acquises avant et pendant l'intervention (images pré- et per-opératoires). La synthèse d'images réalistes en trois dimensions améliore la compréhension qualitative de la pathologie. Ces images 3D permettent également d'optimiser les trajectoires des outils chirurgicaux, ou de prévoir les conséquences du geste. Ceci impose une iden-



Choix de la trajectoire sur une image combinant représentation 3D de la peau et visualisation d'une coupe oblique. Cette image est synthétisée à partir de coupes IRM (imagerie par résonance magnétique), après modélisation continue du volume sur VAX.



Environ 200 interventions ont été réalisées à l'aide d'un système robotisé (DMD) permettant de positionner un guide linéaire en fonction d'images pré- et per-opératoires (biopsies de tumeurs, introductions d'électrodes pour supprimer le tremblement dans la maladie de Parkinson, curiethérapies interstitielles...).

ification des structures sur lesquelles porte le geste (segmentation d'images 3D) et nécessite la mise en correspondance d'images diverses qui ont chacune leur intérêt spécifique. Il est ensuite fondamental de conserver la précision avec laquelle a été définie la stratégie lors de la réalisation du geste lui-même. Des « systèmes de guidage » reliés à des capteurs permettent de retrouver les consignes de la stratégie dans un référentiel opératoire.

Ces principes ont été appliqués à la neurochirurgie stéréotaxique et, depuis mars 1989, un robot est utilisé en routine

Computer-assisted medical interventions - Modelling of medical images aims at improving the understanding of complex pathologies, but it also helps a surgeon to plan and perform precise interventions. Some of the main problems of this new field of research are the segmentation of 3D structures, the matching of multimodal images, the optimization of surgical strategies and the adaptation of robotics systems. The first clinical results are promising, for instance in the case of stereotactic neurosurgery.

clinique dans le service de Neurochirurgie du CHU de Grenoble pour positionner, en fonction d'images pré- et per-opératoires, un guide à travers lequel une sonde peut être introduite dans le cerveau des patients. De nombreux autres exemples sont à l'étude.

Ces systèmes de guidage ne remplaceront pas bien sûr le chirurgien ni le médecin. Ils constitueront une aide utilisable dans certaines phases particulièrement délicates, précises, dangereuses ou longues de l'intervention où ils permettront de gagner en facilité, en précision, en fiabilité et en temps.

Recherche partiellement financée par Digital.

■ Jacques Demongeot, professeur à l'Université Joseph Fourier, Groupement IMAG (GDR 921 CNRS), Laboratoire « Techniques de l'informatique, des mathématiques, de la microélectronique et de la microscopie quantitative » (USR 69 CNRS).

■ Stéphane Lavallée, chercheur contractuel au CNRS, Laboratoire « Techniques de l'informatique, des mathématiques, de la microélectronique et de la microscopie quantitative » (USR 69 CNRS).

■ Philippe Cinquin, professeur à l'Université Joseph Fourier, Laboratoire « Techniques de l'informatique, des mathématiques, de la microélectronique et de la microscopie quantitative » (USR 69 CNRS), Faculté de médecine de Grenoble, Domaine de la Merci, 38700 La Tronche.

Les irrégularités de la rotation terrestre

Le signal rotation de la Terre est la superposition de signatures géophysiques multiples. Comment les démêler ?

■ Martine Feissel,
Daniel Gambis

Si la Terre, soumise à l'action du couple luni-solaire, était un ellipsoïde homogène, les perturbations de sa rotation sidérale auraient un spectre, certes très riche, mais qui ne contiendrait que des termes dont les périodes sont prédites par la mécanique (plusieurs centaines). L'estimation de leur amplitude ne poserait pas de problème particulier à l'analyste, à condition toutefois de disposer de séries de mesures à la fois denses et longues, puisque les périodes s'échelonnent entre un jour et vingt ans. Mais la Terre a un noyau liquide, un manteau visqueux, une hydrosphère et une atmosphère parcourus de courants plus ou moins permanents, ayant des constantes de temps de la journée au siècle et plus. Par la vertu du principe de conservation du moment cinétique, toutes les variabilités d'origine géophysique viennent se superposer au signal d'origine astronomique dans les séries chronologiques.

L'explication géophysique des observations

Le signal rotation de la Terre présente ainsi un mélange inextricable d'irrégularités et de récurrences ; il s'agit donc de développer des méthodes qui puissent isoler avec exactitude les composantes attribuables aux différentes causes, pour remonter à l'explication géophysique. Précisons que l'on est ici dans le

domaine de l'explication des observations, alors que, pour les besoins de la navigation spatiale, il y a par ailleurs un besoin d'estimation et de prédiction, couvert par des filtres autorégressifs ou par le filtrage de Kalman, combinés éventuellement avec une décomposition spectrale approchée.

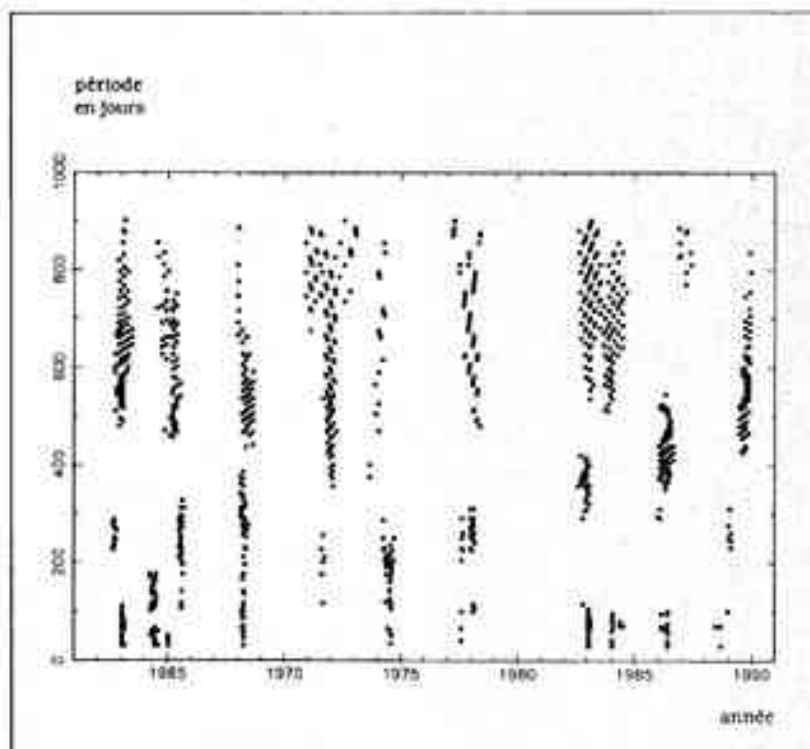
En ce qui concerne l'explication des observations, les méthodes fondées sur l'analyse harmonique (transformée de Fourier, maximum d'entropie, moindres carrés...), associées à des filtrages fréquentiels (numériques, splines...), même organisées en des séquences ad hoc, échouent à isoler les différents constituants du signal dans le détail de leur variabilité. La cause en est sans

doute que la fonction élémentaire sous-jacente, une sinusoïde, a bien peu d'affinité avec la réalité du signal à interpréter.

Pour aller plus loin, on a commencé à utiliser un filtrage dérivé du CENSUS-X11, décomposant le signal en catégories de variabilité plutôt qu'en bandes de fréquence. Par ailleurs, la méthode de résolution multifréquence, dans sa version d'analyse en ondelettes, repose sur une fonction élémentaire plus adaptée à notre signal ; son usage permet la mise en évidence de concomitances entre diverses plages de fréquence qui apportent un éclairage nouveau sur la variabilité de la rotation terrestre.

■ Martine Feissel, astronome à l'Observatoire de Paris, Unité « systèmes de référence spatio-temporels » (URA 1125 CNRS).

■ Daniel Gambis, astronome-adjoint à l'Observatoire de Paris, Unité « systèmes de référence spatio-temporels » (URA 1125 CNRS), 61, avenue de l'Observatoire, 75014 Paris.



Résultats de l'analyse de la transformation par ondelettes d'une série de la durée du jour sur l'intervalle 1962-1990 après désaisonnalisation par le filtrage CENSUS-X11. On remarque ainsi des plages de fréquences actives à certaines époques. Il semble que des relations non-linéaires puissent être mises en évidence entre les longues et les courtes périodes (1 000 jours d'une part, et 50-80 jours d'autre part).

The Earth rotation irregularities disentangled – The time series the parameters of which describe the irregularities of the Earth's rotation exhibit a mixture of signatures attributable to the core, mantle, hydrosphere and atmosphere of our planet. The various methods based on harmonic analysis and least squares fail to describe the detailed variability associated. Processing methods borrowed from econometrics and the recently developed wavelet analysis seem more appropriate.

Les oscillations de la surface du Soleil

Qu'est-ce qui fait vibrer le Soleil ? Les mécanismes du phénomène et la structure interne de l'astre peuvent se déduire de la mesure de la vitesse verticale des mouvements de surface.

■ Eric Fossat,
Gérard Grec,
Bernard Gelly,
François-Xavier Schmider

Il n'y a qu'un peu plus de dix ans que l'héliosismologie existe sous cette dénomination, après que l'on se soit rendu compte que le Soleil, secoué par la turbulence convective qui transporte l'énergie interne jusqu'à sa surface, peut entrer en résonance et vibrer suivant un très grand nombre de modes propres. Ce grand nombre (qui se chiffre en millions, tous harmoniques sphériques confondus), fournit une possibilité de diagnostic sismologique extrêmement riche, chacun de ces modes propres étant en fait « piégé » dans une cavité comprise entre la surface et une profondeur qui lui est spécifique.

La mesure se fait spectroscopique-

ment, utilisant l'effet Doppler engendré par les mouvements oscillatoires de la surface visible du Soleil. Les amplitudes vont de 20 cm/s au maximum jusqu'à moins de 1 cm/s au seuil de détectabilité actuel. La difficulté réelle n'est pas dans le rapport signal sur bruit, mais plutôt dans le temps d'intégration nécessaire.

Des problèmes de temps d'intégration

L'exploitation scientifique des mesures correspondantes en terme de structure interne nécessite de mesurer les paramètres de chacun de ces modes propres avec la plus grande précision possible. A titre d'exemple, les fréquences d'oscillation fournissent d'abord une information intégrale (le temps de parcours d'une onde sonore dans sa cavité résonante), mais aussi et surtout des informations différentielles (petites différences entre des intégrales voisines

Solar surface oscillations - The Sun, shaken by the turbulent convective layers located beneath its surface, can vibrate following a very large number of individual eigenmodes. Time series of the quasi-vertical oscillatory motion of the solar surface are produced with maximum possible continuity over weeks or even months. Each acoustic solar eigenmode produces a peak in the Fourier spectrum, which has to be deconvolved from the temporal window function and then analyzed in different parameters providing some information on the physics and the internal solar structure.

qui diffèrent essentiellement par la situation de leur limite inférieure). Pour être quantitativement exploitables au niveau de connaissance du « modèle » solaire (disons un pour cent), il faut donc que ces différences de fréquences, qui sont de l'ordre de quelques millièmes, soient mesurées à mieux que un pour cent. Les fréquences individuelles doivent donc être estimées à 10^{-5} près.

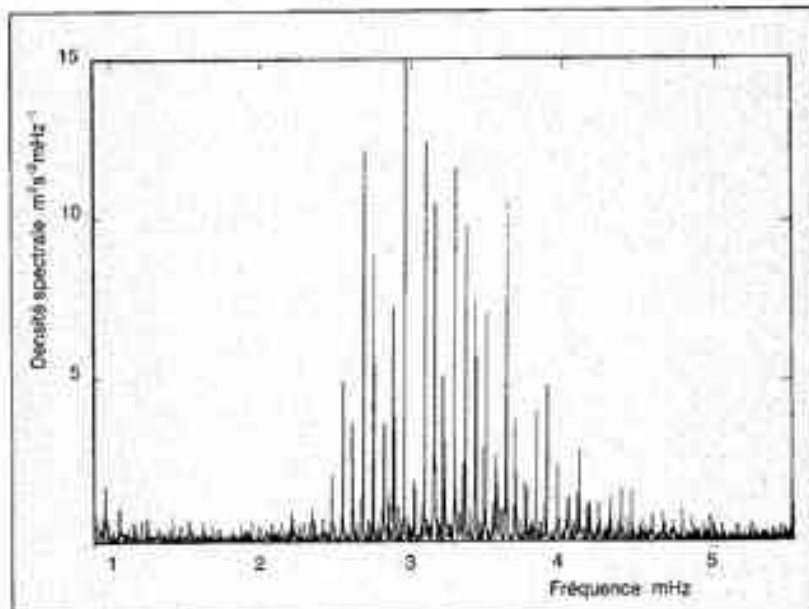


Fig. 1 - Spectre acoustique du Soleil, montrant la présence d'environ 80 fréquences propres dans une bande comprise entre 2 et 5 mHz, correspondant à des périodes de 3 à 8 minutes. Les amplitudes individuelles, mesurées en effet Doppler, vont de 2 à 20 cm/s, ce qui correspond à des « vagues » à la surface du soleil de quelques mètres de hauteur.

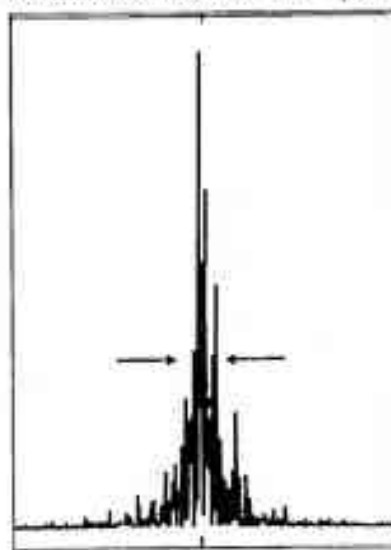


Fig. 2 - Examiné de plus près, un pic quelconque du spectre acoustique de la figure 1 montre une largeur naturelle de l'ordre de 1 microHz, correspondant à une durée de vie de la phase de l'ordre de 3 jours. Le profil théorique simulé ici est une courbe de Lorentz, mais le nombre de « tranches temporelles » à phases indépendantes qui peut être analysé est insuffisant pour moyenniser les effets visibles d'interférence, qu'il ne faut pas confondre avec du bruit. Des méthodes spécifiques doivent être utilisées pour extraire le plus précisément possible les paramètres de cette Lorentzienne.

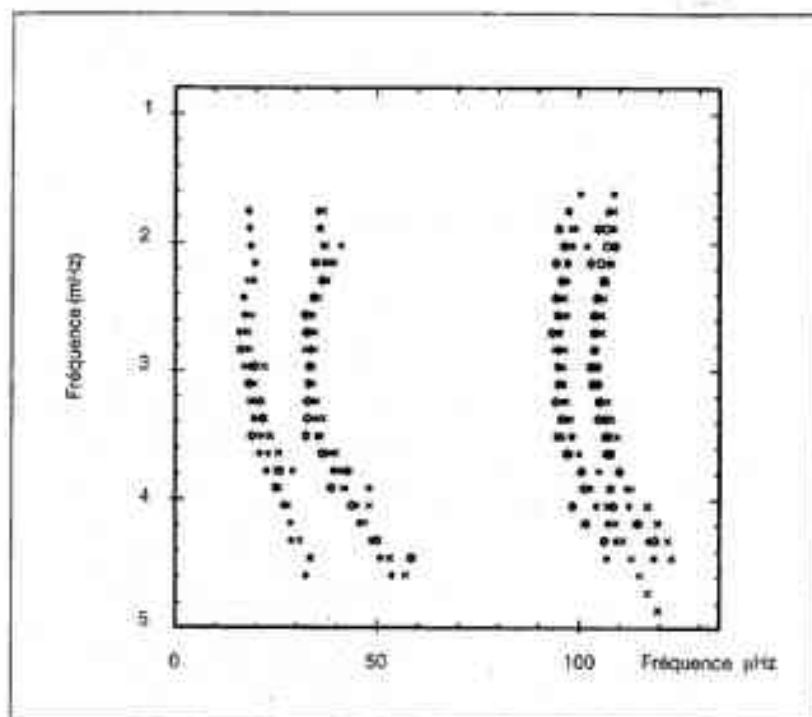


Fig. 3 - Les fréquences des modes propres visibles sur la figure 1 sont assez bien représentées par un développement asymptotique qui les alignerait verticalement sur ce diagramme-échelle, où elles figurent sur des lignes horizontales consécutives, modulo un écart (136 μHz) qui est la fréquence du son fondamental, lui-même absent du spectre. Les écarts à la verticalité sont prédits par le terme suivant du développement asymptotique, et permettent d'extraire des paramètres ayant une signification physique et reliés à la structure du cœur thermonucléaire du Soleil.

L'outil mathématique est évidemment la transformation de Fourier d'un signal temporel à une dimension, ou toujours ramené à une dimension. La signature d'un mode propre est alors un pic, dont la fréquence, la hauteur, la largeur, le profil et la décomposition en multiplets par la rotation sont autant de paramètres qui contiennent de l'information sur la physique du milieu.

Ce discours a besoin d'être illustré de quelques chiffres. Tous les modes propres de vibration du Soleil détectés jusqu'à présent ont des périodes voisines de cinq minutes (Fig. 1). Les battements entre modes propres voisins qui participent au signal mesuré se chiffrent alors en heures et en jours, et on voit apparaître le problème du temps d'intégration (il faut en général huit une fois par jour un peu partout). Pour obtenir une précision relative de 10^{-2} sur une mesure de fréquence, il semblerait qu'un temps d'intégration de cent mille fois cinq minutes (soit un an environ) soit nécessaire et sans doute suffisant. Malheureusement il n'en est rien, car ces modes propres ont des temps caractéristiques d'excitation et d'amortissement de quelques jours. Les pics correspondants

dans une transformée de Fourier ont donc une certaine largeur naturelle, et la précision possible sur la mesure d'une fréquence ne croît alors qu'avec la racine carrée du temps d'intégration au-delà de ces quelques jours; en effet, une réalisation mesurée ne contient qu'un nombre fini d'oscillations amorties, de phases indépendantes, qui interfèrent aléatoirement (Fig. 2).

En outre, ces pics sont déformés par les effets de la fenêtre d'observation temporelle. Il n'est en effet pas possible, sauf dans l'espace, d'obtenir des données d'observation totalement continues sur de telles durées. Bien que tous les projets actuels d'héliosismologie tendent vers ce but, il faut composer avec ce que l'on possède, et déconvoluer le plus efficacement possible les effets de fenêtre. Une déconvolution linéaire simple est efficace tant que le coefficient de remplissage temporel ne tombe pas trop en dessous de 75 pour cent.

Il faut encore savoir que dans la décomposition en multiplets par la rotation, la séparation entre les composantes individuelles d'un multiplet est un peu inférieure à la largeur naturelle produite par les phénomènes d'amortisse-

ment. Les pics se chevauchent alors, ils ne sont donc plus résolus et il devient très difficile de mesurer chaque fréquence individuelle.

Les données fournies par IRIS

Les mesures effectuées au moyen de l'instrument IRIS, développé dans notre équipe, utilisent le Soleil « comme une étoile », sans imagerie. Un réseau de huit stations de mesure complémentaires en longitude et en latitude est en cours d'installation, afin d'obtenir des données contenant un minimum d'interruptions. Environ quatre-vingt modes propres sont accessibles, les trois quarts d'entre eux étant décomposés en multiplets de deux, trois ou quatre composants.

Une approximation importante pour la compréhension de la physique consiste en un traitement asymptotique de ces modes propres (asymptotique au sens d'un grand nombre de nœuds radiaux comparé au nombre de lignes de nœuds en surface). Cette approximation asymptotique est bien décrite par une représentation des fréquences mesurées sur un diagramme-échelle (Fig. 3), qui fait apparaître la quasi-équidistance d'harmoniques radiaux successifs comme des lignes quasi-verticales. Moyennant des hypothèses de régularité du modèle, ce diagramme peut permettre d'améliorer statistiquement les comparaisons entre fréquences mesurées et calculées.

L'évolution de tous les paramètres avec le cycle d'activité du Soleil va probablement permettre, dans un avenir proche, de localiser la profondeur des mécanismes générateurs du champ magnétique cyclique.

Eric Fosser, astronome à l'Observatoire de Nice-Côte d'Azur, Département d'astrophysique de l'Institut de mathématiques et de sciences physiques (URA 709 CNRS)

Gérard Grec, chargé de recherche au CNRS, Département d'astrophysique de l'Institut de mathématiques et de sciences physiques (URA 709 CNRS)

Bernard Gelly, chargé de recherche au CNRS, Département d'astrophysique de l'Institut de mathématiques et de sciences physiques (URA 709 CNRS), Université de Nice-Sophia Antipolis, Parc Valrose, 06104 Nice Cedex

François-Xavier Schmider, chercheur, Instituto de Astrofísica de Canarias, La Laguna, Tenerife, Espagne

La morphologie des granules solaires

La granulation solaire est-elle un phénomène turbulent ? La dimension fractale des éléments qui la composent permet d'en décider.

Thierry Roudier

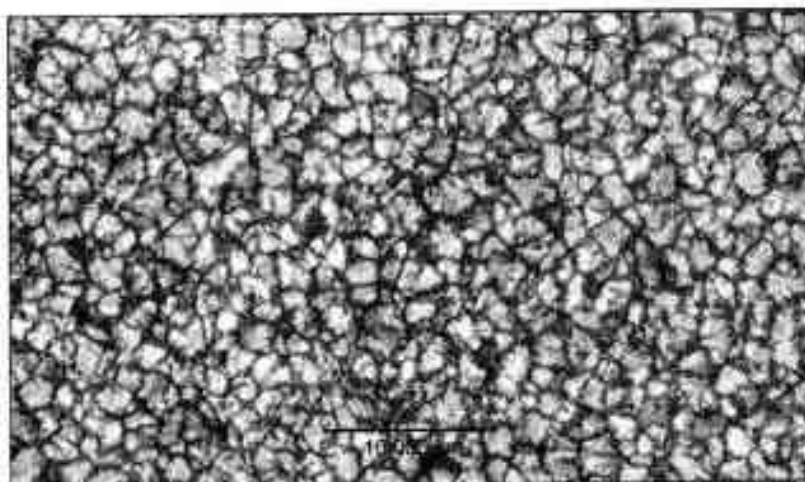


Fig. 1 - Champ de granulation solaire. Les granules moyens ont une dimension d'environ 1 000 km, une durée de vie de 8 minutes et une vitesse ascendante de 3 600 km/h.

L'étude de la zone convective du Soleil est devenue un des sujets majeurs de la physique solaire aux nombreuses implications dans d'autres domaines astrophysiques comme la cosmologie, depuis que le Soleil permet de tester les théories de convection turbulente. Les conditions physiques présentes dans cette couche diffèrent essentiellement des conditions de laboratoire par les effets non-Boussinesq très marqués (la longueur d'échelle de la convection est probablement déterminée par l'échelle de hauteur, plutôt

Solar granulation - The solar photosphere shows a granular pattern in which elements evolve continuously in shape and size. In order to test the turbulent origin of this granulation, we compute the fractal dimension of its components. In addition, this morphological analysis allows the identification of the hierarchical organization of the convective cells.

que par la profondeur de la région instable) et par le fait que la zone de convection supérieure est recouverte par une région stratifiée.

La photosphère, mince couche d'où nous provient le rayonnement visible du Soleil, présente une structure granulaire dont les éléments, d'une durée de vie moyenne de 10 minutes, évoluent continuellement en forme et en dimension (Fig. 1). Ces granules solaires sont généralement identifiés comme étant la manifestation de la pénétration des éléments convectifs dans les couches stratifiées supérieures. Cependant, la détermination des nombres de Reynolds et Prandtl de cette couche indique des valeurs qui sont typiques de la convection turbulente.

Utiliser la dimension fractale

Parmi les différentes possibilités permettant de tester si la granulation solaire est un phénomène turbulent (par exemple, l'analyse du spectre de puissance des champs de vitesse), une méthode consiste à étudier la dimension fractale des structures la composant. Cette dimension fractale est déduite de l'analyse des formes des granules par la relation entre l'aire (A) et le périmètre (P), $P \sim A^{D/2}$, où D est la dimension fractale.

Pour les formes « douces » (cercle, carré...), cette dimension vaut 1 et tend vers 2 lorsque le périmètre devient irrégulier.

L'extraction des paramètres structuraux (A , P , moments) des granules du

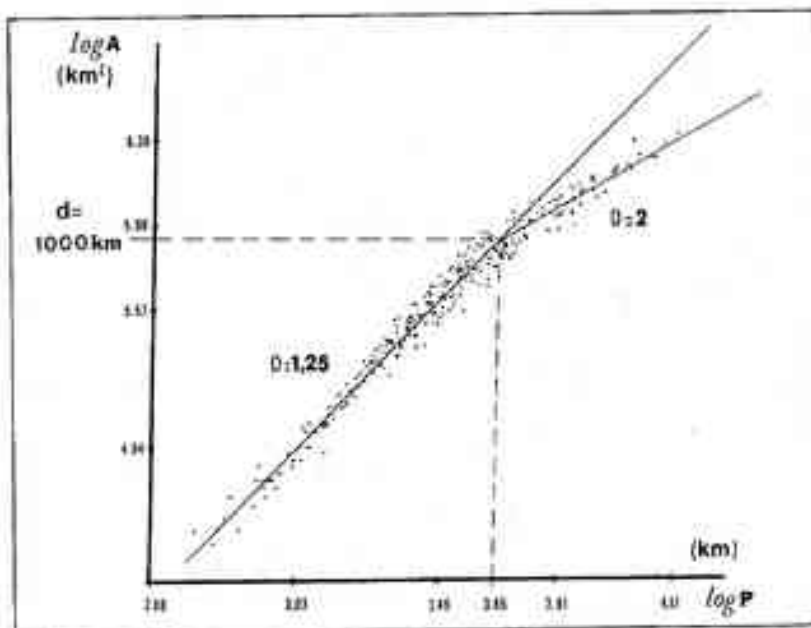


Fig. 2 - Relation aire - périmètre de la granulation solaire; chaque point représente un granule.

champ chaotique d'intensité consiste en un filtrage numérique simulant le procédé photographique « masque flou », suivi d'une segmentation. La relation entre $\log A$ et $\log P$ représentée sur la figure 2 est linéaire, elle indique la self-similarité des granules solaires et la nature fractale de ces objets. La dimension fractale D déduite de cette relation pour les granules dont le diamètre est inférieur à 1 000 km, $D = 1,25$, est en bon accord avec la valeur postulée de $D = 4/3$ pour la turbulence (isobar) homogène et isotrope. La taille critique (diamètre = 1 000 km) séparant les deux régimes des granules solaires correspond à la taille de fragmentation des éléments convectifs. L'organisation spatiale de chacun de ces types de granules fait apparaître

des cellules d'ordres supérieurs qui sont liées à des éléments convectifs connus : les mésogranules (~ 5 à 6 000 km). Ainsi l'analyse morphologique des granules solaires permet d'envisager la nature turbulente des plus petits éléments, mais aussi d'identifier l'organisation hiérarchique des cellules convectives.

Thierry Roudier, chargé de recherche au CNRS, Unité « Pic du Midi » (URA 1281 CNRS), Observatoire Midi-Pyrénées, 14, avenue Edmond Belin, 31400 Toulouse.

CNRS - AUDIOVISUEL

1, place Aristide-Briard 92185 Meudon Cedex

LE TROU D'OZONE SUR L'ANTARCTIQUE EN 1987

Sur des images « satellite » de la NASA, observation des variations d'épaisseur de la couche d'ozone atmosphérique au pôle sud d'août à décembre 1987, grâce à un retournement en fausses couleurs.

Image : NASA
Mark R. Schoeberl et Arlin Krueger
Commentaire : Claude Faure
et Gérard Mégie
Production : CNRS Audiovisuel
7 minutes - 1989

L'activité solaire sous analyse

La compréhension du Soleil passe par l'étude précise des champs de vitesse observables à sa surface. A cet égard, les méthodes de traitement d'images appliquées aux taches et aux filaments sont des plus fructueuses.

Elisabeth Ribes,
Pierre Mein

Les spectrohéliogrammes sont des images monochromatiques du Soleil, sensibles à différents paramètres thermodynamiques de l'atmosphère solaire. Ils révèlent l'existence de structures variées (taches, facules brillantes, filaments sombres), toutes gouvernées par le champ magnétique et implantées dans un milieu fortement turbulent. Ces structures sont donc soumises à des déformations, compliquées

Analysis of solar activity from spectroheliograms - Daily spectroheliograms have been collected for over almost a century at the Observatoire de Paris. These exhibit various magnetic structures, sunspots, faculae, filaments, network which are all governed by the underlying turbulent fluid. Here, we report on some examples of image-processing techniques and pattern recognition to isolate and track the various magnetic features with the aim of detecting velocity fields at the surface with an unequalled accuracy.

par les mouvements de rotation de l'astre et les phénomènes de convection.

Le mécanisme dynamo en usage repose sur l'interaction de la rotation différentielle et d'un mode convectif à grande échelle. Si la rotation de surface est assez bien connue, la convection globale, telle qu'elle a été prédite, n'a jamais été détectée. Nous avons donc fait usage de la collection de Meudon, qui porte sur près d'un siècle, pour étudier le mouvement des taches, pôles magnétiques des petits aimants qui apparaissent en surface avec une période de onze ans.

L'idée physique sous-jacente est d'utiliser la propriété du champ magnétique solaire d'être gelé dans le plasma convectif, de sorte que tout mouvement de surface des taches reflète la dynamique interne à la zone convective. Les mouvements convectifs prédits étant de faible magnitude (quelques dizaines de m/s), une numérisation des images permet la détermination des structures avec une précision comparable au signal recherché. Dans un premier temps, la position des taches, objets approximativement circulaires, a été déterminée par son barycentre défini avec des seuils d'intensité variable, permettant de distinguer la structure fine des taches. Grâce

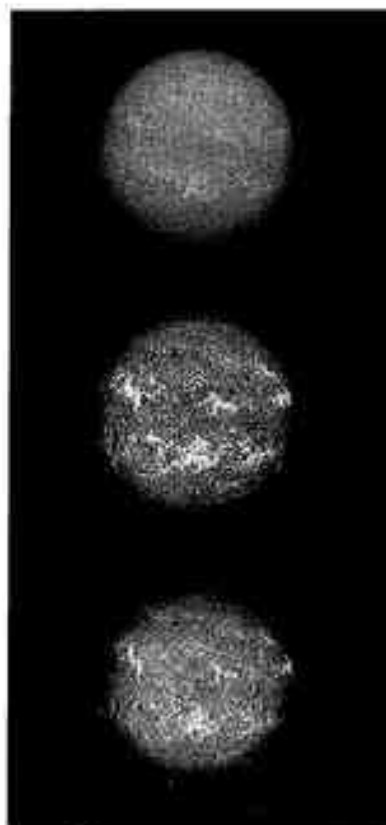


Fig. 1 - Spectrohéliogrammes obtenus à l'Observatoire de Paris, à Meudon, dans l'aile violette, puis au centre de la raie du calcium ionisé (393,3 nm), et au centre de la raie de l'hydrogène (656,3 nm), H_{α} . Toutes ces structures magnétiques observées dans l'atmosphère solaire sont gouvernées par le fluide convectif turbulent interne.

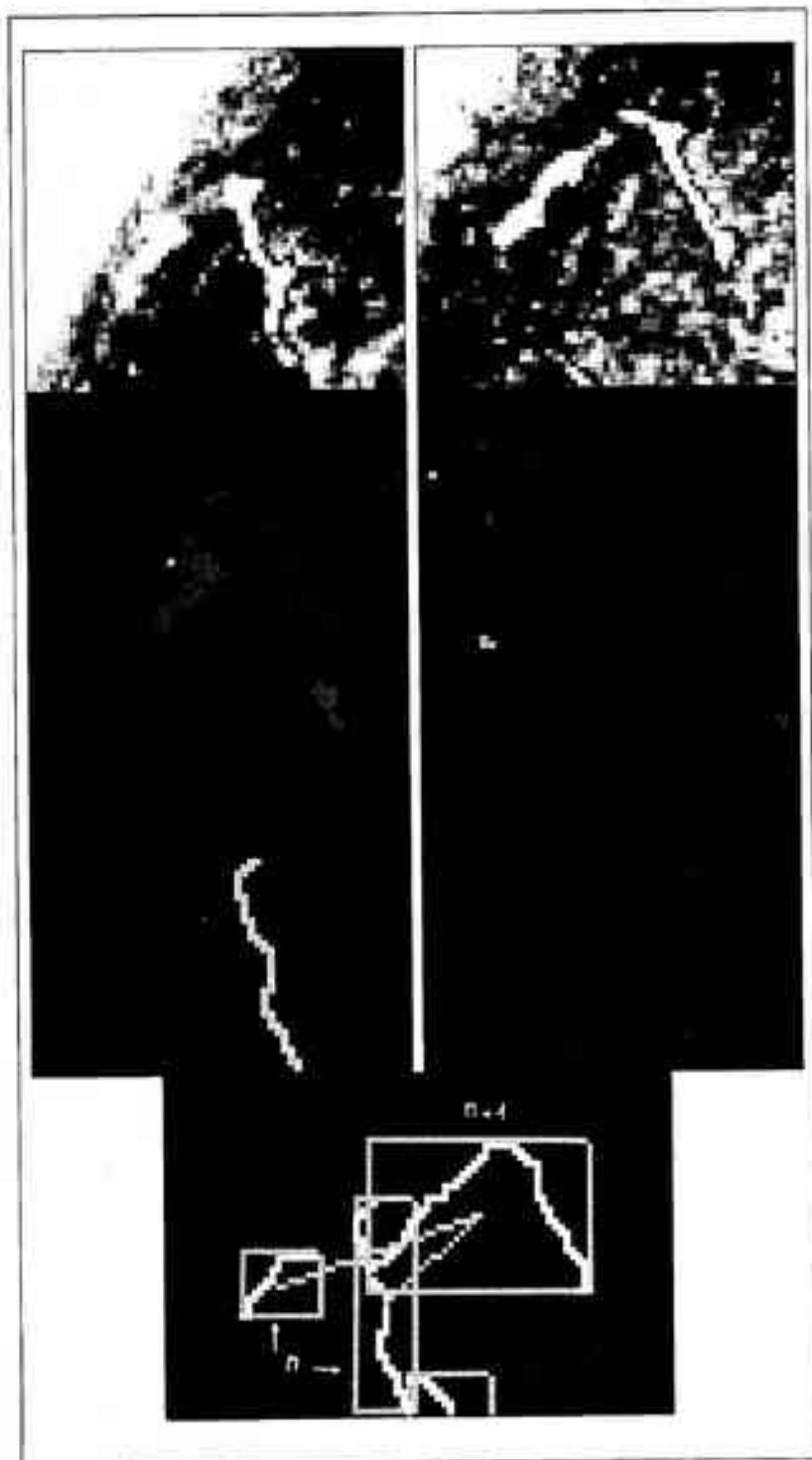


Fig. 2 - Traitements d'image et programmes de reconnaissance de forme appliqués aux spectrohéliogrammes H_{α} de la raie de l'hydrogène. La poursuite se fait en plusieurs étapes : à partir du cliché numérisé (450x450 pixels) où les filaments apparaissent en blanc, viennent l'isolement des structures, puis l'association des structures d'un jour à l'autre, la détermination de la ligne médiane du squelette pour la mise en correspondance finale. (Traitement numérique développé au service CREA/SP de l'Etablissement Technique Central de l'Armement, à Arcueil, par Bertrand Collin).

ce à cette technique, une circulation à grande échelle, en forme de rouleaux parallèles à l'équateur, a été mise en évidence sous la surface solaire.

Comme pour la reconnaissance de la parole

Au contraire des taches et des facules brillantes qui sont le siège de champs magnétiques localisés et intenses, les filaments servent de frontière aux structures magnétiques à grande échelle. Il importe de savoir comment ils se situent par rapport aux rouleaux convectifs. Les filaments sont des objets filiformes, qui se cassent, se ressoudent, disparaissent puis réapparaissent. Leur analyse comporte trois phases : l'isolement de la structure, l'association du filament d'une image à l'autre, et la mise en correspondance des deux objets pour pouvoir en déterminer le mouvement.

L'extraction des structures se fait au moyen de filtres de traitement d'images. Par cascades de filtres, on isole les objets du reste de l'image. Les deux autres phases concernent la poursuite des structures et leur association. La méthode utilisée est empruntée aux techniques de reconnaissance de la parole : le filament le plus court est identifié à un mot, alors que le filament le plus long est identifié à une phrase. Le problème de la correspondance consiste à replacer le mot dans la phrase, au moindre coût.

Cette programmation dite « dynamique » trouve son analogie dans l'expérience du voyageur de commerce qui doit effectuer un parcours optimal pour passer par un nombre N de villes dans un temps limité.

Le profil de la rotation du Soleil reconstitué

Les résultats obtenus sont très performants et vont nous permettre de reconstituer le profil de rotation de surface avec une précision inégalée. Comme le cycle magnétique solaire est un jeu subtil entre la rotation et la convection, on peut détecter des ruptures d'équilibre préfigurant les émergences d'activité et phénomènes éruptifs associés, avec les conséquences que l'on connaît sur l'ionosphère, la magnétosphère, et probablement sur l'atmosphère terrestre.

■ Elisabeth Ribes, directeur de recherche au CNRS, Observatoire de Paris, Laboratoire de physique solaire (URA 326 CNRS).

■ Pierre Mein, astronome à l'Observatoire de Paris, Laboratoire de physique solaire (URA 326 CNRS), 5, place Jussieu, 92195 Meudon Cedex.

Circuits et systèmes de reconnaissance vocale

De vingt mots isolés prononcés par un seul locuteur, à un millier de mots en parole continue par un locuteur quelconque, la reconnaissance vocale a fait des progrès en vingt ans. Le problème n'est pourtant pas encore résolu dans sa globalité.

■ Joseph-Jean Mariani,
Christian Gagnoulet

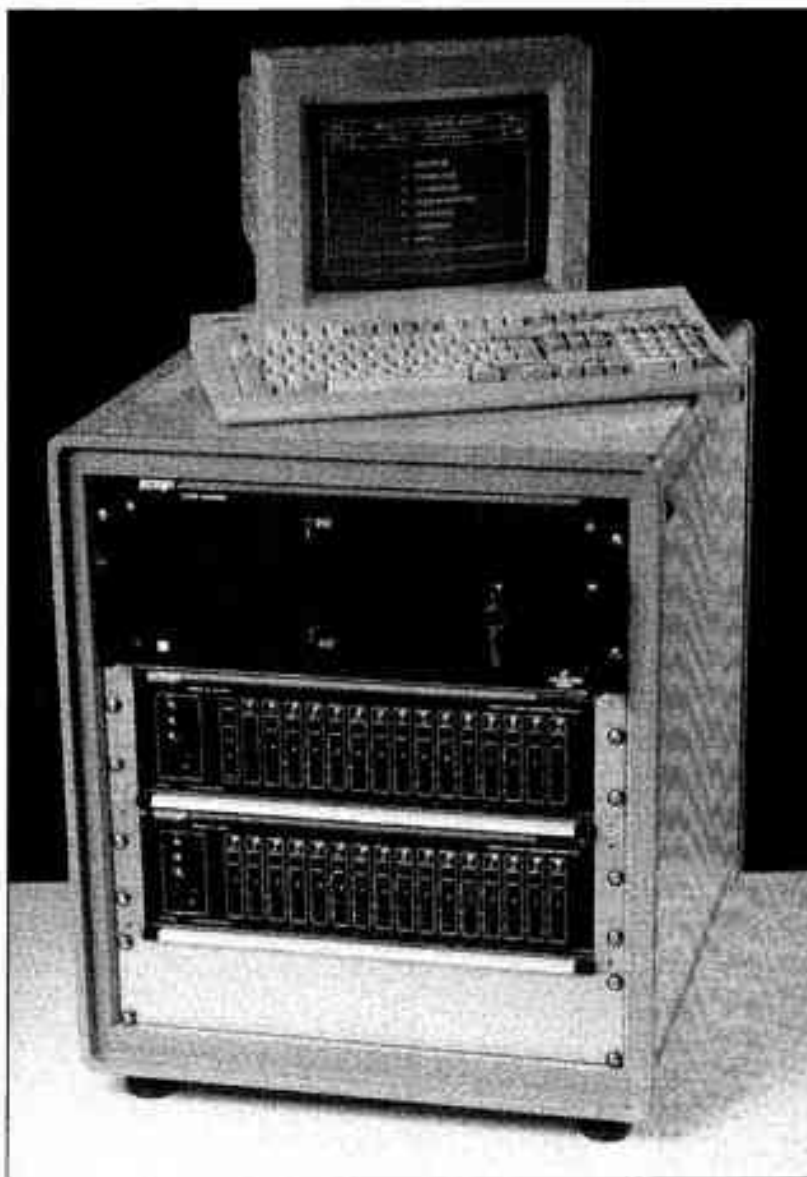
C'est en 1972 que Threshold Technology Inc. (USA) remporta un National Award en présentant le premier système commercial de reconnaissance vocale. Le VIP 100, système d'un mètre cube environ, incluait un mini-ordinateur Nova 2/4 et un rack de filtres analogiques ! Le système était monolocuteur, et capable de reconnaître un vocabulaire d'une vingtaine de mots, prononcés isolément. Il était fondé sur une approche de reconnaissance « globale », où le locuteur doit, pendant l'apprentissage, prononcer chaque mot du vocabulaire. Une forme acoustique issue de l'analyse du signal émis est mémorisée. Lors de la reconnaissance, la forme acoustique inconnue est comparée à toutes les formes de référence, et celle qui lui est la plus similaire désigne le mot reconnu.

La préhistoire de la reconnaissance vocale

Depuis lors, des améliorations ont été apportées à de tels systèmes, tant au plan technologique, grâce aux microprocesseurs, qu'au plan des performances, grâce à l'emploi d'algorithmes optimaux de programmation dynamique pour comparer les formes acoustiques. NEC (Japon) a ainsi réalisé en 1978 le premier système de reconnaissance de mots enchaînés en continu : le DP100. En 1979, la société américaine Dialog proposait le premier système multilocuteur (capable de reconnaître n'importe

quel locuteur sans apprentissage individuel), pour un petit vocabulaire de mots isolés. Vecsys présentait en 1980, à partir des travaux du LIMSI, le premier système de reconnaissance français de mots isolés (Moïse), puis, en 1982, le premier système monocarte de reconnaissance de mots enchaînés : Mozart.

Au cours des années 80, une nouvelle approche « globale » probabiliste, basée sur une modélisation Markovienne, est venue compléter l'approche acoustique, permettant, entre autres, de réaliser à moindres frais des systèmes multilocuteurs, ou autorisant la reconnaissance de grands vocabulaires.



Le serveur téléphonique à commande vocale Acsys, réalisé sous licence CNET, et le circuit intégré de programmation dynamique μ PCD réalisé par le LIMSI en collaboration avec BULL et Vecsys, dans le cadre d'un contrat France-Télécom.

Circuits and systems of speech recognition - The first isolated word speaker-dependent small vocabulary speech recognition system was marketed in 1972. Since then, theoretical progress has allowed for larger vocabularies, speaker-independence and continuous speech. VEST ASICs have reduced the cost and size of the systems, while increasing their quality.

► La montée des performances

Pour les services vocaux de télécommunications, AT&T a réalisé des systèmes multilocuteurs robustes, capables de reconnaître, à travers le téléphone, des petits vocabulaires de quelques dizaines de mots isolés ou enchaînés. Plusieurs opérateurs américains, tels Ameritech ou Nynex, proposent à présent des services à commande vocale à travers le réseau téléphonique. Le CNET a conçu en 1986 un système analogue (PHIL 86) et a mis en place en 1988 le premier serveur à commande vocale français : Mairievox, permettant d'avoir des informations municipales. Acsys a réalisé en 1989, à partir des travaux du CNET, plusieurs services audiotex destinés au grand public.

D'autre part, des circuits spécifiques, adaptés à la programmation dynamique, ont été réalisés. NEC a présenté en 1983 et 1984 un ensemble de circuits adaptés à la reconnaissance de mots isolés ou de mots enchaînés. À l'université de Berkeley, un circuit a été développé en 1984 pour la reconnaissance de 1 000 mots isolés. Un nouveau circuit est à l'étude, en collaboration avec le SRI,

pour la reconnaissance de 1 000 mots en continu multilocuteur. En France, Vecsys et le LIMSI ont conçu en 1988 le circuit μ PCD (70 Mops ou Millions d'opérations par seconde) qui reconnaît 5 000 mots isolés, ou 300 mots en parole continue. AT&T propose un circuit analogue de 50 Mops : la Graph Search Machine.

Pour des applications bureautiques, IBM présente en 1985, sur PC, un prototype de laboratoire monolocuteur, basé sur une approche Markovienne, capable de reconnaître 5 000 mots isolés (étendu à 20 000 mots en 1986). Pour effectuer cette reconnaissance en temps réel, IBM a réalisé en 1985 le circuit « Hermès » permettant de remplacer trois calculateurs vectoriels et un IBM 4341 par une électronique logée dans un châssis au format PC : Dragon (USA) commercialise aujourd'hui un système analogue pouvant reconnaître 30 000 mots isolés et capable de s'adapter à la voix d'un nouveau locuteur.

L'augmentation de la taille des vocabulaires permet donc d'envisager la réalisation de machines à écrire à entrée vocale. Il apparaît cependant que la dictée mot à mot est difficilement accepta-

ble, et que la prononciation en continu est une nécessité. D'autre part, cela implique des traitements linguistiques propres aux langues traitées, afin d'orthographier correctement les mots reconnus. La langue française est particulièrement difficile à traiter, car elle pose de nombreux problèmes d'homophones hétérographes, et parce que plusieurs formes existent pour les mots (conjugaison des verbes par exemple), augmentant très nettement la taille du vocabulaire « de base ».

■ Joseph-Jean Mariani, directeur de recherche au CNRS, directeur du Laboratoire d'informatique pour la mécanique et les sciences de l'ingénieur (UPR 3251 CNRS), Université Paris-Sud, Bât 508, BP 133, 91403 Orsay Cedex.

■ Christian Gagnoulet, ingénieur au Centre national d'études des télécommunications, BP 40, 22301 Lanmeur Cedex.

Avec Traitement du Signal partez explorer de nouvelles dimensions

- théorie des signaux et des systèmes.
- traitement des signaux à une ou plusieurs dimensions :
antennes, image, parole.
- interprétation des signaux et des images.
- applications : communications, géophysique, vibrations,
robotique, biomédical.
- matériels et logiciels : architectures, langages, composants.

TS permet aux ingénieurs, chercheurs, décideurs, la diffusion rapide de leurs travaux et les informe de l'évolution des connaissances dans tous les domaines du traitement du signal à l'échelle mondiale.

Très largement ouverte à la communauté scientifique internationale, la revue TS porte une attention particulière à la diffusion du traitement du signal en langue française.

Rédacteur en Chef : Jean-Louis Lacoume

Contactez :

TS, BP 46 - 38402 Saint-Martin-d'Hères cedex - France
Téléphone : (+33) 76 51 53 45 - Télécopie : (+33) 76 82 63 84

Revue scientifique française publiée par le GRETSI avec le soutien du CNRS et de la DGA.

Evolutions techniques et développement des systèmes

Certains traitements du signal et de l'image posent de si sérieux problèmes que l'on songe à se tourner vers des solutions radicalement différentes à base de réseaux connexionistes ou neuromimétiques.

■ Joël Le Roux

L'émersion des méthodes modernes de traitement du signal date de la fin des années 60 et du début des années 70, qui ont vu l'apparition et la généralisation de l'utilisation des outils informatiques, et le développement de techniques numériques. Citons l'invention de la célèbre transformée de Fourier rapide par Cooley et Tukey vers 1965. Une dizaine d'années plus tard, la réalisation de microprocesseurs monolithiques performants et économiques, aux fonctionnalités complexes, de programmation et de mise en œuvre aisées, a permis une large diffusion de produits utilisant le traitement numérique du signal, comme le « Speak and Spell », jouet développé par Texas Instrument en 1979, et utilisant la synthèse numérique du signal vocal.

Des performances impressionnantes

Maintenant les performances de ces microprocesseurs spécialisés dans le traitement du signal sont impressionnantes : plusieurs centaines de milliers de transistors sur une « puce », opérations arithmétiques effectuées en quelques dizaines de nanosecondes, programmation en langage évolué... Elles permettent d'appliquer les méthodes de traitement du signal à des secteurs d'activité commerciale ou stratégique de plus en plus nombreux. Cette évolution est particulièrement sensible dans le domaine des télécommunications : traitement numérique de la modulation et de la démodulation, nouveaux systèmes de radiotéléphonie cellulaire et de transmission d'images qui réalisent des algorithmes de codage et de réduction de débit effectuant plusieurs dizaines de millions d'opérations élémentaires par seconde.

Les années qui viennent verront une amélioration des performances de ces processeurs liée à la diminution de la taille et du temps de commutation des transistors, progrès qui finiront sans doute par atteindre des limites. En complément de cette évolution, on voit émerger deux tendances dans la conception des circuits et

des machines de traitement du signal : l'adaptation des processeurs de traitement du signal à une application et le développement de machines multiprocesseurs programmables.

La première approche consiste à concevoir les circuits spécifiques précisément adaptés à l'application, que ces circuits soient programmables ou non, en s'appuyant éventuellement sur un « cœur » de microprocesseur optimisé. Notons que le traitement numérique du signal est une des disciplines informatiques qui nécessitent une grande diversité d'architectures pour satisfaire les contraintes imposées dans des problèmes variés. Cette approche se justifie lorsque le nombre de circuits réalisés est grand ou lorsque d'autres considérations doivent être prises en compte, comme dans le domaine aérospatial qui fait largement appel aux systèmes de traitement du signal pour l'observation et la communication. Dans ce cas, le poids, le volume et la consommation des systèmes embarqués ne doivent pas dépasser des limites draconiennes, ce qui peut justifier le développement de circuits spécifiques. Cette approche aboutit à des implantations qui ne remettent pas en cause les algorithmes de traitement. Elle permet une large diffusion des techniques de traitement du signal.

Traiter en temps réel

Dans la deuxième approche, l'objectif est de diminuer les temps de calcul pour traiter en temps réel des signaux de plus en plus rapides ou des signaux fonction de plusieurs variables. Certaines applications comme la visualisation tridimensionnelle en médecine ou en géophysique, les traitements élaborés de séquences d'images, les analyses de signaux radar à ouverture synthétique peuvent exiger des billions d'opérations par seconde. Ces performances ne peuvent s'obtenir qu'en utilisant des calculateurs parallèles rassemblant des dizaines et même des milliers de processeurs élémentaires. Dans cette recherche de la simultanéité des calculs, il y a plusieurs voies possibles, en fonction de la régularité plus ou moins grande des algorithmes à implanter et des données à traiter. Si les algorithmes sont très réguliers, les calculs se présentent sous la forme

d'une séquence régulière d'opérations élémentaires, comme par exemple un filtrage linéaire, et on peut effectuer ces traitements exactement comme sur une chaîne d'assemblage (en « pipeline » ou encore sur un réseau « systolique »). La parallélisation massive peut aussi se faire en appliquant simultanément le même traitement à des données différentes. Dans d'autres cas, les traitements ne sont pas si réguliers et les processeurs doivent être moins dépendants les uns des autres. Alors apparaissent de difficiles problèmes de communication et de synchronisation de processeurs relativement autonomes.

Inventer des solutions nouvelles

Il est probable que dans certaines applications, la nécessité d'utiliser une structure de calcul multiprocesseurs remettra complètement en question les algorithmes, et même certains concepts de base en traitement du signal qui paraissent tout à fait efficaces dans le cas d'une machine séquentielle. Par exemple, la parallélisation des méthodes de détection de contours ou de régions d'une image pose des problèmes sérieux. C'est pourtant une opération courante en traitement d'images. On peut se demander si les algorithmes parallèles à inventer ne devront pas nécessairement éviter les étapes de ce type et proposer des solutions radicalement différentes aux problèmes posés. La mode actuelle des réseaux connexionistes ou neuromimétiques est un exemple de cette remise en question.

Ces réseaux rassemblent un très grand nombre de processeurs élémentaires reliés les uns aux autres. Ces processeurs élémentaires ne peuvent pas réaliser des fonctions complexes mais réagissent simplement aux états des processeurs auxquels ils sont reliés. Les concepteurs de tels systèmes ne cherchent pas à analyser finement le comportement du réseau, mais utilisent une approche par apprentissage. On présente sur les capteurs d'entrée du réseau un ensemble de signaux type, par exemple plusieurs vues d'un dessin à reconnaître, et on indique les sorties du réseau devant être activées lorsque ces signaux d'entrée sont présents. Alors le réseau se stabilise dans une configuration qui doit permettre la reconnaissance de formes semblables à celle du signal analysé lors de cette phase d'apprentissage.

■ Joël Le Roux, professeur à l'Université de Nice, Laboratoire « Informatique, signaux et systèmes » à Sophia-Antipolis (URA 1376 CNRS), Université de Nice, rue Albert Einstein, Sophia-Antipolis, 06560 Valbonne.

- Acoustique 14, 15, 30, 60, 67
Acoustique musicale 31
Acoustique sous-marine 13, 26, 45, 56, 85, 87, 87, 96
Adaptation 42
Aide au diagnostic 17, 19, 28, 59, 63, 78, 79, 80, 81
Analyse d'image 80
Analyse de scène 72, 98
Analyse multivariable 70
Analyse spatiale 84
Analyse spectrale 27, 28, 29, 33, 84
Analyse statistique 70
Analyse temps échelle 29
Analyse temps fréquence 29, 30, 31
Antenne acoustique 14, 60
Astrophysique 20, 19, 110, 35, 64, 108, 110, 111
Audioconférence 60
Audition 25, 67, 95
Autoradio 43
- B**
Brouillage 40, 42
Bruit 14, 26, 30, 55
- C**
Capteur 12, 15, 25, 76, 86, 90
Cartographie 19
Centrale nucléaire 57
Champ électromagnétique 33
Circuits 113, 115
Classification 110, 69, 78, 86, 87, 87, 96, 99
Codage 40, 43, 48, 50
Cœur 17, 19, 79, 81
Compression 47, 48, 50, 51, 52
Conduit vocal 64, 95
Contrôle non destructif 62
Contrôle perceptif 12
Convection solaire 110, 111
Croûte océanique 58
Cycle magnétique solaire 111
- D**
Décodage 40, 48
Déflecteur CCD 19, 45
Détection 57, 76, 83, 86, 87, 89, 91, 96, 98, 108
Diagnostic 76, 107, 111
- E**
Echographie 62
Electrocardiographie haute résolution 79
Electroencéphalogramme 59
Electromyogramme 78
Electrophysiologie 25, 59, 78, 79
Engrenage 77
Enregistrement ancien 55
Estimation 56
- F**
Filtrage 42, 50, 56, 57, 58, 59, 61, 110
Fractales 29, 110
Fusion de données 86, 102
Fusion multicapteur 12
- G**
Galaxie 20, 35, 99
Géophysique 33, 58, 91, 107
Géomètre 26, 84
Granulation solaire 110
- H**
Haute résolution 27, 84
- Héliosismologie** 108
- I**
Image spectrale 51
Imagerie astronomique 20, 19, 110, 35, 64
Imagerie médicale 17, 17, 19, 28, 59, 62, 63, 78, 79, 80, 83, 106
Imagerie numérique 34, 36, 45, 46, 48, 50, 51, 89, 90, 97, 98, 99
Imagerie radio 64
Imagerie sonar 87
Imagerie spectroscopique 70
Imagerie ultrasonore 62
Infographie 72, 81
Informatique musicale 31
Intelligence artificielle 27, 96, 99
Interface homme machine 85
Interférométrie optique 64
Interprétation 97, 99, 102
Intervention chirurgicale assistée par ordinateur 63, 106
Inversion 95, 108
Ionosphère terrestre 33
- L**
Laser 46
Lissage 59, 89
Localisation 14, 67, 81, 83, 84, 86, 87, 91, 101, 102, 108
- M**
Microscopie électronique 69
Modélisation 19, 25, 26, 27, 28, 34, 51, 59, 64, 66, 72, 90, 98, 99, 101, 102, 106, 107, 108
Modulation 43
Moteur 30
Mouvement 19, 28, 47, 98
Musique 55
- O**
Oeil 62
Onde acoustique 13
Optique cohérente 46
Oscillation solaire 108
- P**
Parole 15, 25, 52, 55, 64, 66, 83, 95, 113
Pêche 87
Perception 25, 67, 95
Phonation 15, 64, 95
Phonétique 83
Pistage 85
Plasma 33
Plateforme forage 76
Potentiel évoqué 59
Prise de son 60
Problème inverse 61
Problème mal posé 61, 95
- Quantification vectorielle** 50
- R**
Radar 84, 86
Radiotéléphone 42, 60
Rayonnement X 63
Reconnaissance couleur 103
Reconnaissance forme 110, 90, 96, 99, 103
Reconnaissance parole 95, 113
Reconstruction 3D 17, 19, 47, 62, 63, 69, 72, 81, 102, 106
Reconstruction 61, 64
Réduction de bruit 14, 30, 40, 42, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 69, 70
- Régularisation** 61
Représentation 3D 36
Représentation 34
Réseaux connexionistes 115
Résonance magnétique nucléaire 17, 81
Restauration 55
Robotique 12, 66, 101, 102, 103, 105, 106
Rotation solaire 111
Rotation terrestre 107
- S**
Scanner 17
Scintillation stellaire 91
Sclérose en plaques 81
Segmentation 42, 83, 97, 98, 103, 105, 106, 110
Séquence d'images 47, 98
Signal non stationnaire 28, 29, 30
Signal sismique 58
Signal sonore 15, 25, 31
Soleil 108, 110, 111
Son numérique 52, 66
Sonar 26, 56, 84, 85, 87, 87, 96
Sonde Galileo 40
Sonde Voyager 110
Sondeur 87
Spectrohélogramme 111
Spectroscopie 108
SPOT 90
Stéréovision 26, 90, 105
Synthèse 31, 61, 64
Synthèse d'ouverture 64
Synthétiseur 66
Système auditif 25
Système expert 27, 57, 96, 99
- T**
Télécommunications 40, 42, 43, 46, 47, 52, 60
Télédétection 51, 90
Télésurveillance 47, 57, 76, 77, 105
Télévision 47
Tomographie acoustique 13
Tomographie ultrasonore diffraction 17
Tomographie ultrasonore réflexion 62
Traitement d'antenne 84
Traitement image 34, 36, 45, 48, 50, 51, 64, 69, 85, 89, 97, 98, 111
Traitement parole 52, 64, 66, 113
Trajectographie 85
Transformée Fourier 17, 27, 61
Transformée Gabor 31
Transformée Hough 87
Transformée ondelettes 29, 31, 33, 35, 50, 55, 107
Transformée Wigner Ville 29, 30
Transmission 40, 42, 43, 45, 46, 47
Turbulence atmosphérique 33, 91
- Ultrasons** 17, 62
- V**
Veille 56, 85, 86, 96
Vélocimétrie Doppler ultrasonore 28
Very Large Telescope 64, 91
Vibration 14, 30, 76, 77
Vision par ordinateur 72, 89, 99, 101, 102, 103, 105
Vocodeur 52

SUBJECT INDEX



- Acoustical antenna 14, 60
Acoustical tomography 13
Acoustical wave 13
Acoustics 14, 15, 30, 60, 67
Adaptation 42
Aided diagnosis 17, 19, 28, 59, 63, 78, 79, 80, 81
Antenna processing 84
Aperture synthesis 64
Artificial intelligence 27, 96, 99
Astronomical imagery 20, 19, 22, 35, 64
Astrophysics 20, 19, 22, 35, 64, 108, 110, 111
Atmospheric turbulence 33, 91
Audioconference 60
Audition 25, 67, 95
Auditive system 25
- Car radio 43
Cartography 19
CCD detector 19, 45
Circuits 113, 115
Classification 22, 69, 78, 86, 87, 87, 96, 99
Coding 40, 43, 48, 50
Coherent optics 46
Color recognition 103
Compression 47, 48, 50, 51, 52
Computer assisted surgical intervention 63, 106
Computer vision 72, 89, 99, 101, 102, 103, 105
Connectionist networks 115
- Data fusion 86, 102
Decoding 40, 48
Detection 57, 76, 83, 86, 87, 89, 91, 96, 98, 108
Diagnosis 76, 107, 111
Digital sound 52, 66
- Earth ionosphere 33
Earth rotation 107
Electroencephalogram 59
Electromagnetic field 33
Electromyogram 78
Electron microscopy 69
Electrophysiology 25, 59, 78, 79
Estimation 56
Evoked potential 59
Expert system 27, 57, 96, 99
Eye 62
- Filtering 42, 50, 56, 57, 58, 59, 61, 110
Fishing 87
Fourier transform 17, 27, 61
Fractales 29, 110
- Gabor transform 31
Galaxy 20, 35, 99
Galileo 40
Gear 77
Geophysics 33, 58, 91, 107
Goniometer 26, 84
- Heart 17, 19, 79, 81
Helioismology 108
High resolution 27, 84
High resolution electrocardiography 79
- Hough transform 87
- Ill-posed problem 61, 95
Image analysis 80
Image processing 34, 36, 45, 48, 50, 51, 64, 69, 85, 89, 97, 98, 111
Image sequence 47, 98
Infography 72, 81
Interference 40, 42
Interpretation 97, 99, 102
Inverse problem 61
Inversion 95, 108
- Laser 46
Location 14, 67, 81, 83, 84, 86, 87, 91, 101, 102, 108
- Man machine interface 85
Medical imagery 17, 17, 19, 28, 59, 62, 63, 78, 79, 80, 81, 106
Modelling 19, 25, 26, 27, 28, 34, 51, 59, 64, 66, 72, 90, 98, 99, 101, 102, 106, 107, 108
Modulation 43
Motor 30
Movement 19, 28, 47, 98
Multiple sclerosis 81
Multisensory fusion 12
Multivariate analysis 70
Music and computers 31
Musical acoustics 31
Musics 55
- Noise 14, 26, 30, 55
Noise reduction 14, 30, 49, 42, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 69, 70
Non destructive control 62
Nonstationary signal 28, 29, 30
Nuclear magnetic resonance 17, 81
Nuclear plant 57
Numerical imagery 34, 36, 45, 46, 48, 50, 51, 89, 90, 97, 98, 99
- Oceanic crust 58
Offshore drilling platform 76
Old recording 55
Optical interferometry 64
- Perception 25, 67, 95
Perception control 12
Phonation 15, 64, 95
Phonetics 83
Plasma 33
- Radar 84, 86
Radio imagery 64
Radiotelephone 42, 60
Reconstruction 61, 64
Regularization 61
Remote sensing 51, 90
Remote supervision 47, 57, 76, 77, 105
Representation 34
Restoration 55
Robotics 12, 66, 101, 102, 103, 105, 106
- Scanner 17
Scene analysis 72, 98
Segmentation 42, 83, 97, 98, 103, 105, 106, 110
- Seismic signal 58
Sensor 12, 15, 25, 76, 86, 90
Shape recognition 22, 90, 96, 99, 103
Smoothing 59, 89
Solar convection 110, 111
Solar granulation 110
Solar magnetic cycle 111
Solar oscillation 108
Solar rotation 111
Sonar 26, 56, 84, 85, 87, 87, 96
Sonar imagery 87
Sonography 62
Sound pick up 60
Sound signal 15, 25, 31
Sonder 87
Spatial analysis 84
Spectral analysis 27, 28, 29, 33, 84
Spectral image 51
Spectroheliogram 111
Spectroscopic imagery 70
Spectroscopy 108
Speech 15, 25, 52, 55, 64, 66, 83, 95, 113
Speech processing 52, 64, 66, 113
Speech recognition 95, 113
SPOT 90
Statistical analysis 70
Stellar scintillation 91
Stereovision 36, 90, 105
Sun 108, 110, 111
Surveillance 56, 85, 86, 96
Synthesis 31, 61, 64
Synthesizer 66
- Target motion analysis 85
Telecommunications 40, 42, 43, 46, 47, 52, 60
Television 47
Time frequency analysis 29, 30, 31
Time scale analysis 29
Tracking 85
Transmission 40, 42, 43, 45, 46, 47
- Ultrasound diffraction tomography 17
Ultrasound Doppler velocimetry 28
Ultrasound imagery 62
Ultrasound reflection tomography 62
Ultrasonics 17, 62
Underwater acoustics 13, 26, 45, 56, 85, 87, 87, 96
- Vector quantization 50
Very Large Telescope 64, 91
Vibration 14, 30, 76, 77
Vocal tract 64, 95
Vocoder 52
Voyager 22
- Wavelet transform 29, 31, 33, 35, 50, 55, 107
Wigner Ville transform 29, 30
- X radiation 63
- 3D reconstruction 17, 19, 47, 62, 63, 69, 72, 81, 102, 106
3D representation 36

INDEX DES AUTEURS

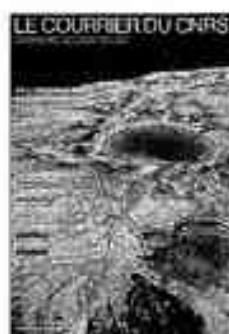
Abey Christian	95	Fort Bernard	19	Mariani Joseph *	113
Allard Jean-François *	55	Fossat Eric	108	Martin Nadine *	27
Antonini Marc *	50	Gagalowicz André *	72	Mathieu Pierre *	50
Arfib Daniel	31	Gagnoulet Christian	113	Mein Pierre	111
Arques Pierre-Yves *	26, 74, 86	Gambis Daniel	107	Meyer Yves *	29
Bailly Gérard	66	Gelly Bernard	108	Mohr Roger *	93, 102
Barlaud Michel *	50	Georgel Bruno *	57	Montrésor Silvio *	55
Baskart Atilla *	48	Giraudon Gérard	99	Ortçu Jean-José	105
Basseville Michèle *	76	Glaudeud François *	58	Perrier Pascal	64
Baudouin Daniel *	56	Glavieux Alain	45	Person Roland	87
Baylou Pierre *	103	Gonord Patrick	17	Picinbono Bernard *	8
Béguet Bernard	14	Goutte Robert *	48	Plumejeaud Christian	96
Benveniste Albert *	76	Grangeat Pierre *	63	Prost Rémy *	48
Bic Jean-Claude *	40	Gree Gérard	108	Rabatel Gilles	102
Bijaoui Albert *	35	Grenier Yves *	60	Ribes Elisabeth	111
Boé Louis-Jean	64	Guéguen Claude *	38	Richetin Marc *	101
Bonnet Noël	40	Guibert Jean	20	Rix Hervé *	79
Bouthemy Patrick *	98	Guibeneuc Pierre	59	Rochette Denis	52
Briot Maurice	105	Guillot Geneviève	17	Roudier Thierry	110
Caelen Jean *	83, 93	Herment Alain	28	Ruckebusch Guy *	90
Canévet Georges	67	Jaouen Yves	46	Sauzade Michel *	17
Castanié Francis *	78	Jauffret Claude *	85	Schmider François-Xavier	108
Castelain Damien	43	Jourdain Geneviève *	13	Schwartz Jean-Luc	25
Cerisier Jean-Claude	33	Kernin Jean-Pierre	87	Servière Christine *	56
Chabran Claude	46	Kopp Laurent *	84	Sigardy Bruno	22
Chambon Jacques	81	Kronland-Martinet Richard	31	Sidahmed Ménad *	77
Charpentier Jean-Claude	1	Labat Joël	45	Silvent André	56
Chassery Jean-Marc *	23, 34	Labit Claude *	47	Slezak Eric	35
Chevallier Georges	10	Lachèse Bernard	80	Tabbara Walid *	17
Chiollaz Monique *	30	Lacoste Jean-Louis *	53	Teston Bernard	15
Cinquin Philippe	106	Lagoutte Dominique	33	Thomas Georges	85
Coequerex Jean-Pierre *	97	Labouache Tahir	15	Thonnat Monique	99
Crowley James L.	102	Lamy Jean	69	Trebbia Pierre	70
Déléglise Paul	83	Lannes André *	61, 64	Tziritas Georges *	98
Demoment Guy *	28, 61	Laval-Jeanet Anne-Marie	80	Vallère Jean-Christophe *	55
Demongeot Jacques	106	Laval-Jeanet Maurice	80	Varenne André *	79
Dessoude Olivier	12	Lavallée Stéphane	106	Vernin Jean	91
Dhome Michel *	101	Le Cadre Jean-Pierre *	26	Villain Jean-Paul	33
Doncarli Christian *	59	Le Floch Bernard	43	Wrobel-Dautcourt Brigitte *	89
Duchêne Bernard *	17	Le Roux Joël *	115	Zavidovique Bertrand *	12
Escudier Pierre	25	Leffèvre Jean-Pierre *	62	Zerr Benoît	87
Favier Gérard *	6, 74	Lesselier Dominique *	17	Ziou Djemel	89
Favre Bernard *	30	Macchi Odile *	42		
Feissel Martine	107	Maeda Shinji	64		
Feng Gang	95	Magnin Isabelle *	19		
Flandrin Patrick *	23, 29	Mailhes Corinne *	51		
Forget Bruno	33	Mailre Henri *	36		

NB - Les auteurs dont le nom est suivi d'un astérisque appartiennent au Groupement de recherche « Traitement du signal et images » (GDR 134 CNRS).

DEJA PARUS...DEJA PARUS...DEJA PARUS

...DEJA PARUS...DEJA PARUS...

...DEJA PARUS...DEJA PARUS...



BON DE COMMANDE

à retourner aux Presses du CNRS, 20-22, rue Saint-Amand 75015 Paris

ISBN	TITRE DE L'OUVRAGE	Prix	Qté	Total
04232-1	n°71: «La mécanique en 1988» (été 1988)	50F		
04340-9	n°72: «Recherches sur l'environnement» (mai 1989)	50F		
04364-6	n°73: «Archéologie en France métropolitaine» (septembre 1989)	50F		
04396-4	n°74: «Le CNRS et les entreprises, la valorisation» (novembre 1989)	50F		
04446-4	n°75: «Les sciences du droit» (avril 1990)	50F		
04473-1	n°76: «La Terre: de l'observation à la modélisation» (juillet 1990)	50F		
04597-5	n°77: «Signaux et images» (juin 1991)	50F		

Port: France 15F - Etranger 20F.

A partir de 5 numéros; franco de port

Total.....

Frais de port.....

Total.....

Nom.....Prénom.....

Adresse.....

Code postal.....Commune.....Pays.....

Ci-joint mon règlement deF à l'ordre des Presses du CNRS

Par: ☐ chèque bancaire

☐ chèque postal

☐ mandat

☐ Bleue Visa:

Je vous autorise à débiter mon compte Carte Bleue

N°.....Date de validité.....

Date.....Signature

Code 109 107

La Division de la statistique, des études et de la documentation du ministère de la Justice nous communique, à propos de l'article « Les statistiques des juridictions pénales », paru dans le n° 75 du Courrier du CNRS, les remarques suivantes :

Les statistiques des juridictions pénales : une évolution positive

La statistique des juridictions pénales ne s'appauvrit pas, mais au contraire se développe. Elle évolue, passant peu à peu d'un simple comptage d'activité des juridictions à l'exploitation informatisée de fichiers d'affaires, ce qui permet la production d'un grand nombre d'informations et notamment des analyses multicritères. En particulier, dans le domaine de l'exploitation des condamnations, spécialement critiqué dans un article paru dans le n° 75 du *Courrier du CNRS*, la Division de la statistique et des études du ministère de la Justice dispose désormais d'une chaîne de traitement performante susceptible de répondre à la plupart des besoins des utilisateurs.

Les statistiques avant 1980

Les données recueillies sur l'activité des juridictions n'ont guère évolué depuis la première moitié du XIX^e siècle jusqu'à la fin des années 70. Si les historiens et les chercheurs peuvent se satisfaire d'une telle situation, les praticiens et les décideurs souffrent de ne pas disposer des outils statistiques indispensables.

Il faut savoir en effet que la source principale d'informations, dans le domaine pénal, provient des états annuels de la statistique pénale (« cadres du parquet ») ; ils sont remplis *a posteriori* par chaque juridiction et rendent compte de leur activité. L'information recueillie reste limitée, les seuls croisements de variables possibles sont ceux qui sont explicitement prévus par les cadres. De plus, la qualité des informations est médiocre car la « méthode » ne permet pas de garantir l'homogénéité des unités de compte entre les différentes juridictions, ni le comptage lui-même. Ce système existe encore aujourd'hui, même si quelques modifications ont pu être apportées.

Par ailleurs, une exploitation statistique des condamnations inscrites au casier judiciaire, par saisie de duplicata statistiques, a débuté en 1952. Elle a été assurée par l'INSEE jusqu'en 1978.

Les années 1980

Pendant cette décennie, la division de la Statistique du ministère de la Justice, créée en 1973, tente de substituer aux informations tirées des cadres annuels rétrospectifs des statistiques fondées sur une exploitation de données de base pour assurer une cohérence des unités de compte, une plus grande richesse d'informations et surtout un véritable travail de technique statistique (exemple : répertoire de l'instruction).

L'évolution la plus sensible est réalisée sur les statistiques des condamnations inscrites au casier judiciaire. Pour les données des années 1979 à 1983, la division de la statistique de la Chancellerie reprend l'exploitation dans la même forme que celle réalisée par l'INSEE, avec toutefois une nomenclature légèrement réduite. Par ailleurs, les données relatives à la profession du condamné sont toujours collectées mais ne font plus l'objet de traitement, cette information étant de trop mauvaise qualité pour permettre une statistique qui ne soit pas illusoire. Les données portant sur ces années ont été publiées en 1985 et 1986 (et non à la fin de

1989, comme une lecture trop rapide de l'article déjà évoqué pourrait le laisser croire).

Pour les condamnations prononcées à partir de 1984, il devient nécessaire de revoir le système statistique en raison de l'informatisation de la tenue du casier judiciaire désormais assurée par un service unique national (CJN). Plus question de saisir deux fois les mêmes informations, la statistique est obtenue par une exploitation automatisée de fichiers anonymes, sous-produits des inscriptions au CJN. A cette occasion, les traitements sont revus et les possibilités considérablement augmentées. Le niveau de détail des infractions est le plus fin possible puisque c'est celui de la table dite NATINF (nature d'infractions, 10 000 positions environ dont 2 000 effectivement utilisées).

Ce travail est difficile et long. Des données définitives, sur 1984, 1985 et 1986, ont été publiées en janvier 1990 (mais les résultats essentiels avaient été communiqués dès 1988 aux principaux utilisateurs dont le Centre de recherches sociologiques sur le droit et les institutions pénales). Les résultats relatifs à 1987 ont été publiés fin 1989, et ceux concernant 1988 et 1989 estimés, sont disponibles depuis début 1991, c'est-à-dire dans le délai strictement nécessaire pour exploiter la source.

Ce nouveau système est bien plus riche que les précédents. Il permet, par exemple, des études plus fines sur des domaines comme la multiplicité des infractions ou les mesures complémentaires à la peine principale. Les tableaux publiés ne représentent désormais qu'une faible partie de l'information disponible. D'autres exploitations peuvent être réalisées sur demande.

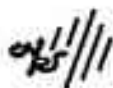
Ainsi, loin de s'appauvrir, le système statistique sur la justice pénale s'est au contraire développé et amélioré pendant les années 1980, même si la continuité absolue des données collectées n'est pas toujours possible, en raison des modifications de l'environnement technique, administratif ou judiciaire.

Les années 1990

La justice évolue. Le Ministère se modernise. L'amélioration fondamentale va venir, très vite maintenant, de l'obtention de données de base, sous-produit de la gestion informatisée des juridictions. La future informatisation du « pénal » permettra de collecter ces données à la source, en assurant ainsi un meilleur contrôle de qualité et une plus grande richesse de tableaux.

Pour préparer ces exploitations de moyen terme, la Division de la statistique et des études travaille avec les autres services de la chancellerie et les juridictions. Des enquêtes sont réalisées, notamment sur les délais et l'effectivité de la mise à exécution des peines, bientôt sur l'organisation et les orientations des bureaux d'ordre des parquets.

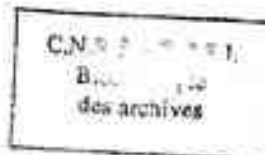
Ces quelques indications montrent à l'évidence que, par rapport aux 150 années précédentes, les statistiques de la justice pénale progressent et évoluent pour assurer une meilleure efficacité de l'institution judiciaire, tout en fournissant l'information de qualité nécessaire à l'historien et au sociologue.



TRAITEMENT DU SIGNAL ET IMAGES

DIRECTION

Claude GUEGUEN, Directeur, (ENST), 46, rue Barrault, 75634 Paris Cedex 13 - (1) 45 81 71 77
Odile MACCHI, Directeur adjoint, (ESE/LSS), Plateau du Moulon, 91190 Gif-sur-Yvette - (1) 69 41 80 40
Bernard PICINBONO, Conseiller scientifique, (ESE/LSS) - (1) 69 41 80 40



RESPONSABLES DE GROUPES DE TRAVAIL

GT1 - Evolutif, adaptatif	Patrick FLANDRIN	ENS Lyon 46, allée d'Italie, 69364 Lyon Cedex 07
GT2 - Reconnaissance et Ruptures	Michèle BASSEVILLE	IRISA Campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex
GT3 - Fusion de données	Michel MARITON	MATRA MS2I 3, avenue du Centre, 78182 St-Quentin-en-Yvelines
GT4 - Antennes	Jean-Pierre LE CADRE	IRISA Campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex
GT5 - Problèmes inverses	Guy DEMOMENT	ESE/LSS Plateau du Moulon, 91190 Gif-sur-Yvette
GT6 - Architectures en Traitement du signal	Joël LE ROUX	ISS 250, rue A. Einstein, Sophia-Antipolis, 06560 Valbonne
GT7 - CAO et Banque de logiciel	Mohamed NAJIM	ENSERB 351, cours de la Libération, 33405 Talence
GT8 - Traitement et Interprétation d'Images	Jean-Marc CHASSERY	CERMO Labo TIM 3, BP 53X, 38041 Grenoble Cedex
GT9 - Ordres supérieurs	Jean-François CARDOSO	TELECOM Paris Dpt. Signal, 46, rue Barrault, 75634 Paris Cedex 13

Les Groupes de travail ont donné lieu à la mise en place d'un certain nombre d'opérations de recherche telles que: synthèse d'ouverture VLT, identification de réponses impulsionnelles longues, reconstruction et interprétation 3D...
Certaines de ces opérations ont abouti à l'édition de rapports de synthèse décrivant l'état de l'art sur des sujets d'actualité, comme par exemple: comparaison d'algorithmes adaptatifs en contexte non-stationnaire, signaux-test, segmentation d'images...

QUELQUES SECTEURS D'APPLICATION

- Télécommunications, codage, compression, transmission, audio-numérique, TV numérique
- Communication homme-machine, synthèse, reconnaissance de parole et de sons, identification du locuteur
- Défense, systèmes d'armes, surveillance, identification et suivi de cible
- Biophysique, génie biomédical, EEG, ECG, radiographie, tomographie, scintigraphie, échographie
- Géophysique interne/externe, de surface, sismique, océanographie physique, météorologie
- Acoustique aérienne, sous-marine, sonar, ultrasons, nuisances
- Vibrations, fatigue mécanique, contrôle non-destructif, surveillance et maintenance des machines
- Electromagnétisme, radar, télédétection
- Instrumentation, capteurs, métrologie
- Vision, robotique...

CLUB DES PARTENAIRES

Président: Bruno GEORGEL - EDF, Etudes et recherches, Dpt SDM, 6, quai Watier, 78400 Chatou - (1) 30 87 78 74

ADMINISTRATION

Elisabeth DEPRÉ (ENST), 46 rue Barrault, 75634 Paris Cedex 13 - (1) 45 81 73 60 - Télécopie (1) 45 80 72 47



CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
15, QUAI ANATOLE-FRANCE 75700 PARIS, TÉL. (1) 47 53.15.15. TELEX 280 034

