

Le courrier du CNRS 71

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 71, 1988-07

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

Consulté le 12/01/2026 sur la plate-forme EMAN :

<https://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/160>

Présentation

Date(s)1988-07

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 pages124

Notice créée le 19/10/2024 Dernière modification le 11/12/2024

DOSSIERS SCIENTIFIQUES

DOSSIERS SCIENTIFIQUES

LA MECANIQUE EN 1988 ?

FLUIDES

ACOUSTIQUE

MATERIAUX

STRUCTURES

MECANISMES

TRIBOLOGIE

ACTIONS ET FORMATIONS

N 71-50F-ETF 1988

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



Le trimaran "Midial" d'Olivier de Kersauzon lors du Championnat du Monde des multicoques F1, au Grand Prix de Brest (28 avril - 1^{er} mai 1988) qu'il a remporté. Pour sa conception comme pour sa réalisation, un tel voilier fait appel aux connaissances les plus actuelles des chercheurs et des industriels. Les domaines les plus divers de la mécanique s'y rencontrent dans les interactions air-voiles ou eau-coque, la structure de la coque et des mâts, les matériaux de construction (composites, textiles, alliages), les mécanismes et éventuellement le sonar (© Philippe Caron - Agence Vandystadt).

LE COURRIER DU CNRS

DOSSIERS SCIENTIFIQUES

Directeur de la publication :
Goëry Delacôte

RÉALISATION :
Atelier de l'Écrit,
1, place Aristide Briand,
92195 Meudon Principal Cedex

Direction : Bernard Hagene

Rédacteur en chef :
Véronique Brossollet-Condé

Secrétariat de rédaction :
Françoise Bescond,
Jean Chouty,

Sylvie Langlois,
Jacqueline Leclère

Secrétariat :
Mirella Sémior

COMITÉ SCIENTIFIQUE :

Michel Bruncau,
Philippe Destuynder,
Dominique François,
Jean Frêne,
Philippe Gutignol,
Jean-Claude Guinot,
Jean Kergomard,
René Moreau,
Serge Sarrazin,
André Zaoui.

COMITÉ DE RÉDACTION :

Georges Chapouthier,
Bernard Dornay,
James Hiéblot,
Claire Lhuillier,
Sylvie Sahal,
Maryvonne Tissier,
Françoise Tristani.

Ce numéro du *Courrier du CNRS* a été préparé sous la direction du Département des Sciences Physiques pour l'Ingénieur du CNRS ; il a été réalisé avec le concours de la Direction des Enseignements Supérieurs du Ministère de l'Éducation Nationale, de la Recherche et des Sports, du Département des Mathématiques-Physique de Base du CNRS et du Département des Sciences de la Terre-Océan-Atmosphère-Espace du CNRS.

Revue trimestrielle. Vente au numéro : 50 francs. Diffusion : Presses du CNRS, 20-22, rue Saint-Amand, 75015 Paris. La rédaction remercie les auteurs et les organismes qui ont participé à la rédaction. Les intertitres et les chapreaux introductifs ont été rédigés par la rédaction. Les textes et illustrations peuvent être reproduits sous réserve de l'autorisation écrite du Directeur de la publication.

Coordination : Jean Oliveri
Direction artistique : Top Conseil,
18, rue Volney, 75002 Paris - tél. : 32 96 14 38.
Impression : Roto-France-Impression,
boulevard de Beaubourg, Emerainville,
77200 Torcy - tél. : 60 06 60 00.
Commission paritaire : AD 303.
ISSN : 0-153-985-X. ISBN : 2-222-04232-1.

Ce numéro n'est complet qu'avec l'encart indispensable à la lecture de la page 121.

© Centre National
de la Recherche Scientifique

La Mécanique ? Vous connaissez bien sûr cette inconnue familière. Elle est tellement présente dans chacun de nos mouvements mécaniques que nous finirions par l'oublier si, dissimulée et imprévisible, elle ne se révélait si souvent la cause cachée de nos échecs. Imprévisible, cette science parmi les plus anciennes qui soient ! Nous pourrions en reparler à bord



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

de la station orbitale Columbus à l'heure où nous essaierons de verser la glace dans nos apéritifs. Parfois éclipsée par les progrès rapides de sciences plus récentes, elle resurgit brillamment à l'occasion de nos grandes réalisations : ainsi 1988, année de la Mécanique, mais c'est aussi le centenaire de la construction de la Tour Eiffel ; et cette fin du vingtième siècle qui verra l'avènement des vols hypersoniques. En outre, la mécanique s'annonce aujourd'hui comme la discipline qui lancera les plus grands défis à l'ingénieur de l'an 2000.

Science Physique pour l'Ingénieur ou Science pour l'Ingénieur ? La Mécanique l'est en effet par excellence et de par son caractère devenu **interdisciplinaire** : en effet, de la récupération assistée du pétrole aux constructions parasismiques, de l'emploi des matériaux nouveaux à hautes performances aux robots flexibles et aux futurs robots intelligents et décideurs, en passant par l'échographie médicale et par le génie biologique et médical, elle fait partie du quotidien de l'ingénieur.

La Mécanique aujourd'hui ne se présente plus seulement suivant le classement canonique - Mécanique Rationnelle, Mécanique des Fluides, Mécanique des Solides -. De fait en 1988 - et c'est ce que l'histoire devra retenir - on distingue plus volontiers la **Mécanique des Milieux Continus** caractérisés par leurs lois de comportement et la Rhéologie des Matériaux dans leur Environnement, on parle de la Science des Maté-

riaux dont les propriétés mécaniques se veulent définies à l'avance, on fait encore référence à la Mécanique du Contact-Tribologie, on fait appel enfin à la **modélisation numérique** avec l'utilisation toujours plus importante de l'outil informatique (on parle de souffleries numériques...) pour l'étude de structures et de maquettes aux géométries complexes nécessitant des

matériaux au comportement intelligemment modélisé et situé dans des conditions d'environnement très sévères, voire critiques...

Comme vous le constaterez dans les pages qui suivent, personne ne pouvait mieux que Paul Germain souligner la modernité de la Mécanique et l'enjeu que représente pour le développement industriel l'effort de recherche entrepris dans ce domaine.

Mais et pour conclure, afin de relever les défis fascinants de la Mécanique, la recherche scientifique française, que représente-t-elle en 1988 ? La réponse, c'est deux mille cinq cents chercheurs confirmés, enseignants-chercheurs et chercheurs en formation et huit cents ingénieurs qui mènent des recherches sur les thèmes précédents au sein de cent laboratoires de recherche publique dont la moitié est soutenue par le CNRS.

Ainsi du plus cognitif au très appliqué, le CNRS mobilise ses forces afin de promouvoir la Mécanique et de lui donner son dynamisme. Il a voulu, à travers ce dossier spécial du Courrier du CNRS, qui est l'œuvre de toute la communauté française des mécaniciens, vous montrer, bien au-delà de ses laboratoires, où conduit cette recherche.

Aurait-il souhaité par cela même vous faire connaître la Mécanique, ou simplement vous la faire reconnaître ?

En tout cas nous pourrions affirmer : la **Mécanique en 1988**, nous étions présents.

**Vous avez dit
la mécanique en 1988 ?**

SCIENTIFIQUE

Editorial

Vous avez dit la mécanique en 1988 ?
Mechanics - What about in 1988?
Jean-Claude Charpentier

Avant-propos Foreword

La mécanique : modernité de la science et enjeux de l'industrie
Mechanics: modernity and industrial stakes
Paul Germain

La mécanique en cinq chapitres
Mechanical engineering in five chapters

Fluides Fluids

Les fluides, partout
Fluids, everywhere
Georges Charmay, Michel Combarnous

Les écoulements turbulents
Turbulent flow of fluids
Michel Comblanc

Les souffleries
Wind tunnels
Jean-Paul Carossa

Vélocimètres
Flow velocimeters
Régis Dumas, Max Elina

La mécanique des fluides numérique
Computational fluid mechanics
Roger Peyret

Gaz sur réseaux
Lattice gases
Pierre Lallemand

Les fluides et l'espace
Fluid dynamics and space
Jean-Claude Légrand, Georges de Nicola

Le cas d'Hermès
The Hermes space shuttle
Thierry Aizary de Roqueta

L'aérodynamique classique
Some present researches in aerodynamics
Thierry Aizary de Roqueta

Les voilures tournantes
Aerodynamics of rotary wings
Christian Maresca

Résistance de vagues, tenue à la mer
Wave drag
Daniel Euvrard, Gérard Oethommeau

Moyens expérimentaux de l'hydrodynamique
Hydrodynamic experimental facilities
Patrice Salimont

Les turbomachines
Turbomachines
Francis Lebeuf, Jean-Louis Kuery

Parer les risques de la cavitation
Prevention of cavitation risks
Jean-Marie Michel

La conversion d'énergie magnétohydrodynamique
Magnetohydrodynamic power generation
Antoine Alemany

Les énergies de la mer
Energy resources of the sea
André Temperville

La structure des flammes
Structure of flames
Sébastien Candel

Les lasers de grande puissance
High power lasers
Bernard Fontaine

Les fluides, véhicules de l'énergie
Fluids in energy transmission
Roger Séminia

Génie chimique et mécanique des fluides
Chemical engineering and fluids mechanics
Jacques Villiermaux

Les fluides conducteurs de l'électricité
Electrically conducting fluids
Marcel Garnier, Guy Laval

Les fluides polyphasiques
Multiphase fluids
Gérard Cognet, Jean-Marc Delhayo

Modéliser les interfaces
Interfaces modeling
Renée Gagniol, Michel Dudeck, Roger Prud'homme

La viscosité des suspensions
Concentrated suspensions as very attractive fluids
Daniel Quémada

Comment s'écoulent les fluides complexes
How flow complex fluids
Michel Lebouché, Noël Midoux

Mécanique des écoulements biologiques
Dynamics of biologic fluids
Michel Jaffrin, Jacques Dutaux, Patrice Fiaud, Robert Pélessier

Les fluides géophysiques
Geophysical fluids
Emil Hopfinger

Prévision du temps et du climat
Weather and climate prevision
Robert Sadourny

La physique originale des océans

Original physics of oceans
Alain Colin de Verdière

La surface du Soleil est turbulente

The Sun's surface is turbulent
Jean-Paul Zahn

33 Acoustique Acoustics

34 Les champs de l'acoustique
Fields of acoustics
Michel Bruneau, Jean Kergomard

Les décibels
Decibels
Jean-Dominique Polack

La vitesse du son dans les fluides
Sound velocity in fluids
Michel Bruneau

Les chambres anéchoïques
Anechoic chambers
Henri-Simon Arbey

L'essor du sondage acoustique
New applications for acoustic sensing
Jean-Pierre Lefebvre

L'évolution des transducteurs
Trends in transducers
Mario Rossi, Jean-Noël Decarpigny

Acoustique sous-marine
Underwater acoustics
Jean-Pierre Sessarego

Acoustique et parole
Acoustics and speech
Jean-Sylvain Liénard

Entre stimulations sonores et sensations
Between sound stimulations and sensations
Georges Cornvet

Traitement du signal sonore
Signal processing for sound
Patrick Flandrin

Images de l'acoustique musicale
Images of musical acoustics
Michèle Castellengo

Le luthier et les composites
Composite materials for music instruments
Charles Besnainou

Informatique musicale
Music and computers
Jean-Claude Risset

Chasse au bruit dans l'industrie
Abating noise in the industry
Jacques Delcambe

A l'écoute des matériaux
Listening to materials
James Roget

Le silence par le bruit
Silence through noise
Paul Lucet

36 Ce que permet l'intensimétrie
What acoustic intensity measures

38 Jean-Claude Pascal
Acoustique de l'environnement
Environmental acoustics

38 Paul Filippi

Le bruit des pneumatiques
Tyre noise
Mariano Perulli

Le bruit des aéronefs
Airships and noises
39 Michel Roger, Geneviève Comte-Bellot

Les matériaux absorbants
Absorbing materials
Jean-François Allard

40 Architecture et confort sonore
Architecture and acoustic preference
41 Jean-Dominique Polack

43

44

45

46

47

47

48

49

Matériaux Materials

La mécanique des matériaux
Mechanics of materials
Dominique François, Jean Hârus,
André Pineau, André Zaoui

Les machines d'essais
Testing machines
Claude Oytana

Mesurer les déformations
Strain measurements
Alexis Lagarde

Modélisation, essais et
calculs
*Modeling, testes and
calculation*
Noël Dahan, Mircea Predescu

Comment se comportent les
matériaux
Behaviour of materials
Jean-Louis Chaboche

Du microscopique au
macroscopique
*From the micro to the
macroscale*
André Zaoui

Les milieux périodiques
*Homogenization of periodic
media*
Pierre Suquet

La mise en forme rajeunie
Younger forming
Jean-Michel Jalinier

Les logiciels de mise en
forme
*Software for metal forming
simulation*
Gilbert Touzet

Approche locale en
mécanique de la rupture
*Local approach in fracture
mechanics*
André Pineau

Avant la rupture
Before fracture
Jean Lemaître

Où se produira la fissure ?
Where will a crack start from?
Giuseppe Geymonat

Des modèles pour la fatigue
des matériaux
*Materials/Structures: cycling
behaviour*
Georges Cailletaud

Contraintes résiduelles
Residual stresses
Gérard Maeder

La corrosion sous contrainte
Stress corrosion cracking
Didier Desjardins

Les alliages à mémoire de
forme
Shape memory alloys
Marcel Berveiller

Les superalliages
Superalloys
Luc Rémy

Les aubes monocristallines
Single crystalline blades
Yves Honnorat

Composites dans les secteurs
de pointe
*Composites in advanced
industries*
Jacques Odonco

Le collage : au-delà de
l'empirisme
*Adhesive bonding: a great
asset for the designers*
Henri Ancey

Le bois, objectif qualité
Wood, a modern material
Pierre Morlier

Les céramiques et l'art du
compromis
*Ceramic materials: an art of
compromise*
Philippe Boch

Géomatériaux pour grands
ouvrages
*Geomaterials in civil
engineering*
Felix Darie

Des bétons sur mesure
*New concrete: « à la carte »
materials*
Paul Ackert

La terre armée
Reinforced soils
Patrick de Buhan

Iceberg contre plate-forme
offshore
*Iceberg against offshore
structure*
Paul Duval

67

68

69

Structures Structures

Les petits enfants d'Eiffel
The Eiffel grandsons
Denis Aubry, Philippe Destuynder

Ponts, barrages et
plates-formes
*Bridges, dams and offshore
structures*
Bernard Hatphen

La mécanique des vibrations
et les lanceurs de satellites
*Vibration mechanics and
launch vehicles*
Henri J.-P. Morand

Mécanique des biens de
consommation
Mechanics for every day
Jean-Marc Boissonot

Structures des installations
nucléaires
Mechanics for nuclear plants
Alain Hoffmann, Roland Roche,
Philippe Jamet

L'automobile : concevoir sa
structure
*Automobile: the body
structure design*
Pierre Guéllac

Mécanique aléatoire des
structures
*Random excitations on
structures*
Christian Soize, Fabrice Poinon

Des outils pour l'ingénieur
Tools for engineers
Thierry Nivers

Flambage des structures
minces
Stability of a beam system
Michel Potier-Ferry

Thermographie des
matériaux sous contrainte
*Thermography of stressed
materials*
Minh Phong Luong,
Quoc Son Nguyen

La mécanique de la rupture
Fracture mechanics
Jean-Jacques Marigo

Contrôle actif en mécanique
des structures
Active control of structures
Roger Destuynder

Mécanismes Tribologie

Mechanisms Tribology

Mécanismes, contacts et tribologie <i>Mechanisms, contacts and tribology</i> Jean Fréne, Jean-Claude Guinot	98
La préhension du robot <i>Gripping in robotics</i> Jean-Paul Lallemand	100
Mouvements fins pour assemblages de précision <i>Accurate assembly with robots</i> Philippe Bidaud	101
Les mécanismes articulés en robotique <i>Articulated linkages in robotics</i> Marc Dahan, Patrice Minotti	102
Robots déformables <i>Flexible structures of robots</i> André Barraco, Bernard Cury	102
La robotique nucléaire <i>Telemanipulators for nuclear industry</i> Gérard Fraize	103
Recherche en productique <i>Productic's development</i> Jean-Pierre Gochet	104
Le frottement sec <i>Dry friction</i> Maurice Godet	105
Le projet Carmen <i>Carmen project</i> Marc Butol	106
L'adhérence <i>Adherence</i> Daniel Maugis, Michel Barquins	106
Contact lubrifié sous haute pression <i>High pressure lubricant</i> Gérard Dalmaz	107
Régimes limites et tribologie <i>Boundary lubrication and tribology</i> Jean-Marie Georges	109
Frottement et formage des métaux <i>Friction and metal processing</i> François Delamar	110

Des lubrifiants non conventionnels <i>Low viscosity fluids in lubrication</i> Daniel Nicolas, Bernard Deguerce	111
Tribologie spatiale <i>Tribology in space</i> Jean Blouet, René Gras, Michel Ambruster	111
Suspension interactive <i>Hydropneumatic suspension</i> Jacques du Parquet	112

111 Actions, formations Actions, formations

Actions, moyens et formations <i>Actions, means and education</i>	113
Les programmes européens communautaires <i>European community programs</i> Daniel Paulmier	114
Le projet ERCOTAC <i>ERCOTAC project</i> Jean Mathieu	115
Les calculateurs scientifiques vectoriels et parallèles et la mécanique <i>Pipelined and parallel scientific computers and mechanics</i> Pierre Leca, François-Xavier Roux	115
L'action du ministère de la Recherche et de la Technologie dans le domaine de la mécanique <i>The Research Ministry action in mechanics</i> Raoul Monin	116
La mécanique et l'enseignement supérieur <i>Mechanics and higher Education</i> François Joubert	118
Les deux rencontres <i>A scientist itinerary</i> Jean Chouty	118
Les pôles Firtech <i>Firtech poles</i> Bernard Dormy, Gérard Montel	119
Formé par la recherche <i>Trained by research</i> Jean Chouty	120

Vient de paraître

Index auteurs, index thématique du Courrier du CNRS 1971-1987

Disponible sur demande écrite
à l'Atelier de l'Ecrit, 1 place Aristide-Briand
92195 Meudon Principal Cedex.

La mécanique : modernité de la science et enjeux de l'industrie

Paul Germain

J'ai souvent souhaité que des sociologues entreprennent une enquête pour analyser l'imaginaire individuel et collectif mis en branle par le mot « mécanique » afin de nous révéler les idées, les conceptions, les figures qui l'expriment. N'est-il pas évident que « Mécanique générale » évoque plus souvent l'atelier de nos villages qu'un enseignement de nos facultés ? La mécanique classique n'est-elle pas cette discipline qui, comme science, est morte au début du siècle avec l'avènement de la mécanique relativiste et de la mécanique quantique ? Son domaine aujourd'hui n'apparaît-il pas couvert par la physique statistique capable de la reconstruire et de la dé-

velopper à partir du monde des atomes et des particules ? Visions simples, certes, mais hélas simplistes, et donc génératrices d'erreurs et d'illusions !

Notre pays accueille fin août 1988 le Congrès international de mécanique théorique et appliquée (ICTAM), et les membres de la communauté mécanicienne française, scientifiques, ingénieurs et industriels, ont décidé de saisir cette occasion exceptionnelle pour faire de 1988 une année de la « Mécanique » durant laquelle sera mis en œuvre tout un programme d'actions et de manifestations destinées à sensibiliser l'opinion pour lui faire découvrir la modernité des sciences et des industries de la mécanique. Ce numéro spécial s'insère dans ce programme ; il donne des images de la recherche actuelle en sciences mécaniques.

La mécanique de notre siècle a vécu des mutations qui lui donnent une autonomie, une spécificité et une place toutes nouvelles. Pour le faire apparaître, trois lignes de réflexions sont proposées sur le comportement des acteurs de la recherche, sur les grands axes de cette recherche et sur la place que tient la mécanique dans le mouvement des sciences contemporaines. Finalement, seront évoqués les enjeux des industries qui mettent en œuvre les sciences mécaniques.

Les acteurs

Theodor von Kármán, peu après la Première Guerre, prend contact avec Lévi-Civita d'abord, avec d'autres savants des pays d'Europe ensuite, pour leur proposer d'organiser un Congrès international de mécanique appliquée. Ces congrès se sont succédé depuis régulièrement tous les quatre ans et c'est ainsi que s'est formée la communauté des mécaniciens qui, peu après la dernière guerre, devint l'Union internatio-

nale de mécanique théorique et appliquée (IUTAM). Dès les premiers échanges de correspondance, l'idée centrale qui motivait l'initiative de nos anciens apparaît clairement : ils éprouvent une grande difficulté, pour ne pas dire une impossibilité, à parler de leurs recherches lors des rencontres de mathématiciens, de physiciens ou d'ingénieurs. Ils ont conscience de conduire une recherche fondamentalement scientifique, ce qui les distingue des ingénieurs même si l'horizon de leurs travaux intéresse ces derniers, avec des préoccupations, voire des méthodes, différentes de celles des mathématiciens même s'ils aboutissent à des équations qu'il faut résoudre, avec un égal souci de l'expérience que les physiciens, mais avec des centres d'intérêt sensiblement différents. Ce qui s'est passé depuis confirme la remarquable pertinence de ces pressentiments.

Les axes de recherche

Cette prise de conscience traduit la spécificité des axes de la recherche. On comprend mieux l'initiative de von Kármán si on se rappelle qu'il était alors le témoin de l'émergence de concepts qui ouvraient un nouvel avenir à la mécanique des fluides. Le rôle majeur des tourbillons, notamment pour rendre compte de la portance des avions, soupçonné par Lanchester, apparaissait avec Joukowski pour le profil et plus tard avec Prandtl pour les ailes d'envergure finie de grand allongement. La traînée des obstacles pouvait dans certains cas être expliquée et évaluée avec les allées de tourbillons, mais plus souvent et plus fondamentalement avec le concept de couche limite introduit par Prandtl. Ce sont deux exemples de l'un des objectifs de la recherche mécanique de ce siècle :



Joseph Périès (1890-1962), premier président de l'Union internationale de mécanique théorique et appliquée - IUTAM. (© D. R.)



Theodor von Kármán
(1881-1963). Ingénieur hongrois
naturalisé américain, membre de
l'Académie des sciences de Paris, a
travaillé sur les tourbillons et sur la
sustentation des avions. (© Académie
des sciences - cliché Jean-Loup
Charmet).

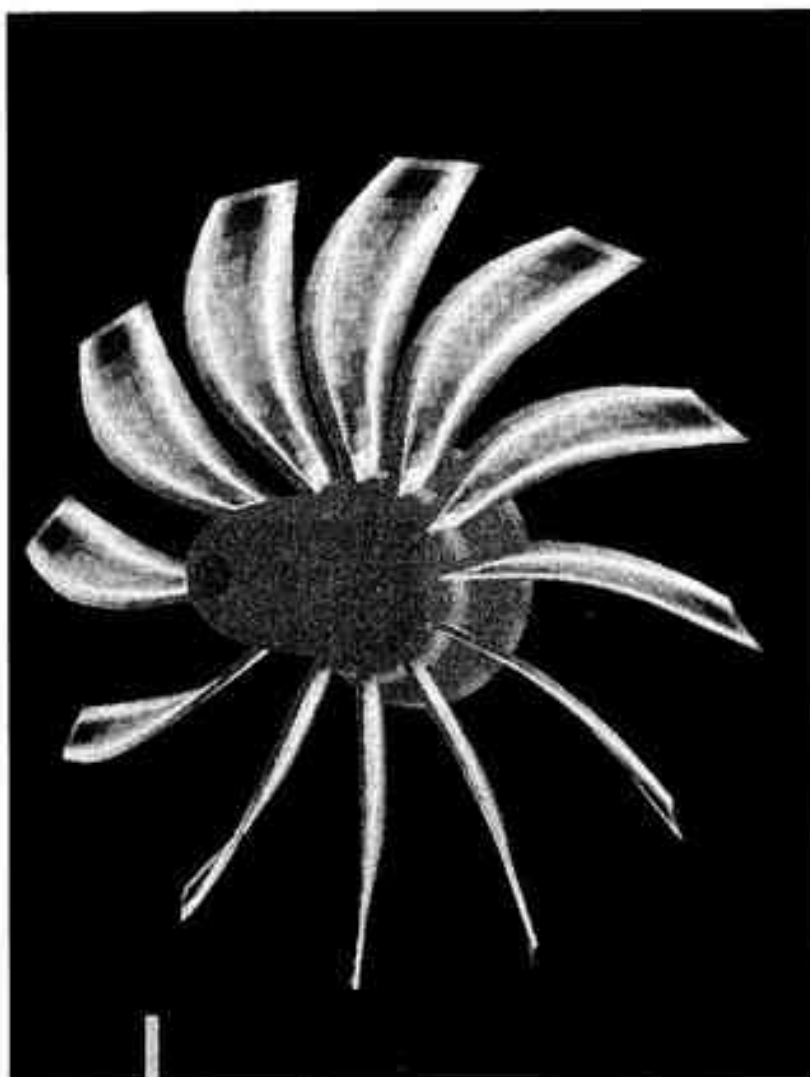
mettre en évidence les concepts, les structures, les mécanismes gouvernant ces structures afin d'acquérir une intelligence plus affinée des mouvements et des équilibres. Comment s'effectue le passage d'une couche limite laminaire à une couche limite turbulente ? Comment naissent les structures cohérentes ? Comment modéliser la cascade des grandes structures aux petites structures turbulentes ? Comment sont gouvernées les instabilités, les structures périodiques auxquelles elles donnent naissance à la suite de bifurcations ? Comment comprendre les interactions des solitons ? Comment caractériser l'endommagement d'un matériau, les grandes déformations d'une pièce, les mécanismes de fluage, si on veut comprendre et maîtriser les opérations de mise en forme ou d'emboutissage ? On pourrait aisément multiplier les exemples montrant qu'il ne suffit pas de connaître les équations, d'avoir des théorèmes d'existence et d'écrire de grands programmes de calcul pour forger les concepts et construire des modèles ouvrant l'intuition, la compréhension et la maîtrise des phénomènes.

Un deuxième axe de recherche s'est dessiné au milieu du siècle : il consiste à préciser les milieux ou les matériaux pris en compte. La mécanique des milieux continus classique apporte sa réponse : tous les milieux sièges d'interactions thermomécaniques gouvernées par les trois lois de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et

de l'énergie. On peut ainsi traiter bien d'autres matériaux que les fluides et les solides élastiques : pâtes, goudrons, gels, cristaux liquides, matières plastiques, matériaux composites, sols, roches... Il faut alors, pour chaque milieu, écrire ses lois de comportement. Devant l'infinie variété de matériaux offerte par la nature, la tâche apparaît décourageante. Néanmoins, la thermodynamique des milieux continus, extension un peu hardie de la thermodynamique classique, offre un guide utile. Ainsi s'ouvre une mécanique des matériaux continus dont l'objet est de modéliser simplement les lois de comportement, en définissant les variables internes et les relations auxquelles elles vont obéir. C'est là où peuvent être pris en compte les résultats des physi-

ciens du solide ou de la matière condensée, non pas par quelque méthode statistique, mais grâce à des processus de localisation-homogénéisation faisant intervenir, entre le point de matière de la structure macroscopique étudiée et les dislocations et les défauts considérés par le physicien, une cellule représentative intermédiaire ayant une échelle microscopique par rapport à la structure et macroscopique par rapport à l'échelle du physicien. Les propriétés locales en un point de la structure sont les propriétés globales de la cellule qui le représente. Nous ne sommes qu'au début de cette vaste tâche qui, sans doute, occupera longtemps nos mécaniciens.

Un troisième axe de recherche ne doit pas être oublié. Si la mécanique



Simulation numérique à l'ONERA de l'écoulement transsonique autour d'une hélice pour avion rapide. Carte des nombres de Mach ($M = 0,75$).
(© ONERA).

n'est pas une discipline mathématique, elle conduit souvent à des problèmes d'une grande nouveauté pour le mathématicien. Mécaniciens et mathématiciens se trouvent ainsi appelés à leur résolution. Si cet axe de recherche prolonge celui de la mécanique rationnelle traditionnelle, il faut noter la mutation que l'on y décèle, là encore. Les développements de l'analyse fonctionnelle et surtout les possibilités sans cesse plus grandes qu'offrent les ordinateurs à l'analyse numérique, ouvrent des voies de recherche fascinantes. L'étude de structures aux géométries complexes, construites avec des matériaux au comportement finement modélisé, travaillant dans des conditions d'environnement très sévères serait totalement hors de portée sans ces moyens.

Une place centrale dans la physique du continu

Les méthodes de la mécanique des milieux continus permettent d'étudier une grande variété de situations physiques. Il est possible par exemple de traiter des mélanges, des milieux multiphasiques avec ou non changement de phase, des milieux réactifs, des gaz pouvant se dissocier et se recombiner. Naturellement, les équations et les données de la cinétique chimique des réactions en jeu doivent s'ajouter aux équations de conservation retenues, écrites en général avec leurs termes de source. On peut également traiter des mouvements de milieux électrisés ou électromagnétiques, à condition d'ajouter aux lois de conservation – écrites en tenant compte des efforts extérieurs ou intérieurs d'origine électromagnétique – les équations de Maxwell et les lois de la polarisation et de la magnétisation. Il existe une « Optomécanique », une « Bio-mécanique ». Ainsi la mécanique contemporaine apparaît-elle comme fournissant le cadre d'étude de multiples disciplines où la description phénoménologique continue est retenue. Elle peut être ainsi considérée comme le fondement d'une physique des milieux continus qui étudie les équilibres et les mouvements, quelle que soit la nature des interactions en jeu.

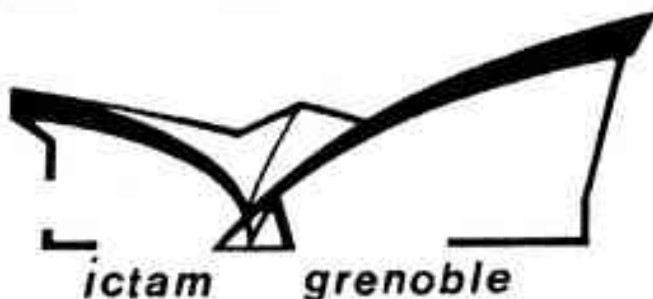
Les enjeux industriels

La définition de la mécanique n'a pas changé : c'est la science des lois de l'équilibre et du mouvement et de l'application de ces lois à la connaissance du monde et à la construction et à l'utilisation des machines. Ce qui a changé, c'est le niveau de nos exigences, tant pour la profondeur et la finesse de nos connaissances que pour les capacités et les performances de nos machines. Il

faut « incarner » dans la matière toutes les technologies les plus nouvelles : informatique, automatique, optique, électronique... Il faut étendre les champs d'action de nos appareils et de nos machines. La mécanique comme industrie joue un rôle central d'architecte industriel. Industries mécaniques au sens traditionnel du terme, transformées par la CFAO (Conception et fabrication assistées par ordinateur), les systèmes experts, les ateliers flexibles et les premières avancées de l'intelligence artificielle, industries des transports, industries aéronautiques maîtrisant en outre les problèmes d'aérodynamique, de propulsion et de pilotage, industries nucléaires, industries d'ex-

traction, industries du génie civil et de la construction, chacune de ces techniques fait appel, et de plus en plus fréquemment, aux progrès les plus récents de plusieurs sciences mécaniques. Point n'est besoin d'étaler les données sur les emplois, les chiffres d'affaires, les volumes des exportations, pour réaliser l'extraordinaire impact de notre science sur la vie du pays.

Paul Germain, Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, professeur à l'université Paris VI, responsable du Laboratoire de modélisation en mécanique (UA 229 CNRS), université Paris VI, tour 66, 4, place Jussieu, 75230 Paris Cedex 05.



21-27 Août 1988

**XVII^e Congrès International
de Mécanique Théorique et Appliquée**



MECANICIENS
AU CŒUR DU MONDE EN MOUVEMENT

La mécanique en cinq chapitres

L'image que l'on se fait de la mécanique se limite souvent à celle des mécanismes. Cet aspect reste de toute première importance, mais la mécanique englobe bien d'autres disciplines. La conception et la construction d'appareils modernes, comme cet avion Airbus A 320, sont un bon exemple de la variété et de l'ampleur des problèmes qui peuvent se poser. Tout au long de ce dossier scientifique, ces problèmes seront développés sous leurs aspects les plus modernes – et dans une perspective beaucoup plus large que celle de l'aéronautique – tels que les affrontent actuellement les chercheurs. Cinq grands chapitres apparaîtront, correspondant à cinq grands champs disciplinaires de la mécanique.

La mécanique des fluides

L'amélioration des performances aérodynamiques d'un avion nécessite évidemment une excellente connaissance de l'écoulement de l'air autour de la cellule. C'est le rôle de la mécanique des fluides que de maîtriser cet écoulement. De cette discipline également relève l'étude du comportement des gaz dans les réacteurs, de leur compression, de leur combustion et de leur éjection, facteurs essentiels de bon rendement. Mais même dans un avion, la mécanique des fluides ne se préoccupe pas que de gaz : les écoulements de liquides dans les tuyauteries ne sont pas un problème mineur.

L'acoustique

Le bruit d'un avion, c'est d'abord celui de ses moteurs. Les nuisances associées ont été en augmentant avec la recherche de poussées de plus en plus grandes et les vols en haute altitude. On sait que les montages de réacteurs à double flux ont permis d'abaisser sensiblement leurs niveaux de bruit. Plus généralement, la réduction du bruit à la source est l'un des pôles de recherche les plus féconds de l'acoustique. Le bruit rayonné vers l'extérieur ne doit pas faire oublier celui qui règne à l'intérieur et qu'il faut évidemment limiter, et encore moins la fatigue mécanique de certaines pièces liée aux vibrations acoustiques auxquelles elles sont soumises.

La mécanique des matériaux

Qu'il s'agisse d'éléments de structure, du train d'atterrissage ou des pièces de moteurs, la résistance mécanique dépend d'un choix judicieux de matériaux dont on doit connaître parfaitement le comportement sous diverses sollicitations (vibrations, température, etc.). Ceci se pose tout particulièrement pour des matériaux nouveaux comme les composites, ou encore les superalliages des aubes de turbines. Ces sollicitations peuvent provoquer des endommagements, tout particulièrement par fatigue des matériaux. Le développement des fissures qui en résultent peut être maîtrisé grâce à la mécanique de la rupture.

La mécanique des structures

Les différentes parties de l'avion sont soumises à des efforts, et donc subissent des déformations dont les limites acceptables doivent être parfaitement déterminées. C'est le cas, par exemple, pour les déformations générées par les interactions entre l'air et la structure. Une partie d'entre elles peut être expérimentée au cours d'essais. Mais, de plus en plus, la mécanique des structures développe, grâce aux progrès des gros ordinateurs, des modèles numériques qui permettent de simuler dès leur conception le comportement statique et dynamique des éléments sous des contraintes de toutes origines.

Les mécanismes et la tribologie

Du train d'atterrissage aux systèmes de fermeture des portes, des actionneurs de volets aux essuie-glaces, l'équipement mécanique d'un avion, comme de toute machine complexe, est un monde de mécanismes. Frottement et usure en conditionnent le bon fonctionnement. Ce qui se passe au contact de deux pièces en mouvement relatif, les solutions de lubrification à adopter, sont du domaine de la tribologie. Mais cette discipline ne s'intéresse pas qu'à la recherche du frottement minimum. En relève aussi, par exemple, l'étude du freinage et du contact pneu-piste.



L'avion A 320 n° 2 en cours d'essais à Toulouse. Il peut être équipé des moteurs CFM 56-5 ou V 2500 (printemps 1989). (© Aérospatiale).

Les fluides partout

Écoulements de gaz, de liquides ou de milieux complexes, de quelques millimètres par jour à quelques kilomètres à la seconde, à l'échelle d'un capillaire ou à celle de l'atmosphère : les champs d'études de la mécanique des fluides ne cessent de s'étendre.

Georges Charnay,
Michel Combarrous

Ils coulent ou occupent tout le volume qui leur est offert : ce sont les fluides. Qu'ils soient gazeux, comme l'air, ou liquides, comme l'eau, les fluides usuels ont pour la plupart un comportement dit newtonien, car alors les forces ou contraintes internes, en leur sein, restent proportionnelles aux vitesses des déformations locales, le coefficient de proportionnalité étant la viscosité. Au-delà de cette situation simple, la rhéologie, science du comportement des milieux continus, est d'une grande utilité pour les cas les plus complexes, tels les solutions colloïdales ou les plasmas, phases gazeuses contenant des particules chargées électriquement.

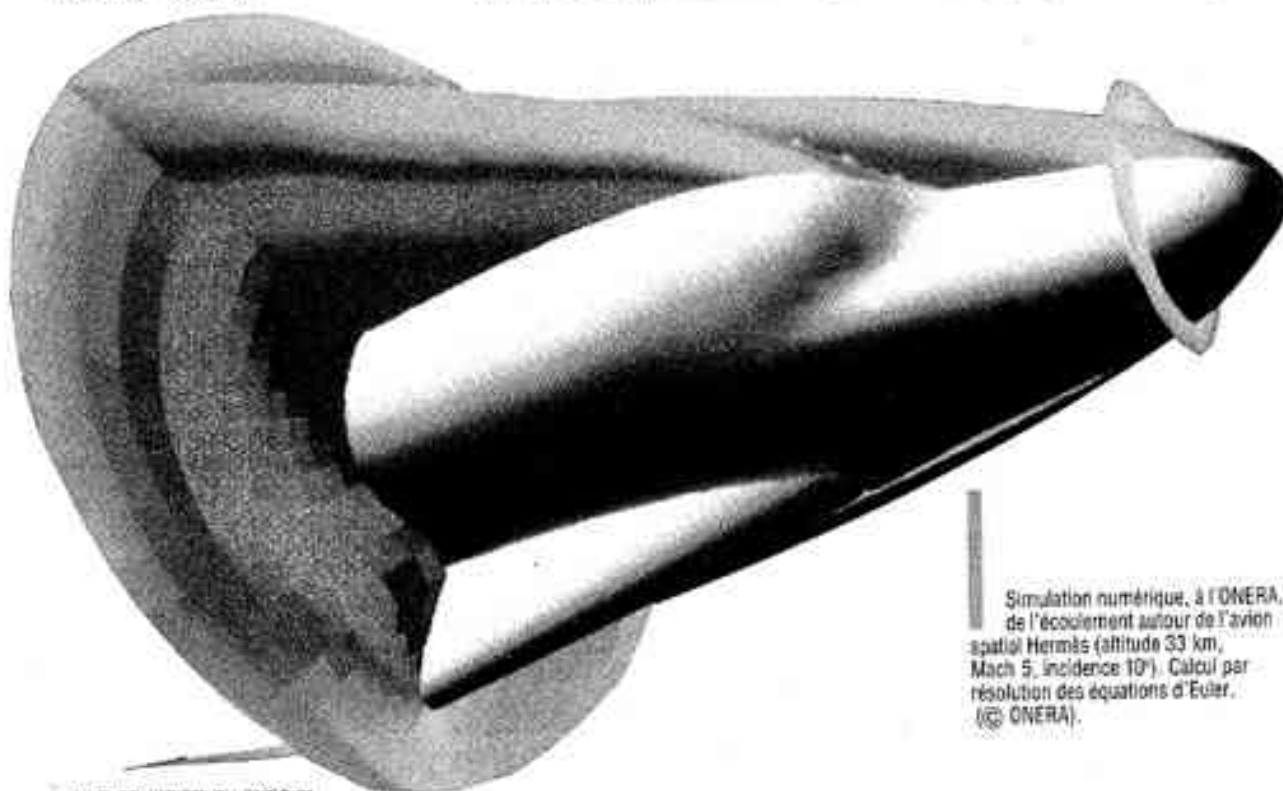
Notons que l'hypothèse de viscosité nulle ou de fluide parfait n'est jamais strictement observée en réalité, bien que d'un grand intérêt pratique, tout particulièrement dans le cas des écoulements libres éloignés des parois. Par ailleurs, le rôle prépondérant joué naturellement par la masse volumique conduit à distinguer les fluides compressibles et les fluides dits incompressibles ou en situation isovolume, cette dernière caractéristique pouvant s'appliquer aux liquides et de façon approchée aux gaz se déplaçant à faible vitesse, dans des champs de température uniforme.

En dépit du travail considérable effectué antérieurement sur la nature même des fluides, de larges champs d'étude restent ouverts. C'est le cas des écoulements sanguins, complexes par la nature du sang mais aussi compte

tenu de la déformation constante des veines et des artères (hémorhéologie). C'est le cas également des écoulements polyphasiques, soit liquide-gaz pour les évaporateurs-condenseurs, soit gaz-solide sous forme de poudre dispersée pour la combustion du charbon en lit fluidisé. C'est le cas encore des écoulements en milieux poreux, qu'il s'agisse de matériaux de construction ou du sous-sol avec l'extraction pétrolière.

Quelles vitesses et à quelles échelles ?

Parler du mouvement d'un fluide, c'est se donner, de fait, un repère d'observation, en général une paroi solide, et considérer les mouvements relatifs du fluide dans ce repère. La gamme des vitesses relatives est extrêmement vaste, de quelques millimètres par jour



Simulation numérique, à l'ONERA, de l'écoulement autour de l'avion spatial Hermès (altitude 33 km, Mach 5, incidence 10°). Calcul par résolution des équations d'Euler. (© ONERA).



Archimède. Historiquement, Archimède (287-212 av. J.-C.), est le précurseur de l'hydrostatique avec son principe : « Tout corps plongé dans un liquide subit une poussée verticale, dirigée de bas en haut, égale au poids du fluide déplacé et appliquée au centre de gravité de ce corps ». (© Palais de la Découverte).



Henri de Pitot (1695-1771), physicien français, est l'inventeur d'un appareil très simple mesurant la vitesse locale des fluides : un tube comporte deux orifices qui, reliés à un manomètre, donnent la pression dynamique proportionnelle au carré de la vitesse. (© Académie des sciences - Photo J.-L. Charmet).



Sir Geoffrey Taylor (1886-1975), en Grande-Bretagne, contribua de façon décisive à la connaissance de la dispersion de particules au sein d'un fluide en mouvement. (© Académie des sciences - Photo J.-L. Charmet).

nes. Un exemple particulièrement éloquent de tourbillons ou de mouvements tournants est celui de la convection naturelle. Ainsi la modélisation, sur plusieurs millions d'années, de l'évolution d'un bassin sédimentaire montre la formation de structures conduisant à l'existence de zones chaudes très favorables à la transformation de la matière organique en pétrole.

La modernité de ces questions transparaît à travers bien des préoccupations actuelles : dans les transports, par exemple, à propos des hélicoptères et des interactions entre les sillages générés par les passages successifs des pales ; ou encore à propos de l'activité industrielle, dans le contrôle de la dispersion spatiale des effluents des cheminées ou des centrales thermiques.

Comprendre, simuler, prévoir...

Tous les moyens disponibles ont été ou sont employés pour mieux connaître les écoulements de fluides, avec une double prédominance de la formalisation mathématique et de l'approche expérimentale. Certes, les équations des fluides en mouvement sont écrites, mais elles n'ont pas de solutions générales disponibles, seulement un nombre intéressant de solutions particulières.

pour de l'eau dans les murs et sols à quelques kilomètres par seconde pour les vols hypersoniques.

La même variété se retrouve pour les dimensions d'écoulements, allant du dixième de millimètre pour les capillaires à plusieurs dizaines de kilomètres en météorologie. Mais, dans tous les cas, la notion de point matériel familière au jeune initié à la mécanique fait place à la notion de particule fluide, ou de volume élémentaire représentatif en milieu poreux.

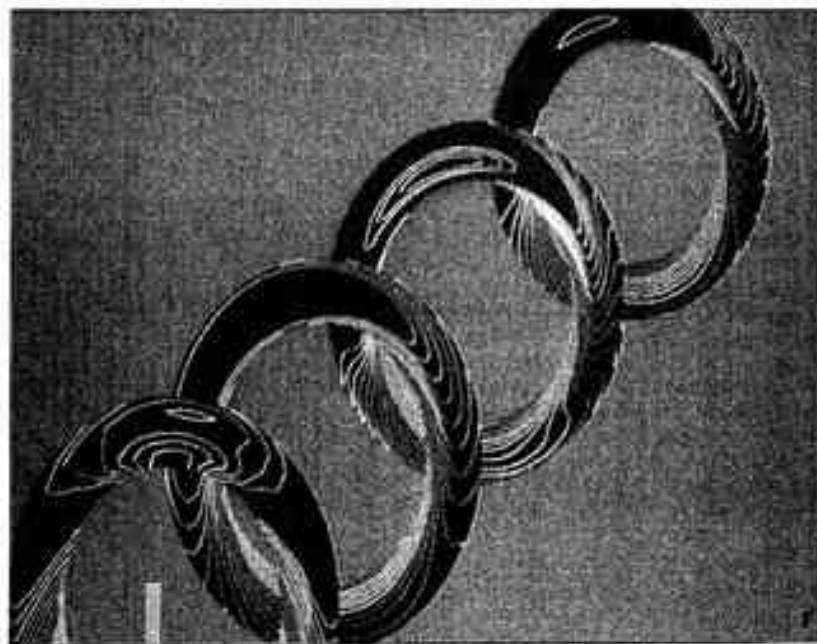
Trois exemples récents de haute technologie et de grande diffusion médiatique illustrent la diversité des échelles : la lubrification des pompes du troisième étage de la fusée européenne Ariane, la rentrée hypersonique dans l'atmosphère de la future navette spatiale Hermès et, enfin, la prévision météorologique planétaire.

Laminaire ! tourbillons ! et turbulent !

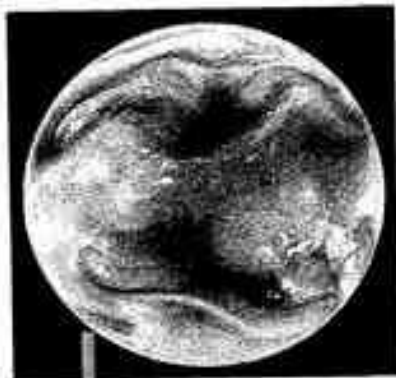
Quel vaste problème soulevé par ces trois mots-là, puisqu'il s'agit d'une des questions les plus ardues et non résolues totalement à ce jour. Ainsi, dans un tube alimenté de façon constante, on observe soit le régime laminaire non perturbé, soit le régime turbulent avec, autour des valeurs moyennes, des fluctuations de vitesses aléatoires et tridimensionnelles.

Si les critères de transition entre régimes sont bien répertoriés, leur

compréhension profonde reste encore à préciser, probablement en relation avec des comportements non linéaires. Toutefois, entre ordre parfait et désordre total, des situations intermédiaires existent, telles des structures périodiques, reflets d'instabilités inter-



Simulation numérique, à l'ONERA, de l'écoulement dans un compresseur axial en présence d'hétérogénéités d'alimentation. Evolution de la distorsion à la traversée du compresseur (coupes transversales : lignes de niveau représentant la pression totale). (© ONERA).



La Terre observée par le satellite METEOSAT le 12-12-1983 à 5 h 30, dans la gamme des longueurs d'onde comprise entre 5,7 et 7,1 microns : seule la vapeur d'eau atmosphérique est alors visible. Les zones sont d'autant plus claires qu'elles sont chargées d'humidité. (© CNRS - Photo METEOSAT/LMD)

► Pour la conduite des expériences, plus qu'en tout autre domaine de la physique, on relève l'utilisation intensive de maquettes, le plus souvent d'échelle réduite. L'expérimentation numérique et physique permet, par exemple, l'estimation par le calcul des vents à haute altitude au-dessus des chaînes de montagnes et la localisation des microclimats, ou encore la simulation des marées pour les installations portuaires ou côtières par une maquette tournante.

Prévoir est un souci constant et ambitieux, aussi indispensable à l'industrie qu'au développement de la recherche cognitive. L'emploi intensif des outils expérimentaux modernes et des plus puissants calculateurs a élargi considérablement nos capacités en ce domaine. Il n'est pas possible d'envisager ici de dresser un état exhaustif des écoulements pouvant être prévus. Citons seulement, à titre d'exemple, quelques problèmes en cours de développement comme la combustion interne dans les moteurs automobiles, l'habitat et le confort thermique, et le séchage de produits industriels ou agro-alimentaires sous forme de lits granulaires.

■ Georges Chuenay, directeur de recherche au CNRS, Institut de mécanique des fluides à Toulouse (UA 5 CNRS), 31000 Toulouse.

■ Michel Combarous, professeur à l'université de Bordeaux I, Laboratoire énergétique et phénomènes de transfert (UA 873 CNRS), École nationale supérieure des arts et métiers, esplanade des Arts et métiers, 33605 Talence.

Les écoulements turbulents

Rafales de vent, fumée d'incendie, agitation d'un torrent, sillage d'un navire, circulation des masses atmosphériques : autant d'exemples d'écoulements « turbulents » de fluides dont les filets s'enchevêtrent de manière inextricable.

■ Michel Combarous

Lorsque la vitesse et la dimension typiques de l'écoulement d'un fluide visqueux augmentent, on observe une spectaculaire transition d'un régime régulier ou « laminaire », où les filets fluides glissent les uns sur les autres, à un régime irrégulier et chaotique ou « turbulent », où ils s'enchevêtrent de manière inextricable. Les rafales du vent, la fumée d'un incendie, l'agitation d'un torrent, les variations de l'atmosphère illustrent la turbulence des écoulements fluides. Ce chaos spatial et temporel traduit la coexistence d'une large gamme de tourbillons avec un mouvement moyen bien défini.

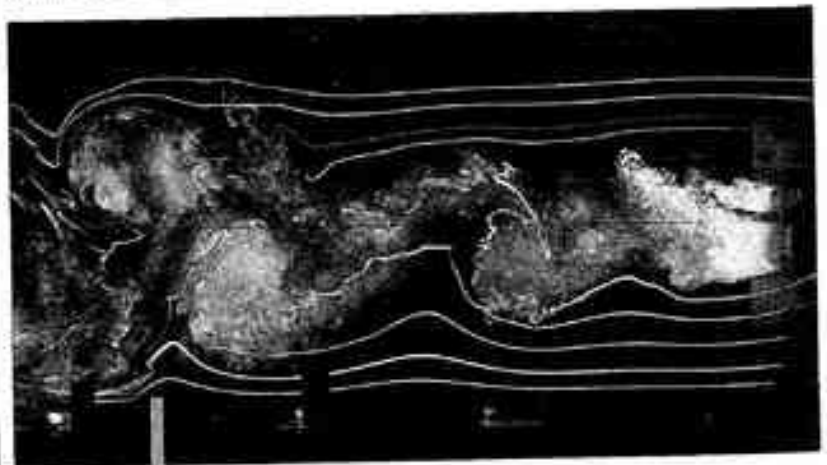
L'effet essentiel de la turbulence est un accroissement spectaculaire de la diffusion au sein du fluide, c'est-à-dire des échanges de toute nature entre les diverses parties de l'écoulement. Du colorant injecté en régime laminaire reste identifiable, sa diffusion sous l'effet de l'agitation moléculaire étant très lente. Dans un écoulement turbulent, il disparaît, la diffusion turbulente entraînant une homogénéisation très rapide du milieu. Des effets analogues se produisent pour toutes les grandeurs attachées au fluide : température,

quantité de mouvement, etc. Ainsi, les traînées dues au frottement sont accrues et celles liées aux décollements diminuées. Les échanges de chaleur, les réactions chimiques et notamment la combustion, la dilution des contaminants sont considérablement facilités.

La turbulence est encore aujourd'hui un défi en raison d'une difficulté fondamentale : la non linéarité des lois du mouvement des fluides entraîne un couplage fort entre toutes les échelles de tourbillons. De ce fait, la capacité de prévoir l'évolution des grosses structures est limitée par l'effet des petites d'où, par exemple, la difficulté de la prévision météorologique. Par ailleurs, l'universalité du comportement moyen des petites échelles est compromise par l'influence des grandes, d'où l'insuccès fréquent des méthodes statistiques.

Des progrès considérables ont cependant été acquis récemment : au plan conceptuel grâce à la théorie des systèmes dynamiques non linéaires et au plan pratique par la mise au point de méthodes de prévision acceptables dans la majorité des cas.

■ Michel Combarous, professeur à l'université Aix-Marseille II, Institut de mécanique statistique de la turbulence (UM 33 CNRS), 12, avenue du Général Leclerc, 13003 Marseille.



Visualisation du sillage turbulent d'un ensemble de barreaux : à noter la coexistence de grosses structures organisées et de mouvements tourbillonnaires de diverses échelles et la diffusion des colorants dans la zone turbulente. (© IMST)

Les souffleries

Jean-Paul Caressa

En France, environ 150 laboratoires publics et privés sont équipés de souffleries permettant de reproduire les écoulements de

fluides autour de véhicules terrestres et spatiaux. Les unes, subsoniques, simulent des vitesses inférieures à Mach 0,7 pour lesquelles les effets de compressibilité de l'air peuvent être négligés. Dans les souffleries transsoniques, le domaine de vitesse simulée se situe entre Mach 0,8 et Mach 1,3. Il va jusqu'à Mach 5 dans les installations supersoniques et au-delà dans les hypersoniques, deux domaines où

commencent à se manifester les effets de gaz réel dans les fluides à haute température en aval des ondes de choc.

Les souffleries sont caractérisées par : leur principe (à retour ou en circuit ouvert), leur mode de fonctionnement (continu ou à rafales), la nature (ouverte ou guidée) et les dimensions de leurs veines, le nombre de Reynolds et le niveau de turbulence de l'écoulement.

Les progrès de l'informatique et des moyens de mesure ont conduit à une transformation profonde des essais en soufflerie. Parmi les nouvelles installations en cours de réalisation, on peut citer : la soufflerie cryogénique transsonique européenne (ETW) et la soufflerie hypersonique à haute enthalpie étudiée par l'Office national d'études et de recherches aéronautiques (ONERA), à Toulouse, dans le cadre du projet Hermès.

Jean-Paul Caressa, directeur de recherche au CNRS, directeur du Laboratoire d'aérothermique (LP 1301) du CNRS, 4 ter, route des Gardes, 92190 Meudon.



Vue d'ensemble de la soufflerie elliptique de l'Institut de mécanique des fluides de Marseille (UM 34 CNRS). (© CNRS-IMFM, Photo A. Soldeville)

Vélocimètres

A fil chaud ou à laser, les vélocimètres permettent de mesurer des fluctuations de vitesse extrêmement rapides à l'intérieur d'écoulements turbulents.

Régis Dumas, Max Elena

Le fil chaud est le capteur le plus ancien. Il s'agit d'un fil de Wolaston en platine de très petit diamètre, 1 à 5 μ , et de 0,4 à 1,5 mm de longueur, tendu entre deux broches fines et orientées face au vent. Ce fil, chauffé par un courant électrique, est plus ou moins refroidi en fonction de la vitesse du gaz. Il s'ensuit des variations de tensions électriques à ses bornes qui sont amplifiées puis, en général, numé-

risées et traitées avec un micro-ordinateur. Lorsque l'on veut mesurer les différentes composantes de la vitesse, il est nécessaire de recourir à des sondes à deux, voire à quatre fils. Le fil chaud constitue également un excellent thermomètre utilisable, sous réserve de sa tenue mécanique, dans tous les écoulements fluctuants. Dans les liquides, on utilise de préférence le film chaud, plus solide, constitué d'un ruban très fin et conducteur déposé sur un support en matière isolante.

La vélocimétrie laser est un moyen optique de mesurer la vitesse instantanée de particules assez fines pour suivre l'écoulement.

En pratique, le montage optique dit « à franges » est le plus largement utilisé et commercialisé. On forme un réseau de franges d'interférence à l'intersection de deux faisceaux issus d'une même source laser. Une particule traversant successivement des franges sombres et brillantes diffuse un flux de lumière modulé. Un photomultipli-

teur détecte la fréquence de cette modulation qui est proportionnelle à la vitesse de la particule. Le signal électrique issu du photomultiplicateur est généralement traité par un appareillage électronique, puis numérisé pour être envoyé à un micro/mini-ordinateur.

Le vélocimètre laser permet de mesurer simultanément deux, voire trois composantes de la vitesse, en créant des réseaux de franges qui ont des directions différentes et des caractéristiques distinctes. L'utilisation de deux ou trois longueurs d'onde (deux ou trois couleurs) du laser est la méthode la plus couramment employée pour former les réseaux de franges.

Régis Dumas, directeur de recherche au CNRS, Institut de mécanique statistique de la turbulence, (UM 13 CNRS).

Max Elena, chargé de recherche au CNRS, Institut de mécanique statistique de la turbulence, (UM 33 CNRS), université Aix-Marseille II, 12, avenue du Général Leclerc, 13003 Marseille.

La mécanique des fluides numérique

Entre les premiers travaux numériques des années trente et les calculs actuels sur les super ordinateurs, une véritable discipline est née qui permet de relayer le travail du théoricien et de l'expérimentateur.

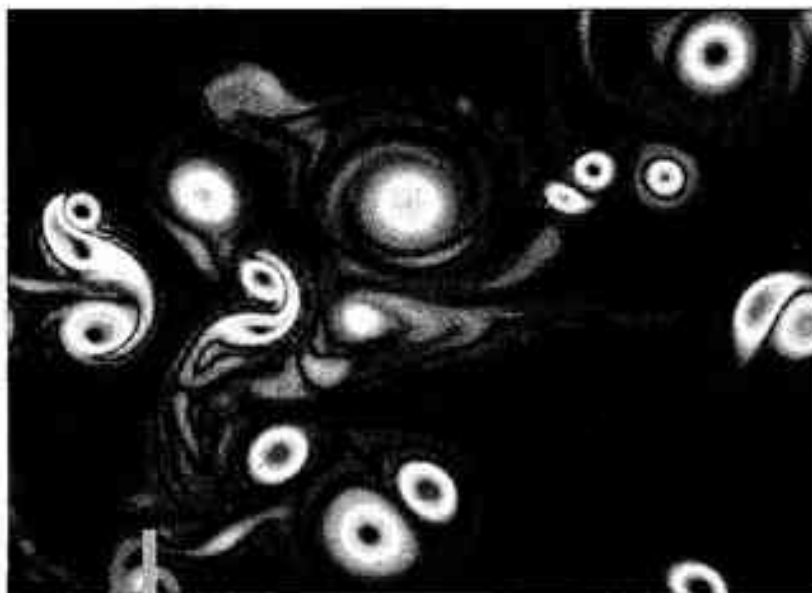
Roger Peyrat

Depuis une vingtaine d'années s'est développé un nouveau moyen d'étude de la mécanique des fluides dont l'outil principal est l'ordinateur. L'ordinateur apparaît d'abord comme support de l'analyse théorique et outil de vérification des modèles, mais aussi comme le seul moyen de résolution de problèmes complexes que l'analyse ne peut appréhender dans toute leur généralité et que l'expérimentation ne peut couvrir.

Ainsi l'utilisation du calcul numérique a donné naissance à une nouvelle discipline : la mécanique des fluides numérique. Les méthodes numériques jouent aujourd'hui dans les divers domaines de la recherche fondamentale un rôle aussi important que celui des méthodes analytiques et expérimentales. Ce rôle devient par ailleurs, au fil des années, prépondérant en ce qui

concerne la recherche appliquée et industrielle, sans compter tout ce qui a trait au développement technologique.

La démarche qui préside à l'étude d'un problème de mécanique des fluides par voie numérique présente plusieurs aspects : modélisation, analyse numérique, informatique et interprétation physique. C'est dire qu'il s'agit là d'une discipline dont les frontières avec d'autres sciences sont loin d'être rigides et imperméables. Sa spécificité, sa difficulté sûrement mais aussi l'une de ses richesses, apparaît dans la nécessité d'ouverture qu'elle se doit d'avoir vers les techniques modernes. Ainsi, le développement croissant et continu des possibilités des ordinateurs, associé d'ailleurs aux progrès de l'analyse numérique, permet sinon de résoudre complètement, du moins d'avancer dans la résolution de quelques-uns des problèmes fondamentaux de la mécanique des fluides, comme celui de la turbulence.



Dans les écoulements turbulents bidimensionnels apparaissent des « structures cohérentes » (ou tourbillons) qui se déplacent par couples et interagissent entre elles, les interactions pouvant être élastiques ou inélastiques. La simulation numérique permet là de reproduire fidèlement et même de devancer l'expérience de laboratoire. (Cliché C. Basdevant, Laboratoire de météorologie dynamique du CNRS).

Les tous premiers travaux numériques en mécanique des fluides remontent aux années 30. Ainsi, en 1933, l'Anglais A. Thom calculait, sur une machine de bureau, l'écoulement d'un fluide visqueux autour d'un cylindre. Mais c'est pendant, et surtout après la seconde guerre mondiale que, peu à peu, l'application du calcul s'est développée.

Ces efforts étaient méritoires étant donné les possibilités des ordinateurs des années 50-60. Mais c'est dans ces conditions que la science numérique s'est forgée en demandant à la réflexion ce que ne pouvait lui donner la technologie. On assiste, aujourd'hui, à une interaction très forte entre méthodes et ordinateurs. Cette interaction se traduit par la construction de méthodes et d'algorithmes spécialement adaptés à la technologie de l'ordinateur (calculateur vectoriel et parallèle) ou, d'une façon complètement opposée, par la construction de calculateurs adaptés aux algorithmes ou aux formulations elles-mêmes des problèmes (méthode de « gaz sur réseau », par exemple).

D'une manière courante, la résolution numérique de problèmes de mécanique des fluides revient à celle d'équations aux dérivées partielles à deux ou trois variables d'espace et à une variable de temps. Les méthodes de résolution sont, le plus souvent, fondées sur une discrétisation de l'espace et du temps, associant à chaque point de cet espace-temps discrétisé les quantités qui définissent le mouvement considéré, c'est-à-dire, dans les cas usuels, parmi les plus simples du point de vue physique, la vitesse, la pression et la température du fluide. On arrive ainsi, pour représenter correctement le mouvement d'un gaz autour d'un corps tridimensionnel, comme la navette spatiale Hermès par exemple, à une quantité gigantesque d'inconnues que seul un super ordinateur peut traiter. Ensuite, le traitement des résultats doit faire appel à des moyens sophistiqués de visualisation graphique, éventuellement animée. Enfin, ces résultats seront interprétés et utilisés selon le but de la recherche entreprise.

Ainsi nombreux sont les problèmes de mécanique des fluides posés par la nature, la technique ou le développement industriel qui ne sauraient recevoir de solution sans l'aide de l'ordinateur et de son utilisation intelligente.

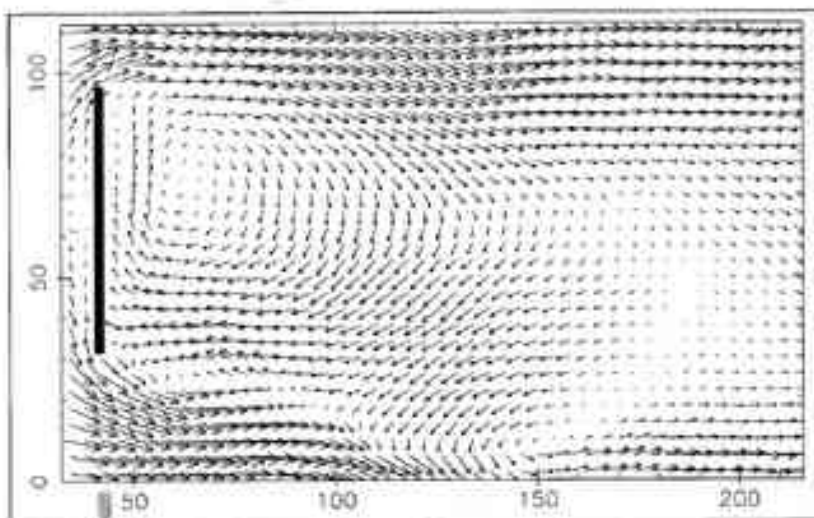
Roger Peyrat, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de mathématiques, université de Nice, Parc Valrose, 06034 Nice Cedex.

Gaz sur réseaux

On peut simuler l'écoulement d'un fluide continu en remplaçant les particules réelles par des objets fictifs se déplaçant sur un réseau.

Pierre Lallemand

Au lieu de considérer un fluide comme un milieu continu, la dynamique moléculaire traite les particules constitutives et détermine l'évolution temporelle de leurs positions et vitesses. Ceci est très lourd si l'on veut décrire avec précision les interactions entre particules. Dans la méthode des gaz sur réseaux, on remplace les particules réelles par des objets fictifs qui se déplacent à vitesse constante le long des liens d'un réseau régulier avec possibilité de subir des collisions aux nœuds du réseau. En choisissant convenablement les lois de déplacement des particules et les règles qui régissent leurs collisions, on montre à l'aide de la mécanique statistique que le comportement moyen du système (à une échelle grande devant le pas du réseau sous-jacent) est celui d'un gaz réel. Ayant déterminé par la théorie la vitesse du son et les valeurs des coefficients de transport, on connaît les valeurs des nombres de Mach et de Reynolds des écoulements



Écoulement tridimensionnel stationnaire d'un fluide incompressible autour d'un disque à un nombre de Reynolds de 170 : détails d'une coupe diamétrale après 3 500 pas d'automate (simulation sur CRAY 2 du Centre de calcul vectoriel pour la recherche, effectuée par J.-P. Rivet, Observatoire de Nice).

simulés, et l'on peut invoquer les lois de similitude pour les comparer à des écoulements réels.

De telles simulations ont été réalisées avec succès dans des situations expérimentales bi- et tridimensionnelles pour des écoulements visqueux à bas nombre de Reynolds, ainsi que pour des écoulements diphasiques et des mélanges réactifs ou non. Les algorithmes correspondants sont d'une très

grande simplicité. Ils peuvent être mis en œuvre sur des machines spécialisées (automate cellulaire) qui présentent un excellent rapport efficacité/coût.

Pierre Lallemand, directeur de recherche au CNRS, responsable du GRECO « Expérimentation numérique » (GRECO 70 CNRS), Ecole normale supérieure, Laboratoire de physique, 24, rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 45.

Les fluides et l'espace

De l'instant de son lancement à son évolution en orbite voire à son retour sur terre, un engin spatial soulève des problèmes de mécanique des fluides tout à fait spécifiques, hors de l'expérience de l'aérodynamique et de l'hydrodynamique classiques.

**Jean-Claude Lengrand,
Georges di Nicola**

L'ère spatiale a commencé par la mise au point de lanceurs et la mécanique des fluides a été à la base de la réalisation de leur système propulsif : tuyères des moteurs-fusées, pompes d'alimentation des moteurs à ergols liquides. Ces éléments ne mettent pas en jeu des principes physiques originaux ; mais la réunion d'exigences très sévères de performance, de fiabilité, d'encombrement et

de poids est caractéristique du domaine spatial.

• Le ballottement d'une masse importante de liquide dans un réservoir peut aller jusqu'à rendre un satellite incontrôlable. Par ailleurs, l'apesanteur pose le problème de l'alimentation des propulseurs à partir des réservoirs d'ergols. Il faut, d'une part, éviter que le gaz de pressurisation forme des bulles au sein du liquide et, d'autre part, maintenir le liquide au contact de l'orifice de sortie du réservoir. Sur terre, ces problèmes sont résolus « naturellement » par l'intervention de la pesanteur. Dans l'espace, l'une des solutions

consiste à exploiter les forces de tension superficielle.

• Les engins spatiaux sont contrôlés par des jets de gaz issus de tuyères propulsives. L'impact des jets sur des éléments tels que panneaux solaires ou antennes est difficile à éviter. Lors de la conception de l'engin, il faut prévoir les effets dynamiques et thermiques de l'impact sur les surfaces touchées. Un problème analogue se pose au cours des manœuvres de rendez-vous et d'accostage, par exemple entre l'avion spatial *Hermès* et la station orbitale européenne *Colombus*.

• Un satellite doit évacuer par rayonnement la chaleur qu'il reçoit du soleil et celle que dégagent son électronique et ses systèmes propulsifs. Des systèmes nouveaux sont à l'étude : deux parties d'un engin spatial pourraient s'échanger des faisceaux de fines gouttelettes de liquide. Les gouttelettes ayant un rapport surface/masse élevé auraient un excellent coefficient d'échange par rayonnement avec le milieu ambiant.

► • L'interaction avec l'atmosphère doit être prise en compte lorsqu'un satellite évolue en orbite « basse », en raison de la présence d'une atmosphère résiduelle. Ainsi, la durée de vie d'un satellite d'observation militaire est de l'ordre du mois en raison de la traînée qu'il subit (force de freinage exercée par l'atmosphère). La station orbitale européenne Columbus aura le même problème, mais pourra être ravitaillée en ergols par l'avion spatial Hermès, et ses propulseurs compenseront sa traînée. La prévision des forces de traînée relève de la dynamique des gaz raréfiés. C'est-à-dire que l'on considère le gaz comme un milieu discret (composé de molécules) alors que la mécanique des fluides classique le considère comme un milieu continu.

• Dans les années 80, sont apparus des projets de véhicules hypersoniques,

hypersonique, la mesure des paramètres non accessibles au calcul, les modèles mathématiques, les méthodes numériques, les moyens d'essai et la métrologie associée.

On profite, bien entendu, des progrès récents dans le domaine du calcul (ordinateurs et codes) et dans le domaine des moyens d'essai et de mesure, et on s'efforce de progresser dans la connaissance des processus physiques tels que la transition laminaire-turbulent, la turbulence, la physique des gaz (thermochimie, propriétés de transport, rayonnement) et les interactions gaz-paroi (catalycité, coefficients d'accommodation, forme de l'interface d'ablation).

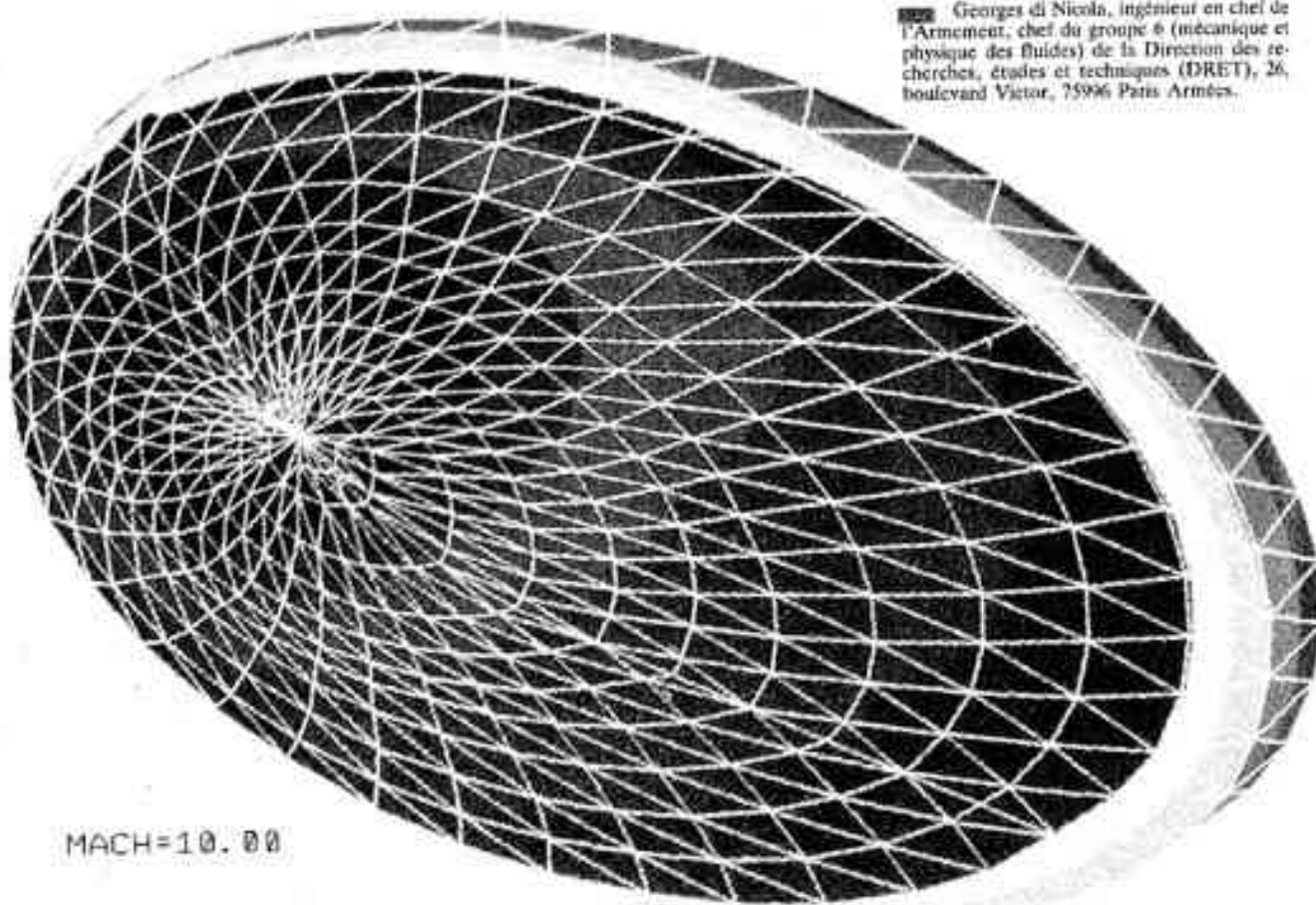
A cet effet, le CNRS et la DRET lancent une action concertée entre laboratoires du CNRS, de l'Université et de l'Office National d'Etudes et de Re-

cherches Aérospatiales, avec la participation des industriels impliqués, à savoir l'Aérospatiale et AMD-BA.

Les exemples cités ont montré la variété des problèmes de mécanique des fluides dans le domaine spatial. Leur complexité est telle qu'une approche entièrement théorique est rarement possible. Mais par ailleurs les conditions particulières rencontrées dans l'espace sont difficiles à simuler en laboratoire. La collaboration étroite entre théoriciens et expérimentateurs qui a permis les réalisations remarquables de ces dernières années est donc toujours une nécessité.

■ Jean-Claude Lefrand, directeur de recherche au CNRS, responsable de l'équipe de recherche Gaz raréfiés - Hypersonique, Laboratoire d'aérothermique du CNRS, 4 ter, route des Gardes, 92190 Meudon.

■ Georges di Nicola, ingénieur en chef de l'Armement, chef du groupe 6 (mécanique et physique des fluides) de la Direction des recherches, études et techniques (DRET), 26, boulevard Victor, 75996 Paris Armées.



MACH=10.00

comme celui de l'avion spatial Hermès. Il faut prévoir l'échauffement et les caractéristiques aérodynamiques de ces véhicules avec la meilleure précision possible pour les dimensionner au plus juste. Doivent être considérés avec une grande attention la modélisation physique des problèmes d'aérodynamique

Carte des nombres de Mach locaux du véhicule de transfert orbital tels qu'ils sont prévus par le calcul. Le véhicule de transfert orbital pourra effectuer des changements d'orbite en exploitant les faibles forces aérodynamiques qu'il subit en traversant la haute atmosphère. La face exposée à l'écoulement est une calotte d'ellipsoïde prolongée par un tronc de cône. (IIC) Avions Marcel Dassault - Bréguet Aviation 15/03/88).

Le cas d'Hermès

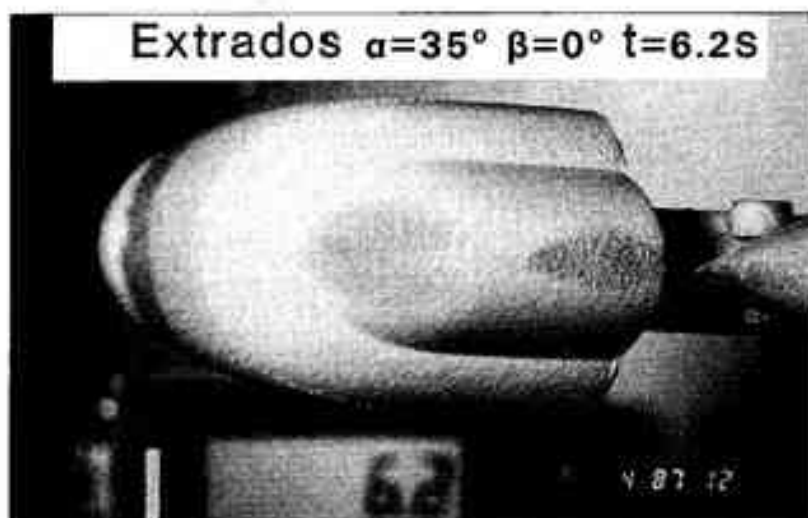
Le fuselage de la navette européenne Hermès aura à affronter des phénomènes physico-chimiques inhabituels en aérodynamique. Leur prévision mobilise de nombreuses équipes.

Thierry Alziary de Roquefort

Comparé à la navette américaine, l'avion spatial européen Hermès est nettement plus petit (10 m d'envergure au lieu de 24) mais sa réalisation est beaucoup plus ardue. En effet la mission type comporte la possibilité de déport latéral de plus de 2 000 km par rapport au plan de l'orbite : l'avion devra donc disposer d'une certaine manœuvrabilité en vol hypersonique.

Avec une soute de 3 m de diamètre, le fuselage est proportionnellement plus gros que celui de la navette américaine ce qui pose des problèmes aérodynamiques aux basses vitesses. Mais la question majeure est celle de l'échauffement aérothermique lors de la rentrée dans l'atmosphère : la taille réduite d'Hermès a un effet défavorable qui rend le problème de la protection thermique beaucoup plus difficile à résoudre.

Il est techniquement impossible de reproduire complètement en soufflerie



Visualisation, au moyen d'une peinture thermosensible, du flux de chaleur sur l'extrados d'une maquette type Hermès à Mach 8,15 et 35° d'incidence. On remarque deux zones de flux élevé (rose) sur la verrière et le dos du fuselage. (Cliché J.-L. Da Costa - UA 191).

les conditions rencontrées lors d'un vol d'Hermès à très haute altitude. La méthodologie retenue est donc de valider des codes de calcul en s'assurant que l'effet des divers paramètres est correctement prévu pour des cas tests simples qui font l'objet d'études détaillées dans plusieurs souffleries.

En raison des hautes températures au voisinage du nez, l'écoulement est le siège de diverses réactions chimiques. De la nature de la paroi peut dépendre la recombinaison de certaines espèces chimiques. Ces effets sont inhabituels en aérodynamique, et leur prévision nécessite un gros effort de recherche et

de développement qui rassemble les équipes européennes et auquel participent plusieurs laboratoires du CNRS.

A partir de la fin de l'année 1988, expérimentateurs et numériciens devraient pouvoir confronter leurs résultats en vue de la validation des outils numériques qui permettront au maître d'œuvre (la société AMD-BA) de définir complètement le projet.

Thierry Alziary de Roquefort, professeur à l'université de Poitiers, responsable du Laboratoire d'études aérodynamiques (UA 19) CNRS, université de Poitiers, 43, rue de l'Aérodrome, 86000 Poitiers.

L'aérodynamique classique

L'amélioration de la manœuvrabilité des avions et la réduction de leur traînée exigent des aérodynamiciens qu'ils élucident les mécanismes essentiels gouvernant les écoulements.

Thierry Alziary de Roquefort

La structure des avions récents ou en projet fait très largement appel aux matériaux nouveaux dont la proportion en masse atteint 25 % sur un avion comme le Rafale. Il en résulte un allègement de la structure et la possibilité de supporter un facteur de charge élevé. D'autre part, la généralisation des commandes de vol électriques gérées par des calculateurs

puissants et l'utilisation de vérins rapides pour actionner les gouvernes rendent possible des modes de pilotage nouveaux et étendent le domaine de vol de l'avion.

L'aérodynamicien bénéficie donc d'une latitude plus grande pour la conception géométrique de l'appareil mais simultanément il est confronté à des problèmes nouveaux posés, par exemple, par la possibilité de faire voler l'avion à des incidences très élevées

ou d'avoir à tenir compte du caractère fortement instationnaire de l'écoulement dû au changement rapide de l'attitude de l'appareil.

Les moyens actuels permettent au concepteur de tester dans un environnement informatique interactif l'influence des divers paramètres et de rechercher une première optimisation de la forme de l'appareil. À l'issue de cette phase, des tests en soufflerie permettent d'étudier de façon détaillée les phénomènes mal pris en compte par le modèle numérique.

Dans le cadre de ce processus, les laboratoires de recherche interviennent à plusieurs niveaux. Au plan de la modélisation numérique d'abord, par la recherche d'algorithmes plus performants ou prenant mieux en compte les décollements dus aux effets de la viscosité de l'air. Sur le plan expérimental

► ensuite, par le développement de techniques nouvelles qui, après quelques années de maturation dans les laboratoires, peuvent parfois être mises en œuvre dans des souffleries industrielles comme ce fut le cas, par exemple, pour l'anémométrie laser. Mais c'est surtout en essayant d'élucider les mécanismes physiques essentiels qui gouvernent les écoulements, et en élaborant les modèles mathématiques qui permettent de les prévoir que les laboratoires du CNRS participent au progrès de l'aérodynamique.

Un exemple de recherche est fourni par la modélisation de l'aérodynamique instationnaire de l'avion soumis à la turbulence atmosphérique. Le vol en milieu turbulent, outre la fatigue de la structure et l'inconfort des passagers pour un avion civil, pose des problèmes critiques pour un avion de combat volant à très basse altitude. Le pilote est alors soumis à des facteurs de charge instationnaires très invalidants dans une plage de fréquences de 0 à 10 Hz environ, ce qui augmente le risque d'erreur de pilotage, d'où un réel danger compte tenu de la proximité du sol (100 à 150 m). La solution consiste à utiliser un contrôle actif sur les commandes de vol pour absorber la turbulence, ce qui nécessite une bonne connaissance de l'entrée (turbulence) et des réactions de l'appareil pour défi-

nir les lois de commande appropriées. La figure illustre ce type de recherche qui combine le calcul et les essais en soufflerie et en vol.

Un autre exemple de recherche est constitué par la réduction de la traînée des avions de transport. Cet objectif est devenu essentiel au cours des années 70 en raison de la hausse du prix du pétrole, et il reste justifié par le fait que le carburant représente environ 20 % du coût opérationnel direct d'un appareil. La traînée est constituée, pour près de la moitié, par la traînée de frottement de la couche limite qui est turbulente sur la majeure partie de la surface des avions actuels. Plusieurs laboratoires du CNRS étudient des dispositifs nouveaux appelés manipulateurs de turbulence qui provoquent une diminution locale du frottement turbulent. Il est trop tôt pour savoir si de tels dispositifs apparaîtront un jour sur des avions commercialisés, mais des essais en vol sont déjà en cours aux États-Unis et ces recherches appliquées contribuent aussi, à un niveau plus fondamental, au progrès des connaissances sur la turbulence.

Thierry Alnary de Roqueta, professeur à l'université de Poitiers, responsable du Laboratoire d'études aérodynamiques (UA 191 CNRS), université de Poitiers, 43, rue de l'Aérodrome, 86000 Poitiers.

Les voilures tournantes

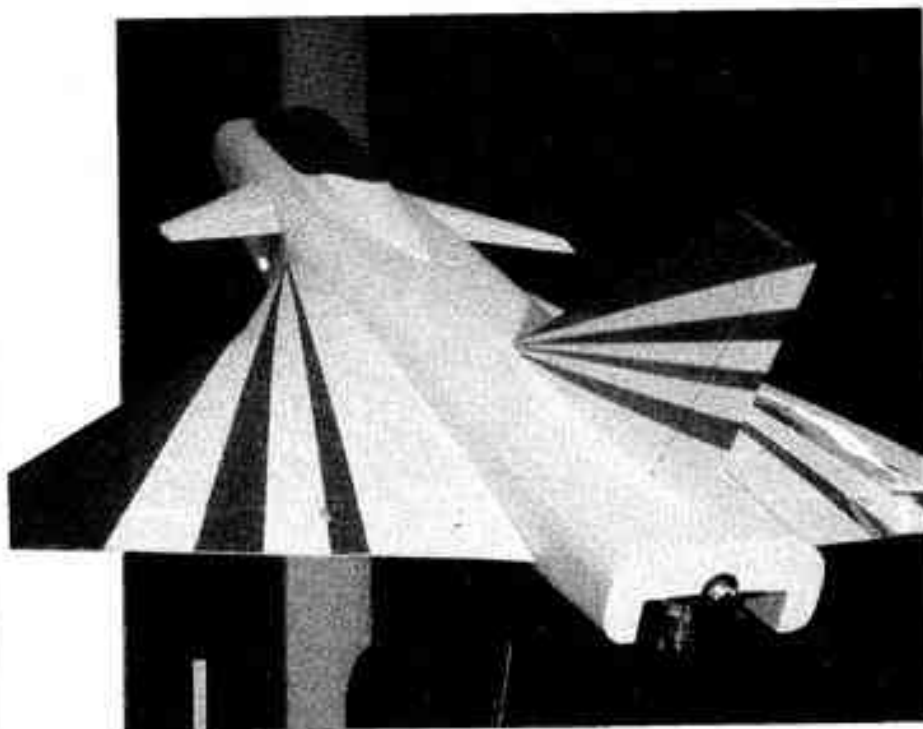
La modélisation des écoulements autour des pales d'hélicoptères ou d'hélices transsoniques a nécessité la mise au point de techniques de mesures instationnaires originales.

Christian Maresca

Les performances, dans différentes conditions de vol, des engins dotés d'hélices ou de rotors, sont tributaires des écoulements non-permanents et tri-dimensionnels générés autour et dans le sillage des pales. Leur amélioration et leur optimisation motivent les études de modélisation expérimentale et numérique de ces écoulements. Divers engins en service ou en projet doivent en profiter : hélicoptères à grande vitesse d'avancement (de l'ordre de 300 km/h), appareils propulsés par des hélices orientables en bout d'ailes permettant le décollage vertical puis le vol conventionnel d'avancement, avions à hélices rapides évoluant à haute altitude et grande vitesse (de l'ordre de 900 km/h).

Les développements expérimentaux ont conduit à l'élaboration de techniques de mesures d'écoulements non-permanents originales et performantes (voir l'article sur les vélocimètres). En particulier, la mesure de la circulation instantanée s'établissant autour de pales en rotation et le long de leur envergure a été mise au point pour la première fois en 1983, et appliquée depuis lors à la détermination des performances des voilures.

L'ensemble des données expérimentales acquises (traction, couple, champs de vitesses, circulation...) a permis l'établissement d'un certain nombre de lois synthétiques d'évolution, qui servent de base de validation et/ou d'amélioration aux méthodes de calcul actuellement développées pour les rotors comme pour les hélices. Ces études donnent lieu à de nombreuses collaborations de recherche entre l'Université, le CNRS, l'Aérospatiale, l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA) et, à l'étranger, la NASA-Ames. En outre, les études menées sur l'aérodynamique des voilures tournantes se concrétisent également par une participation active

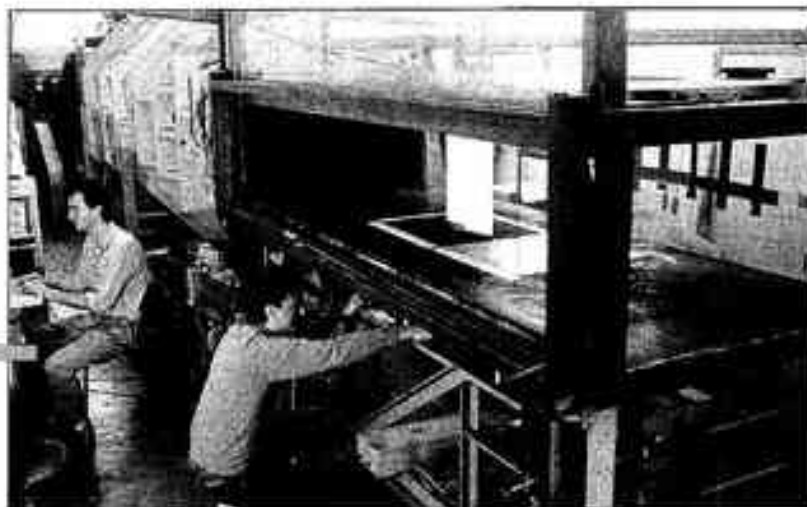


Maquette d'un avion type Rafale en soufflerie subsonique. Il s'agit d'une maquette instrumentée destinée aux essais en vol. (Cliché P. Ardonneau - UA 191).

à différentes opérations européennes de retombées et d'applications immédiates pour les constructeurs aéronautiques, telles que la construction de l'avion de transport à hélices rapides et le projet d'appareil convertible à décollage vertical (projet Eureka).

Christian Maresca, directeur de recherche, responsable de l'Institut de mécanique des fluides de Marseille (UM 34 du CNRS), université Aix-Marseille II, 1, rue Hommerat, 13003 Marseille.

Etude en soufflerie d'un élément de pale d'hélicoptère. Cet élément est animé d'un mouvement oscillatoire qui permet de reproduire la variation des incidences rencontrées par la pale au cours de sa rotation. (© CNRS - IMFM - Photo A. Soldeville)



Résistance de vagues, tenue à la mer

Pour avancer, un navire doit vaincre non seulement la résistance visqueuse de l'eau, mais, également, celle des vagues qu'il produit et qui l'accompagnent en aval. Les chantiers et les armateurs s'intéressent aussi aux oscillations du navire engendrées par la houle.

Daniel Euvrard, Gérard Delhommeau

Le problème de la résistance à l'avancement d'un navire en eau calme, qui conditionne la puissance installée nécessaire, peut être résolu si l'on connaît l'écoulement autour de la carène. On démontre que cet écoulement est régi par deux nombres adimensionnels, le nombre de Reynolds

$$R_e = \frac{CL}{\nu}$$

et le nombre de Froude

$$F = \frac{C}{\sqrt{g L}}$$

où C est la vitesse de route constante du navire, L sa longueur, g l'accélération de la pesanteur et ν la viscosité cinématique du fluide. La résistance à

l'avancement peut être décomposée en deux termes, l'un fonction de R_e seul et sur lequel on ne peut guère agir, l'autre fonction de F seul et qu'on peut réduire en optimisant les formes de carène.

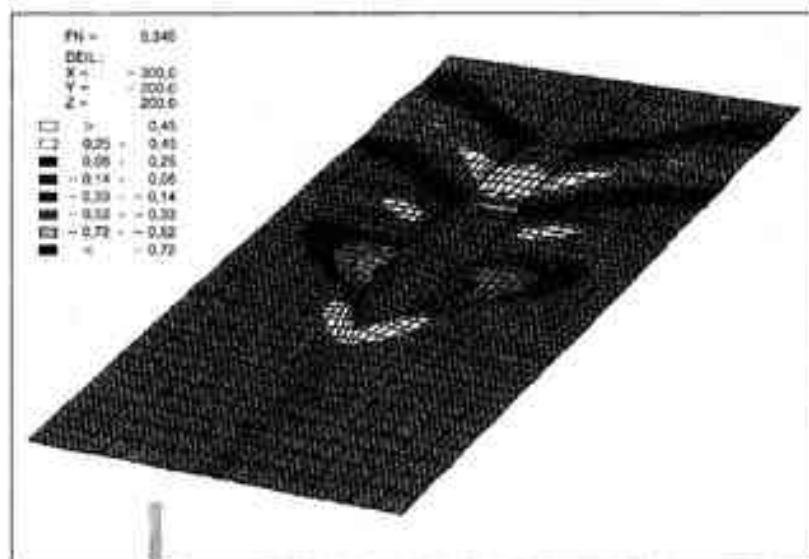
Le premier terme est la résistance visqueuse ; le second, dénommé « résistance de vagues » car il est lié aux vagues d'accompagnement en aval du navire, peut être calculé en fluide parfait.

Cet écoulement de fluide parfait dépend d'un potentiel satisfaisant l'équation de Laplace dans le fluide, ainsi que des conditions sur la surface libre, sur la carène et à l'infini.

Le problème de la tenue à la mer d'un navire (ou d'une plate-forme off-

shore), qui conditionne ses mouvements mais aussi son comportement en résistance et en fatigue structurales, se décompose en un problème de diffraction et six problèmes de rayonnement des ondes créées par les mouvements harmoniques du navire selon chacun de ses degrés de liberté : pilonnement, roulis, tangage... Chacun de ces 7 problèmes comporte l'équation de Laplace dans le fluide, ainsi que des conditions de surface libre, de carène et de rayonnement à l'infini.

Pour résoudre le problème de résistance de vagues, on découpe la carène et une partie de la surface libre en petites facettes sur lesquelles on répartit



Déformation de surface de la mer à l'avancée d'un chalutier avec bulbe. Image obtenue par voie numérique - code de calcul de résistance de vagues REVA. (UA 1217).

► des sources (dites « de Rankine ») et des doublets normaux. On écrit la matrice des influences mutuelles des différentes facettes, et la condition de glissement au centre des facettes conduit alors à un système algébrique linéaire.

Cette méthode permet de calculer l'écoulement autour de tous types de carènes, avec ou sans bulbe, en présence d'un fond et de parois. Elle peut être développée pour traiter des problèmes complexes tels que les interactions entre carènes de multicoques, la prise en compte des effets de portance pour les voiliers en gite et dérive et l'effet de surface pour les navires à coussin d'air.

Le code de calcul de résistance de vagues REVA a été développé au Laboratoire d'hydrodynamique navale (LHN) de l'École nationale supérieure de mécanique (ENSM) à partir de 1985.

Pour résoudre chacun des 7 problèmes conduisant à prédire la tenue à la mer, on engendre l'écoulement par des sources (plus complexes et dites « de Kelvin ») et des doublets normaux sur la carène Γ , et l'on observe l'effet de ces singularités sur une surface Σ qui entoure le navire à faible distance. Le domaine de calcul proprement dit, situé entre Γ et Σ , est maillé en éléments finis, la résolution s'effectuant grâce au code MELINA actuellement développé au Groupe d'hydrodynamique navale (GHN) de l'École nationale supérieure des techniques avancées (ENSTA). Ensuite, l'application du principe fondamental de la dynamique au navire permet d'utiliser les résultats de ces 7 sous-problèmes, et d'achever la détermination des mouvements et des efforts.

Le code AQUADYN du LHN de l'ENSM, fondé sur la méthode des singularités de Kelvin, permet également de résoudre ces problèmes.

On peut aussi effectuer des calculs au second ordre pour affiner les résultats linéarisés précédemment obtenus : on met en particulier en évidence la lente « dérive » du navire due à la houle. Ensuite, les spécialistes des structures peuvent calculer des efforts périodiques affectant la structure du navire ou de la plate-forme et s'assurer de sa résistance.

Daniel Euvrand, professeur à l'université Paris VI, Groupe d'hydrodynamique navale (UA 853 CNRS), École nationale supérieure des techniques avancées, université Paris VI, Centre de l'Yvette, chemin de la Honière, 91120 Palaiseau.

Gérard Delhommeau, ingénieur de recherche à l'Éducation nationale, Laboratoire d'hydrodynamique navale (UA 1217 CNRS), École nationale supérieure de mécanique de Nantes, 1, rue de la Noë, 44072 Nantes.

Moyens expérimentaux de l'hydrodynamique

Patrice Sulmont

L'hydrodynamique a ses moyens propres d'expérimentation qui se distinguent de ceux de l'aérodynamique. Trois éléments illustrent bien l'originalité de cette discipline. En premier lieu, la présence d'une surface libre déformable proche ou en contact des obstacles donne naissance à la radiation ou à la diffraction d'ondes. Le fluide peut, d'autre part, changer d'état et par conséquent « caviter ». Enfin, la forte densité du fluide relativement à celle de l'air entraîne des effets inertiels importants, alors qu'ils sont le plus souvent négligés dans l'air.

Si on se limite à l'hydrodynamique traditionnellement appelée navale qui concerne toutes les applications de l'hydrodynamique au comportement des navires ou des structures flottantes (off-shore, aquacole...) en mer ouverte, trois types principaux d'installations existent : les bassins de carènes, les bassins de houle, les tunnels de cavitation.

Il existe dans le monde un grand

nombre de ces installations : les plus significatives sont : le bassin des carènes du NSRDC (900 m de longueur) aux États-Unis, le bassin pressurisé de Wageningen (240 × 18 × 8 m³) aux Pays-Bas, le bassin de houle de Trondheim (80 × 50 × 10 m³) en Norvège, le grand tunnel hydrodynamique du Vandœuvre (STCAN) en France (veine fermée : 1,14 × 1,14 m² V maxi : 20 m/s, veine à SL 1,35 × 2 m² V maxi : 12 m/s).

Même si la France paraît relativement bien équipée dans certains secteurs (GTH du Vandœuvre, équipements du LHN de Nantes, dont les dimensions se situent honorablement parmi les équipements universitaires mondiaux), on est obligé de constater que les moyens expérimentaux français sont peu nombreux et parfois inexistantes comme, par exemple, dans le domaine des bassins océaniques.

Patrice Sulmont, professeur, responsable du Laboratoire d'hydrodynamique navale (UA 1217 CNRS), École nationale supérieure de mécanique de Nantes, 1, rue de la Noë, 44072 Nantes.



Paquebot "Sovereign of the Seas", construit par les chantiers Aisthorm-Atlantique pour la "Royal Caribbean Cruise Line". Longueur 266 mètres, largeur 32 mètres, tirant d'eau 7,6 mètres. Quatre moteurs totalisant 27 800 chevaux animent deux hélices à pales orientables. Vitesse supérieure à 21 nœuds. De nombreux essais sur maquettes ont eu lieu en bassin de traction, en bassin de houle et en bassin de cavitation. Les hélices ont été essayées en tunnel à cavitation. (© Studio Baudry - Cliché P. Depelteau - Saint-Nazaire).

Les turbomachines

L'utilisation intensive et conjointe des méthodes de calcul et des techniques de mesures explique l'importance des progrès réalisés récemment dans le domaine des turbomachines.

Francis Lebœuf,
Jean-Louis Kuény

La recherche de performances de plus en plus élevées dans le domaine des turbines hydrauliques a permis, en quinze ans, de quadrupler la puissance unitaire des turbines Francis. Ainsi les turbines qui équipent le site de Itaipu au Brésil ont une puissance nominale de 750 MW sous 126 m de chute. La puissance de pointe de 826 MW a été atteinte le 25 août 1985. Leur conception est rendue possible par le développement des calculs numériques et des techniques de conception assistée par ordinateur. Les logiciels actuels intègrent des programmes complexes qui réalisent, sous contrôle interactif, la définition des profils, le calcul des écoulements et des efforts, et la génération des codes de pilotage des machines à commandes numériques pour la réalisation d'un modèle réduit.

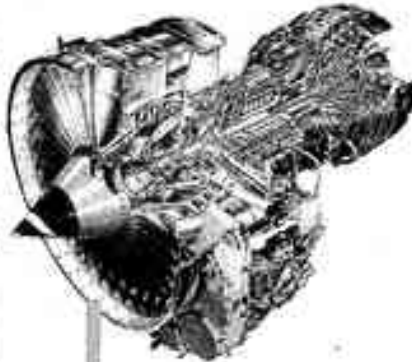
Les essais sur modèle réduit sont actuellement une étape encore indispensable. Les calculs ne permettent pas de déterminer le comportement à la cavitation des roues qui conditionne le niveau d'implantation de la machine, ni les fonctionnements en dehors du régime nominal, qui sont les plus critiques pour la dimensionnement. En effet, les vibrations et les fluctuations dynamiques les plus importantes sont observées à ces régimes.

Dans le domaine des pompes, les recherches actuelles ont aussi permis de franchir de nouvelles étapes. Un bon exemple est donné par la propulsion par ergols des lanceurs de l'espace (3^e étage des fusées Ariane III ou IV, 1^{er} étage Ariane V, navettes spatiales américaines, etc.). Ceux-ci nécessitent la mise au point de pompes aux performances les plus élevées possibles.

Pour réduire l'encombrement et le poids de ces pompes avec une puissance fixée pouvant être supérieure à 10 MW, la vitesse de rotation est augmentée jusqu'à 60 000 t/mn. L'entraînement à ces vitesses est obtenu par accouplement avec une turbine qui utilise une partie des gaz brûlés. Ces ensembles turbo-pompes sont réalisés en matériaux spécifiques (titane, alliages spéciaux), qui permettent de résister à des efforts centrifuges importants avec des contraintes thermiques considé-

rables (hydrogène ou oxygène liquide côté pompe et gaz chauds côté turbines).

Des capacités d'aspiration très importantes sont nécessaires pour vider au maximum les réservoirs et ainsi optimiser la charge utile du lanceur. Elles nécessitent un fonctionnement fortement cavitant des pompes. La prévention de cette cavitation est compliquée par les phénomènes thermodynamiques présents avec les ergols. Ils se manifestent par un refroidissement impor-



Moteur CFM56-3 construit par SNECMA - General Electric (SNECMA).



Vue éclatée d'une pompe de fusée inducteur - redresseur - deux impulseurs (photo SEP).

tant des poches de cavitation, dû à l'évaporation du fluide. Ce refroidissement influence sensiblement la pression de poche. L'eau à température ordinaire n'est pas sensible à ce phénomène.

Comme autre exemple, nous pouvons considérer la famille des moteurs d'avion CFM 56, produits par la SNECMA et General Electric. Ces engins délivrent une poussée comprise entre 100 kN pour le CFM 56-3 et 130 kN pour le CFM 56-5 dont l'entrée en service commercial est prévue en 1988. Le débit d'air est de l'ordre de 400 kg/s pour un diamètre d'entrée de 1,7 m et un poids de 2 000 kg environ. Un taux de fiabilité remarquable de l'ordre de 99,9 % a été obtenu lors de l'utilisation de ce moteur, ce qui correspond à moins de six retards de plus de quinze minutes pour dix mille départs.

Chaque élément du moteur subit une optimisation poussée pour en tirer les meilleures performances. L'entrée d'air du moteur doit introduire le moins de pertes aérodynamiques possible. Elle est donc particulièrement courte. Les compresseurs participent, pour une part significative, à l'accroissement des performances des moteurs. Le taux de compression moyen par étage axial est ainsi passé en 10 ans de 1,2 environ à des valeurs supérieures à 1,4. La chambre de combustion est également un élément très délicat à optimiser, par suite de l'accroissement considérable des températures. Des valeurs de l'ordre de 1 700° à 1 800° K sont atteintes actuellement. Les problèmes rencontrés dans les turbines sont liés aux phénomènes aérodynamiques présents dans les couches visqueuses pariétales et aux fortes températures issues de la chambre de combustion. Ainsi de petits jets « froids » (900° K) sont introduits au niveau des parois pour en assurer le refroidissement et des progrès importants ont également été obtenus par la réalisation d'aubes monocristallines.

Les progrès récents dans le domaine des matériaux ont permis d'introduire l'utilisation des composites, pour des raisons évidentes de poids, et des céramiques dans les parties chaudes.

Francis Lebœuf, maître de conférence à l'Ecole centrale de Lyon, Laboratoire de mécanique des fluides (UA 263 CNRS), Ecole centrale de Lyon, 36, avenue Guy de Collongue, B.P. 163, 69131 Ecully Cedex.

Jean-Louis Kuény, maître de conférence à l'Institut national polytechnique de Grenoble, Directeur du Centre de recherche et d'essais de machines hydrauliques de Grenoble, Ecole nationale supérieure d'hydraulique et de mécanique, B.P. 95, 38402 Saint-Martin d'Hères Cedex.

Parer les risques de la cavitation

La cavitation qui naît dans un liquide en mouvement au voisinage de parois – par exemple, pour l'eau, près des pales d'une hélice ou d'une turbine – peut détériorer les matériaux les plus résistants.

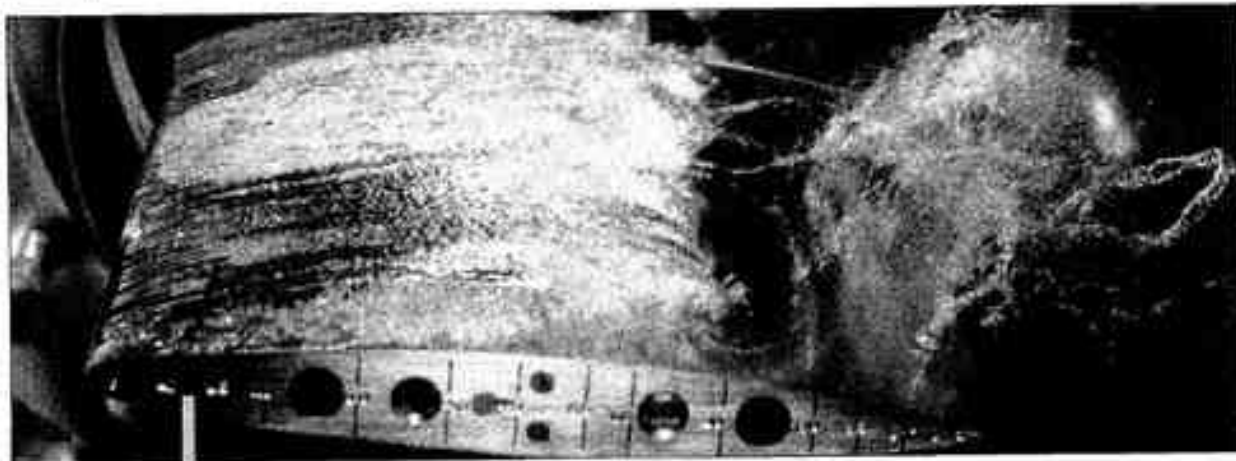
Jean-Marie Michel

La cavitation est la rupture, accompagnée de vaporisation, d'un liquide en mouvement, soumis à des contraintes excessives. Elle se produit dans les zones basse

pression des machines (pompes, turbines) et des organes hydrauliques (vannes, robinets) et se manifeste particulièrement lorsque les vitesses des particules de liquide par rapport aux parois solides sont grandes. Elle prend divers aspects : bulles entraînées par l'écoulement, poches de vapeur accrochées aux parois, filaments tourbillonnaires. Ces structures apparaissent en des temps inférieurs à la milliseconde. Leur implosion s'accompagne d'une concentration de l'énergie sur des domaines très petits, ce qui produit de grandes surpressions locales, voire des ondes de choc. La cavitation est donc génératrice de bruits, de vibrations, et elle

peut détériorer sérieusement les parois des machines. Il est alors nécessaire de la prendre en compte dès la conception d'un projet, soit pour l'éviter totalement, soit pour admettre un fonctionnement en régime cavitant. Ce dernier point de vue est de plus en plus adopté dans l'industrie hydraulique pour les machines rapides. Il nécessite une connaissance approfondie des phénomènes physiques de base et conduit donc à la mise en place de programmes de recherche à long terme dans les laboratoires spécialisés.

Jean-Marie Michel, directeur de recherche au CNRS, Institut de mécanique de Grenoble (UA 6 CNRS), université de Grenoble I, B.P. 53X, 38041 Grenoble Cedex.



Cavitation développée sur une aile (l'eau s'écoule de gauche à droite) : cavité accrochée au bord d'attaque, qui émet vers l'aval des poches organisées autour de filaments tourbillonnaires. (Cliché J.-P. Franc, IMG).

La conversion d'énergie magnétohydrodynamique

Ne faisant intervenir que des circulations de fluides, la production d'électricité par conversion magnétohydrodynamique à métal-gaz permet d'atteindre des rendements très prometteurs.

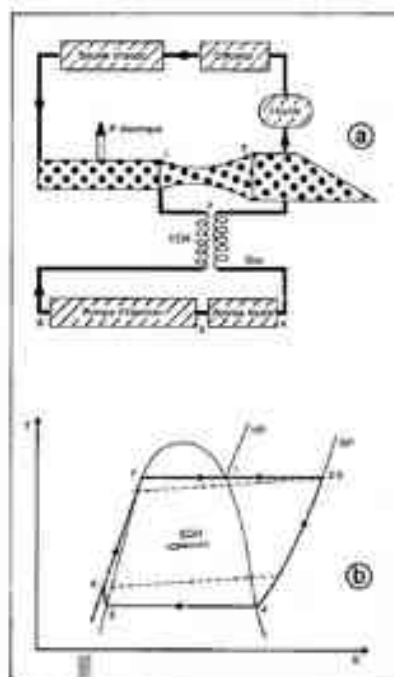
Antoine Alemany

La conversion magnétohydrodynamique (MHD) à métal-gaz permet de produire de l'électricité par un processus thermodynamique utilisant l'interaction d'un écoule-

ment conducteur avec un champ magnétique. Dans ce processus, le métal, conducteur électrique, est utilisé aussi comme fluide caloporteur, le gaz (fluide thermodynamique) assurant le transfert d'énergie thermique en énergie mécanique.

Un exemple typique de fonctionnement d'un convertisseur à métal-gaz est décrit ci-après (figure). Le gaz est injecté dans l'écoulement d'un métal liquide (1) et se détend dans l'accélérateur (1-2) en entraînant le métal et en consommant une part de son énergie thermique. En sortie d'accélérateur, l'écoulement diphasique à la configuration d'un brouillard (phase liquide dispersée, phase gazeuse continue) à très grande vitesse. Les deux phases sont ensuite séparées (3), en utilisant leur différence d'inertie tout en conservant au mieux l'énergie cinétique du métal. Celui-ci circule ensuite dans un diffuseur pour adapter le niveau de pression aux conditions d'entrée dans le générateur, puis dans la source chaude où il récupère l'énergie thermique cédée au gaz au cours de sa détente, et enfin

dans la tuyère MHD, soumise à l'influence du champ magnétique, où s'effectue la production d'électricité. Après séparation, le gaz circule seul dans la source froide (3-4-5) où il est condensé, puis pompé (5-6), réchauffé et vaporisé (6-7-1), et se retrouve alors dans les conditions correspondant à l'entrée de l'accélérateur (1). Le cycle thermodynamique associé, du type Rankine, dépasse couramment 80 % du rendement de Carnot (et peut même atteindre 90 % avec un échangeur régénératif).



Exemple typique de convertisseur à métal-gaz
(a) schéma de principe
(b) cycle thermodynamique associé

La conversion MHD à métal-gaz ne fait intervenir que des circulations de fluides, et elle est compatible avec la plupart des sources thermiques à tout niveau de température. Elle constitue un domaine de recherche tout à fait privilégié, offrant des possibilités d'applications extrêmement diversifiées (production d'électricité dans l'espace, par exemple), associant la mécanique des fluides et la thermodynamique à l'électromagnétisme.

Antoine Alemany, directeur de recherche au CNRS, Institut de mécanique de Grenoble (UA 6 CNRS), université de Grenoble I, B.P. 53X, 38041 Grenoble Cedex.

Les énergies de la mer

Si l'on songe toujours à la construction de nouvelles usines marémotrices, la récupération de l'énergie des vagues n'a guère fait l'objet que d'installations expérimentales.

André Temperville

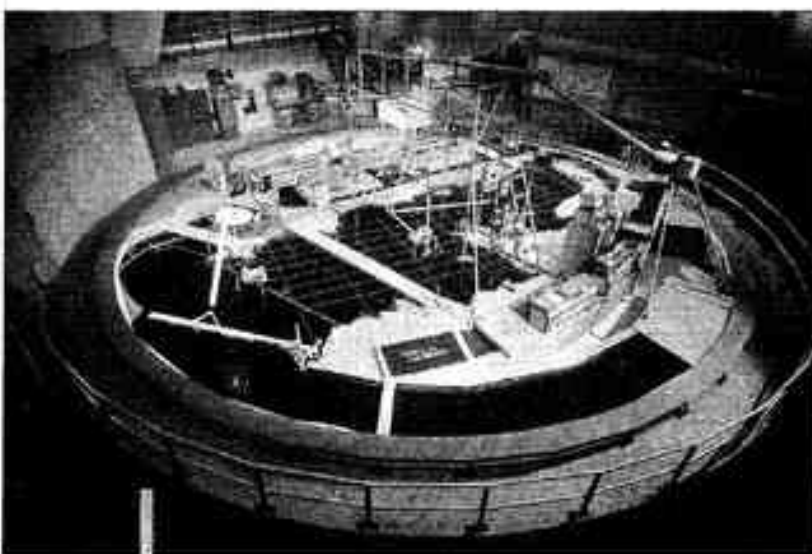
C'est sur l'estuaire de la Rance, près de Saint-Malo, que l'EDF a construit de 1961 à 1966 la première usine marémotrice dans une configuration géographique unique en France et exceptionnelle dans le monde. Implantée dans une digue en béton de 750 mètres de long, l'usine mesure 390 mètres sur 53 mètres et contient 24 groupes bulbes de 10 MW. C'est un équipement de grande fiabilité qui fonctionne à pleine capacité depuis 20 ans. Des propositions récentes ont été faites visant à aménager plusieurs petits bassins aux limites desquels sont placées les usines marémotrices. Parmi les autres projets dans le monde, on peut citer la baie de Fundy au Canada (avec ses marées record de 20 mètres) et l'estuaire de la Severn en Angleterre.

On estime en moyenne de l'ordre de 50 KW par mètre d'installation l'énergie des vagues que l'on peut récupérer. Les principaux systèmes étudiés entre 1975 et 1980 étaient de 4 types. Pour sa part le type « radeau » (Sir Christopher

Cockerell) est formé de panneaux articulés qui suivent le mouvement des vagues. Des pistons au niveau des gonds commandent un moteur qui fait tourner un générateur d'électricité. Quant au type « Canard » (Stephen Salter), il est formé d'une série de vannes alignées le long d'un axe et dont la partie la plus pointue oscille de haut en bas comme un bec de canard. Les mouvements font tourner une pompe rotative qui entraîne un générateur.

La colonne « Masuda » a été inventée par un commandant de la Marine japonaise. Il s'agit d'un caisson retourné sur l'eau, renfermant de l'air et présentant des trous sur le toit. Quand les vagues montent et descendent, l'air chassé ou aspiré par les trous actionne une turbine à air qui commande un générateur. C'est le système qui a eu le plus d'application puisqu'il existe des bouées lumineuses en mer fonctionnant sur ce principe ainsi qu'une station de 2 MW sur un bateau, le Kaimel, au large du Japon. Enfin, le système « écluse » (Russell) a été inventé au laboratoire de Wallingford. C'est une station où l'eau des vagues est piégée dans un réservoir haut et passe à travers une turbine vers un réservoir bas.

André Temperville, maître de conférences à l'université Joseph Fourier de Grenoble, Institut de mécanique de Grenoble (UA 6 CNRS), université de Grenoble I, B.P. 53X, 38041 Grenoble Cedex.



Plaque tournante de l'Institut de mécanique de Grenoble qui a servi à l'étude de l'influence des ouvrages sur le régime de la marée.

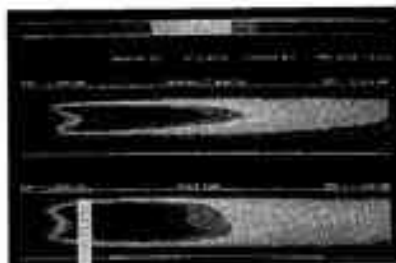
La structure des flammes

La maîtrise de la combustion turbulente doit prendre en compte les interactions entre les fluctuations des écoulements et les réactions chimiques qui s'y déroulent.

■ Sébastien Candès

Le champ des applications industrielles de la combustion est vaste et fortement diversifié : production de l'énergie, procédés industriels d'élaboration de matériaux, traction terrestre, propulsion aéronautique et spatiale, sécurité. L'importance économique de ces secteurs justifie l'intérêt des recherches entreprises dans ce domaine.

Les problèmes explorés concernent la dynamique des fronts de réaction, la structure des flammes et, en particulier, l'influence de la cinétique chimique complexe, les instabilités des flammes laminaires et turbulentes, les flammes en milieu non uniforme, les mécanismes d'extinction et d'allumage, l'interaction entre la cinétique chimique et la turbulence. La combustion diphasique... Les progrès accomplis dans tous ces domaines sont notables mais



Combustion d'un mélange air-propane (flammes stabilisées dans un conduit). Lorsque la richesse du mélange est faible (0,6), les deux flammes forment une seule zone de réaction. Pour une richesse plus grande (0,8), elles sont séparées par une région dans laquelle les taux de réaction sont faibles. Ces images ont été obtenues par détection du rayonnement du radical C_2 .

encore partiels. Les difficultés les plus sérieuses concernent la représentation de l'interaction de la cinétique chimique et de la turbulence.

Cet aspect peut être clairement illustré dans le cas de flammes turbulentes stabilisées dans un conduit (une situation très proche de la post-combustion des moteurs à réaction). La flamme se développe à partir d'un corps non profilé placé ici dans un écoulement prémélangé d'air et de propane. Une information importante concerne le dégagement de chaleur dans la flamme. La mesure des termes sources ne peut être effectuée avec précision, mais elle est convenablement réalisée par la détection du rayonnement lumineux de certains radicaux libres tel C_2 , qui sont essentiellement présents dans les zones de réaction intense. Les distributions du dégagement de chaleur local mesurées pour deux richesses différentes apparaissent (voir figure). Cet exemple montre clairement l'importance de l'interaction entre la cinétique et la turbulence. Des modèles mis au point récemment permettent de reproduire ce type de comportement, mais un grand nombre de problèmes fondamentaux subsistent encore dans la description de la combustion turbulente.

■ Sébastien Candès, professeur à l'Ecole centrale, Laboratoire EM2C (ER 288 du CNRS), Ecole centrale de Paris, 92295 Châtillon-Malakoff Cedex.

Les lasers de grande puissance

■ Bernard Fontaine

L'intérêt des sources laser pulsées ou continues de grande puissance instantanée ($P \geq 1 \text{ GW}$ à $1 \mu\text{s}$) ou moyenne ($P \geq 100 \text{ W}$), est actuellement fortement stimulé par d'importantes applications industrielles et de défense. Leur étude fait appel à des disciplines scientifiques aussi variées que la physique du solide, la cinétique moléculaire, la physique des décharges, l'électrotechnique, la mécanique des fluides et l'acoustique.

La mécanique des fluides joue un rôle important dans les lasers à gaz de grande puissance. Par exemple, dans les lasers CO_2 continus elle intervient

de façon prépondérante dans l'évacuation de l'énergie non transformée en rayonnement et dans la stabilisation de la décharge par turbulence. Les lasers à exciplexes de grande puissance moyenne sont constitués d'une soufflerie subsonique à cycle fermé associée à un système d'excitation électrique pulsé utilisant une préionisation du milieu actif et une cavité résonnante. Dans ce cas, à l'évacuation de l'énergie thermique par écoulement doit être ajouté l'amortissement, entre deux excitations, des ondes de choc et des ondes acoustiques induites par le très rapide apport d'énergie dans le milieu actif.

De nombreuses applications de ces lasers concernent la mécanique : fusion contrôlée par confinement inertiel,

soudure, découpe, durcissement, création d'écoulements, cavitation optique, photoablation, effets thermomécaniques sur matériau, etc. Des expériences très récentes ont montré l'intérêt, pour le durcissement des matériaux, du traitement de surface par onde de choc générée par laser. Toujours en ce qui concerne le durcissement, la fusion superficielle d'une tôle d'acier inoxydable au moyen d'un laser CO_2 continu d'une puissance de 2 kW permet actuellement d'augmenter la dureté d'un facteur 3 sur une épaisseur supérieure à 1 mm. Un autre domaine prometteur est le transfert d'énergie laser à grande distance, notamment dans l'espace.

■ Bernard Fontaine, directeur de recherche au CNRS, équipe « nouveaux lasers », Institut de mécanique des fluides de Marseille (UM 34 CNRS), 3, rue Himmurat, 13003 Marseille.

Les fluides, véhicules de l'énergie

De leur extraction à leur transformation, les énergies que nous utilisons font appel à des fluides en écoulement – agents de réactions chimiques ou caloporteurs – dont il nous faut comprendre le comportement.

■ Roger Séméria

L'énergie thermique est véhiculée par des fluides caloporteurs au travers d'échangeurs thermiques permettant un échange de chaleur entre deux circuits de fluides indépendants. En France, 90 pour cent de l'énergie primaire traverse trois à quatre échangeurs avant son utilisation et sa dégradation dans l'air ou dans l'eau : d'où l'intérêt d'améliorer les performances de ces appareils et d'abaisser leur coût pour favoriser une meilleure utilisation de l'énergie en facilitant la récupération des calories dans les procédés. L'Agence française pour la maîtrise de l'énergie indiquait, en 1986, que gagner deux points de rendement sur les échangeurs permettait une économie annuelle équivalente à 1 million de tonnes de pétrole (la consommation totale française a été de 200 millions de tonnes d'équivalent pétrole en 1987). Une meilleure conception mécanique exige l'analyse du comportement de l'échangeur dans toutes les circonstances de son exploitation : il faut connaître les champs de vitesse et de température dans l'appareil, non seulement en valeur moyenne dans le temps, mais aussi avec leurs fluctuations, afin de prévoir et éventuellement de limiter les risques de vibrations et de contraintes thermomécaniques sur les structures. Toute zone « morte » dans une partie de l'appareil nuit au rendement et facilite la corrosion ou l'encrassement : d'où l'intérêt d'optimiser les formes des parois contenant ou guidant les fluides en écoulement.

Dans nombre de procédés industriels, mais aussi dans l'habitat, on souhaite imposer à un volume donné une température ou une évolution de température déterminée. Ainsi, en métallurgie, la trempe, c'est-à-dire le refroidissement rapide des tôles, est une phase délicate qui nécessite des dispositifs de refroidissement à la fois performants et souples d'utilisation, réalisés par exemple par des rampes d'arrosage ou de pulvérisation dont l'agencement doit conduire à un refroidissement uniforme (voir figure). Plus récemment, les dispositifs de refroidissement des systèmes électroniques (tubes d'émission, thyristors, etc.) et les ordi-

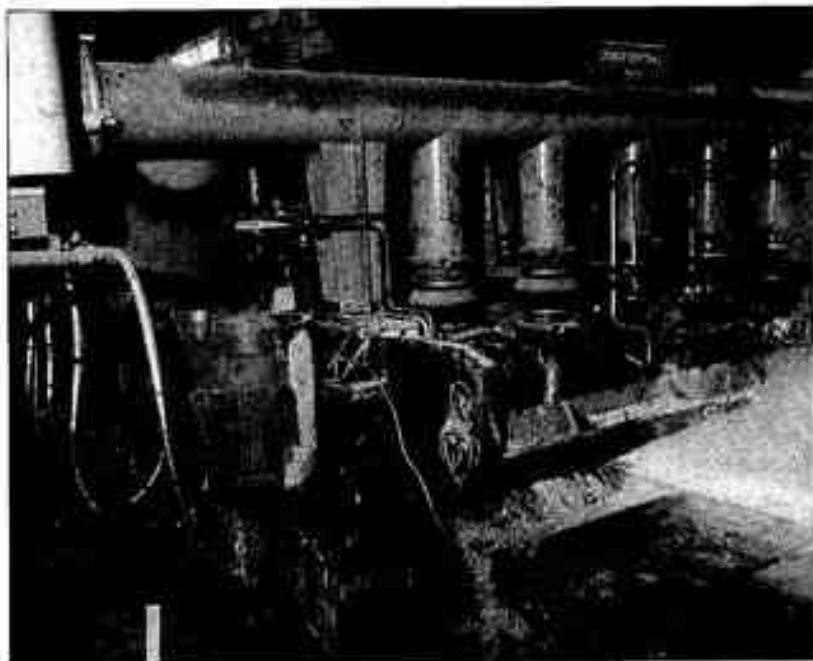
nateurs ont nécessité des développements de circuits de fluides diélectriques de refroidissement à haute performance.

Les cœurs des chaudières nucléaires exigent une étude particulièrement approfondie des écoulements autour des gaines des barreaux de combustible, car les puissances volumiques sont élevées : plus de 100 kW thermiques par litre. En particulier on cherche à éviter tout point chaud dû à un mauvais refroidissement local qui pourrait détériorer une gaine métallique et accroître la contamination radioactive du circuit de refroidissement primaire. Lorsque le réacteur est à l'arrêt, le cœur continue de dégager une puissance thermique résiduelle faible et décroissante mais nécessitant un refroidissement permanent sans longue interruption qui doit être assuré même si la plupart des circuits sont hors d'usage : on est

alors conduit à analyser toutes les séquences accidentelles, même les plus improbables, dans lesquelles le cœur risque d'être mal refroidi, ce qui passe par la prévision à chaque instant des écoulements liquide, liquide-vapeur et vapeur dans le circuit primaire du réacteur, et tout particulièrement dans le cœur.

En quelques décennies, la connaissance des écoulements de fluides industriels est passée de l'empirisme à une science fondée sur les lois classiques de la mécanique associées à des modèles semi-empiriques qui permettent de calculer les écoulements avec une précision croissante, ceci grâce aux mesures locales et au développement de modèles physiques, modèles de turbulence notamment, transformés en modèles numériques et en logiciels prédictifs. Une meilleure prédiction des écoulements multi-dimensionnels et transitoires, couplée aux calculs thermomécaniques des structures, permettra des progrès substantiels.

■ Roger Séméria, adjoint au chef de département de transfert d'énergie, chargé des services de thermique, Commissariat à l'énergie atomique, Centre d'études nucléaires de Grenoble, 85 N, 38041 Grenoble Cedex.



Trempe d'une tôle forte.

Pour les produits métallurgiques plats (tôles fortes, bandes), un moyen d'ajuster leurs caractéristiques mécaniques consiste à piloter finement le refroidissement du produit en sortie du laminier. La photo représente l'entrée d'une installation de trempe de tôles fortes installée par Bertin en sortie du laminier à tôles fortes de l'Usine Soliac de Dunkerque (ex Usinor). Cette machine permet de refroidir à grande vitesse des tôles épaisses de 10 à 50 mm faisant 15 m de long et jusqu'à 4,3 m de large.

Génie chimique et mécanique des fluides

Effectué à l'échelle industrielle, le mélange de réactifs chimiques soulève des problèmes qui requièrent l'attention simultanée de l'ingénieur de génie chimique et du mécanicien des fluides.

Jacques Villermaux

La plupart des procédés industriels mettent en jeu des fluides réactifs : chimie lourde ou fine, raffinage du pétrole, plastiques, bioprocédés, élaboration des matériaux, traitement nucléaire, agroalimentaire, etc.

La mise en œuvre des réactions implique la maîtrise des opérations de base : mise au contact et dispersion des phases, transferts de matière et de chaleur. Le contrôle de la qualité et la sécurité sont assurés par une commande appropriée et des critères d'extrapolation fiables. Tout ceci ne peut être réalisé par simple superposition de la chimie à un écoulement défi-



On voit ici un montage de laboratoire destiné à étudier les fluctuations de concentration dues au mélange imparfait d'un traceur dont la fluorescence (observée latéralement) est excitée par un faisceau laser (focalisé de bas en haut). Ces recherches sont menées à Nancy dans le cadre de l'Action de recherche coordonnée PROMEF (Processus fondamentaux de mélange dans les fluides) du PIRSEM du CNRS.

ni indépendamment par la mécanique des fluides en raison des couplages rétroactifs forts entre processus chimiques, échanges thermiques et propriétés hydrodynamiques. Par exemple, lors d'une polymérisation, l'accroissement brutal de viscosité peut conduire à un emballement. De plus, les fluides industriels sont souvent complexes, polyphasiques, concentrés et agressifs, et éloignés des fluides idéaux étudiés dans les laboratoires. En outre, l'extrapolation à grande échelle est difficile comme dans le cas des très gros fermenteurs (100-1 000 m³), où agitation, évacuation de chaleur et apport d'oxygène doivent être maîtrisés.

Pour fournir à l'ingénieur les outils nécessaires, des recherches actives sont menées dans deux directions complémentaires : d'une part, développement de modèles numériques détaillés qui nécessitent de très gros volumes de calcul et sont encore limités par le manque de connaissances de base (turbulence des milieux réactifs) et de données expérimentales ; d'autre part, utilisation d'une approche systémique plus globale, qui est celle du génie chimique (concepts de macro- et de micromélange) et qui peut se révéler très efficace à condition d'être convenablement calée par l'expérience.

Jacques Villermaux, professeur à l'école nationale supérieure des industries chimiques, Laboratoire des sciences du génie chimique (LP 6811 du CNRS), Ecole nationale supérieure des industries chimiques, 1, rue Grandville, 54042 Nancy Cedex.

Les fluides, conducteurs de l'électricité

Sensibles à l'action des champs magnétiques, les fluides conducteurs présentent un comportement hydrodynamique original, tel celui des métaux ou celui des plasmas.

Marcel Garnier, Guy Laval

Un champ magnétique continu agit de façon sélective sur l'écoulement d'un métal liquide. Il s'oppose aux particules fluides qui se déplacent perpendiculairement aux lignes de champ et laisse librement évoluer celles qui suivent ces mêmes lignes. Cette action anisotrope marque fortement les écoulements turbulents qui tendent vers une structure constituée de tourbillons très allongés dans la direction du champ magnétique. Ceci

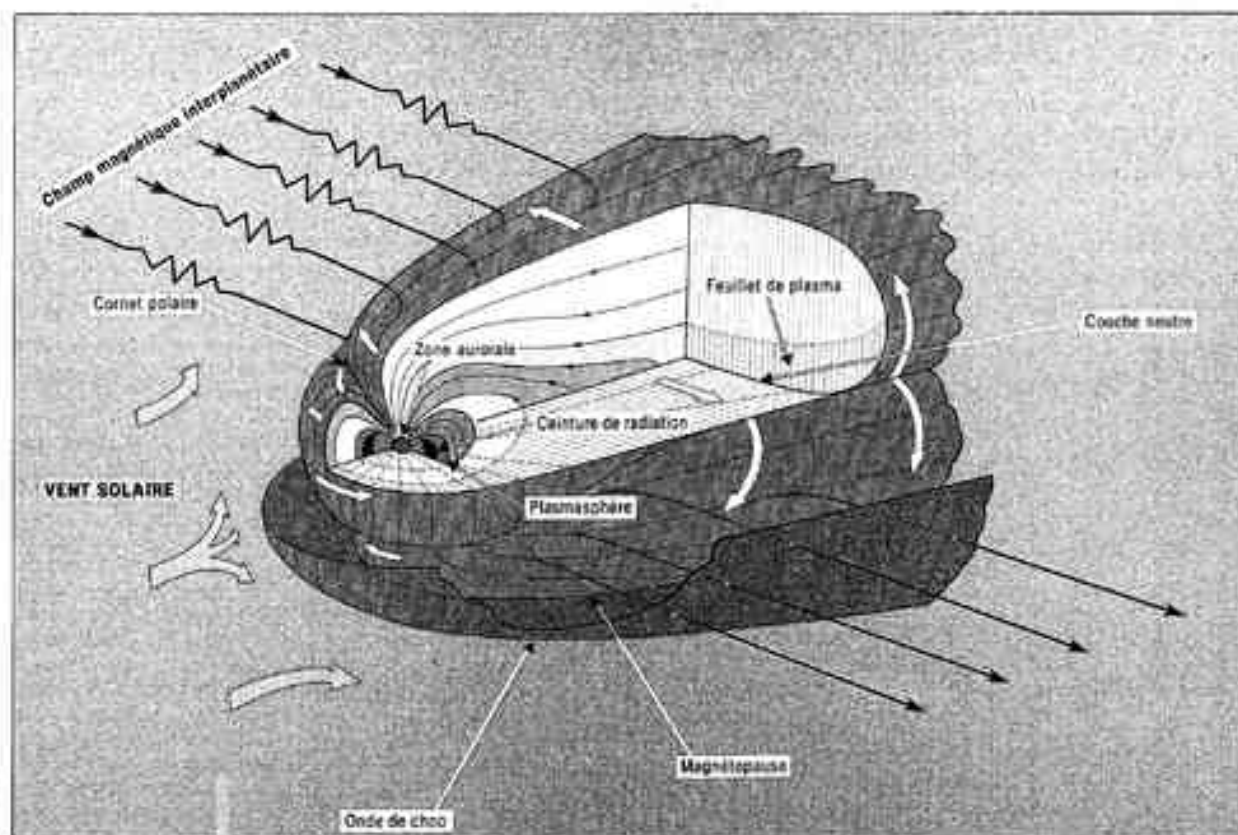
peut être mis à profit pour contrôler les transferts de masses ou de chaleur : ceux-ci sont pratiquement inhibés dans une direction et favorisés dans les directions perpendiculaires.

Dynamos fluides

Un champ magnétique alternatif induit des courants électriques dans un métal liquide. Ces courants localisés à la périphérie du domaine fluide dans une « peau électromagnétique » interagissent avec le champ magnétique, donnant naissance à un effet méca-

que d'une double nature. Un effet de pression, tout d'abord, dû à la répulsion qui apparaît entre le métal liquide et l'inducteur qui crée le champ magnétique : cet effet peut être exploité pour équilibrer la gravité et permettre d'obtenir la lévitation du liquide, ou encore pour contrebalancer les forces de tension superficielle et autoriser la mise en forme sans contact des métaux à l'état liquide. Un effet moteur, ensuite, capable de produire des écoulements recirculants généralement turbulents. La configuration de ces écoulements est très sensible à la fréquence du champ magnétique : en particulier le nombre de cellules de recirculation croît avec la fréquence ; la vitesse induite n'est sensible qu'à l'intensité du champ magnétique à laquelle elle est proportionnelle.

A l'échelle du laboratoire, l'action réciproque du champ de vitesse sur le champ magnétique est pratiquement nulle. A des échelles plus grandes, planétaires par exemple, une telle réac-



Structure de la magnétosphère. Les particules chargées du vent solaire (qui se déplace de la gauche vers la droite à une vitesse d'environ 400 km/s) sont déviées par le champ magnétique d'origine interne de la Terre. Une frontière (la magnétopause) sépare la région où les particules du vent solaire dominent, de celle où le champ magnétique terrestre est prépondérant. Des courants électriques (flèches en gris clair) circulent sur cette frontière. La vitesse relative de l'obstacle, constitué par la cavité, et du vent solaire étant plus élevée que celle des ondes sonores ou magnétohydrodynamiques qui peuvent se propager dans celui-ci, une onde de choc se crée à l'avant de la cavité. (Cliché R. Gendrin - Centre de recherches en physique de l'environnement du CNRS).

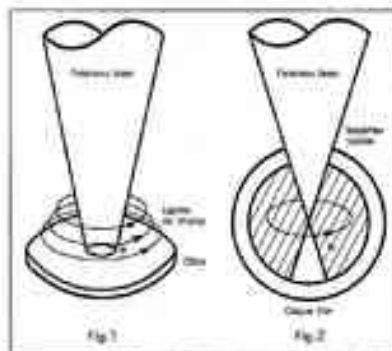
tion est dominante et peut donner naissance à des dynamos fluides géantes capables d'amplifier et de régénérer un champ magnétique original : la persistance du champ magnétique terrestre résulte d'un tel effet dynamo dans la partie liquide du noyau. L'évolution de ce champ magnétique (par exemple les renversements des pôles qui apparaissent environ tous les cent mille ans) est une conséquence des instabilités de ce système magnétohydrodynamique.

Les gaz ionisés

Un gaz ionisé, ou plasma, peut souvent être décrit comme un fluide conducteur compressible. C'est ainsi que l'on rend compte de l'interaction des plasmas interplanétaires (vent solaire) avec les champs magnétiques des planètes. Un tel modèle a permis de concevoir la notion de confinement magnétique des plasmas qui a donné naissance aux grandes machines comme les Tokamaks dans lesquelles on s'efforce d'atteindre les conditions

de la fusion thermonucléaire contrôlée.

En fait, un plasma est essentiellement un gaz d'électrons libres neutralisés par des ions. Cette nature de mélange peut donner lieu à des effets spectaculaires. Si on irradie une cible solide avec un faisceau laser intense, la pression cinétique des électrons du plasma ne peut être équilibrée que par un champ électrique d'induction (figure 1). Le plasma génère donc un



champ magnétique qui peut atteindre des valeurs de l'ordre de 100 Teslas dans un millièème de mm³. Ce mécanisme est génant dans les expériences classiques de confinement inertiel en vue de réaliser la fusion thermonucléaire. Il a été proposé de l'utiliser pour isoler thermiquement un plasma créé par irradiation laser d'un mélange de deutérium et de tritium à l'intérieur d'une coque de métal lourd (figure 2). On peut ainsi conjuguer confinement inertiel et confinement magnétique, ce qui ouvre de nouveaux domaines d'expérimentation.

■ Marcel Garnier, directeur de recherche au CNRS, directeur du Laboratoire MADY-LAM (magnétodynamique des liquides, applications à la métallurgie, URA 724 CNRS), ENSHMG, B.P. 95, 38042 Saint-Martin-d'Hères Cedex.

■ Guy Laval, directeur de recherche au CNRS, responsable du Centre de physique théorique (LP 14 du CNRS), Ecole polytechnique, route de Saclay, 91128 Palaiseau.

Les fluides polyphasiques

Ils offrent un champ d'investigations d'autant plus intéressant et plus ouvert que leur utilisation dans les activités industrielles ne cesse de s'étendre.

Gérard Cognet,
Jean-Marc Delhay

On désigne sous ce titre tout mélange de plusieurs phases, solide, liquide ou gazeuse ayant un comportement de nature fluide. De nombreux exemples existent dans notre environnement naturel ou technologique. Citons l'écume des vagues (mélange d'eau et d'air), les torrents de boue (particules solides et eau), les avalanches de neige poudreuse (cristaux de glace et air). Ou encore le transport pneumatique des poudres (ciment...), le transport hydraulique du charbon broyé, l'extraction et le transport des produits pétroliers.

Ces mélanges représentent également des moyens de mise en contact intime des phases, favorisant les transferts de chaleur et de matière ou même les réactions entre espèces chimiques. C'est le but recherché pour les carburants, les contacteurs gaz-liquide ou liquide-liquide pour les opérations de génie chimique, ou encore les réacteurs biologiques (culture cellulaire en suspension liquide en présence d'une atmosphère gazeuse contrôlée).

Bien que leur nature fluide laisse apparaître un comportement « complexe » (voir les articles ci-après), certains de ces milieux peuvent être considérés comme homogènes au niveau d'une description macroscopique. Le modèle se précise lorsqu'une phase, finement divisée, est dispersée dans un fluide support. Ce n'est plus possible lorsqu'existe une ségrégation, même partielle, des phases, tels les mélanges liquide-vapeur dans les condenseurs. La maîtrise du fonctionnement des installations exige de décrire la configuration respective des phases. Un exemple : l'injection de gaz dans un liquide peut donner lieu à diverses situations, du bulle à bulle au jet quasi-continu de gaz, et les phénomènes sont sensiblement modifiés si le gaz est susceptible de se condenser au sein du liquide.

La modélisation des écoulements gaz-liquide repose sur les équations de bilan (quantité de mouvement, masse, énergie) écrites pour chaque phase et moyennées dans le temps et dans l'espace ; elles doivent être complétées par des relations traduisant les transferts entre chaque phase et les parois ; leur élaboration pose un problème majeur :

elles dépendent du type d'écoulement. Un effort important est mené pour définir des critères de transition entre les différents régimes, utilisables dans des conduites ou des volumes complexes, en présence, si nécessaire, d'évolution spatiale ou temporelle. L'analyse de la stabilité des interfaces ou des structures contribue à cette approche. Ainsi peut-on expliquer la naissance de gouttelettes par pulvérisation d'un jet ou à la surface d'un film liquide en régime annulaire dispersé.

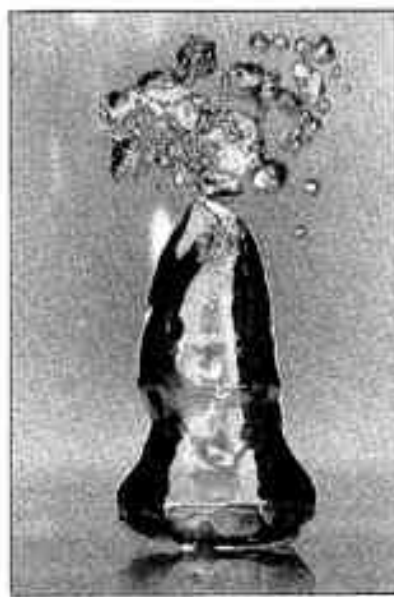
L'étude des configurations est également nécessaire pour modéliser les écoulements dans les singularités telles que les coudes, les bifurcations, les contractions ou élargissements brusques, et calculer les pertes de pression.

Si les transferts de chaleur par ébullition ou condensation ont été très étudiés dans le cadre nucléaire, des efforts restent à faire en génie chimique et énergétique : ébullition des mélanges, condensation sur des faisceaux de tubes, instabilités d'écoulements dans les circuits...

La vérification des modèles, le diagnostic des écoulements et le contrôle des installations font appel à des techniques de mesures spécifiques aux écoulements diphasiques qui manquent parfois de fiabilité ; leur étude doit être développée, ainsi que l'instrumentation industrielle.

Prenons le cas du calcul d'un échangeur compact fonctionnant en régime diphasique. Quelle est l'influence de la géométrie sur la séparation des phases ? Quel est l'effet de la tension interfaciale sur les pertes de pression ? Quel est le rôle des distributeurs d'entrée et des collecteurs de sortie pour la stabilité de l'écoulement ? Autant de problèmes posés au concepteur qui manifestent l'importance des connaissances nouvelles à acquérir.

Signalons enfin, que le passage des expériences de laboratoire aux installations pilotes puis industrielles nécessite la maîtrise des conditions approchées de similitude pour l'extrapolation en taille ou la simulation par d'autres fluides ; ce champ d'investigation est largement ouvert et encore bien peu fréquent.



Jeu de bulles et jet de gaz injectés dans un liquide. (© UA 875).

Gérard Cognet, professeur à l'Institut national polytechnique de Lorraine, Laboratoire d'énergie et de mécanique théorique et appliquée - LEMTA - (UA 875 CNRS), ENSEM, 2, rue de la Citadelle, B.P. 850, 54011 Nancy Cedex.

Jean-Marc Delhay, professeur à l'École centrale des arts et manufactures, chef du Laboratoire d'études fondamentales, Service d'études thermohydrauliques, Centre d'études nucléaires de Grenoble, CEA, B.P. 85 X, 38041 Grenoble Cedex.

Modéliser les interfaces

La modélisation de l'interface séparant deux fluides intéresse les fabricants de peinture, de produits aérosols ou encore les constructeurs de moteurs cryogéniques.

Renée Gatignol, Michel Dudeck, Roger Prud'homme

On appelle interface la zone de transition qui sépare deux milieux tels que eau-air, eau-huile, liquide-vapeur... L'épaisseur de cette zone est extrêmement faible, de un à quelques diamètres moléculaires, de sorte que l'interface peut être assimilée à une surface géométrique. Envisageons ainsi deux phases et décrivons ce système comme trois régions : deux fluides homogènes et une phase interfaciale. Pour augmenter l'aire de la surface, de même que pour grossir une bulle de savon, il faut fournir de l'énergie ; c'est la mise en évidence de la tension superficielle. Ce facteur physi-

que est à l'origine de la forme sphérique des bulles et des gouttelettes à l'équilibre, de l'étalement d'une goutte d'huile sur un plan d'eau ou de l'ascension des liquides dans les tubes capillaires.

La tension superficielle est une fonction de la température et de la composition des deux milieux. Pour un liquide pur et sa vapeur, elle décroît avec la température. L'absorption en surface d'atomes étrangers entraîne aussi une diminution de la tension (on



Convection de Bénard : les instabilités sur la surface supérieure du fluide (huile) sont visualisées par des paillettes d'aluminium. (© P. Bergé, M. Dubois, CEA, Saclay)

parle d'agents tensio-actifs). Les phénomènes attribuables à des variations locales de tension superficielle sont appelés effets Marangoni (voir photo).

La modélisation des interfaces est une préoccupation très actuelle, et le rôle primordial des interfaces fluide-fluide dans de nombreux secteurs industriels est à souligner. Donnons trois exemples : le domaine des colloïdes, où l'aire des interfaces entre les deux phases est très importante, tels que les sols (peintures), les aérosols (brouillard, laques cosmétiques), les émulsions... ; l'étude en microgravité de liquides au sein de récipients, et les problèmes d'injection de l'oxygène et de l'hydrogène liquides dans les moteurs cryogéniques. La notion d'interface s'étend à tout milieu assimilable à une surface et prend en compte certains films de surface ou ondes de discontinuité en milieu fluide.

Renée Gatignol, professeur à l'université Paris VI, Laboratoire de modélisation en mécanique (UA 229 CNRS), université de Paris VI, tour 66, 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05.

Michel Dudeck, maître de conférence à l'université Paris VI, Laboratoire d'aérothermique (LP 1301 du CNRS).

Roger Prud'homme, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire d'aérothermique (LP 1301 du CNRS), 4 ter, route des Gardes 92190 Meudon.

La viscosité des suspensions

Le caractère visqueux des suspensions concentrées est fonction des vitesses de cisaillement auxquelles on les soumet. Son évolution, liée aux changements de structure induits par l'écoulement, diffère profondément d'un milieu à l'autre.

Daniel Quémada

Une suspension est un milieu fluide, macroscopiquement homogène, bien que constitué de fines particules solides dispersées dans un fluide, en général un liquide. Dans les suspensions très diluées, la viscosité reste voisine de celle du liquide suspen-

dant. Quand la concentration augmente, il apparaît des microstructures (amas, agrégats, floculats...) qui dépendent à la fois de la concentration et de la vitesse de cisaillement. A vitesse de cisaillement constante, la viscosité croît très vite avec la concentration et tend vers l'infini lorsque cette dernière s'approche d'une valeur limite dépendant du type d'interaction. Il en résulte un changement de la suspension en un solide poreux qui présente beaucoup d'analogies avec la transition sol → gel de certaines suspensions colloïdales.

Pour une concentration donnée, l'évolution de la viscosité avec la vitesse de cisaillement dépend profondément du système étudié. Elle est soit croissante (fluides dilatants) : c'est le cas des mélanges sable-eau, qui prennent en masse sous l'action d'un cisaillement, une zone sèche apparaissant sous le pied quand on marche sur le sable humide d'une plage ; soit décroissante (fluides pseudo-plastiques), le cas le plus fréquent : par exemple les suspensions de latex utilisées dans les peintures, permettant une application aisée,

mais évitant au fluide de couler sous son propre poids ; quelquefois, il existe un seuil de contrainte : tant qu'il n'est pas atteint, la suspension reste solide (tel un gel), mais, au-delà, elle s'écoule : c'est le comportement plastique présenté, par exemple, par la plupart des graisses lubrifiantes. Toutes ces propriétés, en régime stationnaire, s'interprètent en termes de propriétés caractéristiques de la microstructure, notamment de temps de relaxation (temps d'aggrégation, de désaggrégation, d'orientation...). En régime instationnaire, ces temps gouvernent l'évolution de la microstructure et expliquent les dépendances temporelles de la viscosité (fluide thixotrope), le rôle de l'histoire du matériau dans ses propriétés rhéologiques, ainsi que les propriétés visco-élastiques non linéaires des suspensions concentrées.

Daniel Quémada, professeur à l'université Paris VII, Laboratoire de rhéologie et hydrodynamique physico-chimique - ERHP (UA 343 CNRS), université Paris VII, tour 33-34, 2^e étage, 2, place Jussieu, 75221 Paris Cedex 05.

Comment s'écoulent les fluides complexes

La viscosité des fluides complexes se modifie avec la température et avec leur vitesse de déformation ; parfois même, ils présentent un seuil d'écoulement : on ne peut les traiter comme des liquides simples.

Michel Lebouché, Noël Midoux

Les fluides complexes mis en œuvre dans les procédés industriels, tels que : solutions de polymères, suspensions solides comme la pâte à papier, peintures, fluides alimentaires, émulsions... ou que l'on rencontre en biologie, le sang par exemple, obéissent à des lois d'écoulement sensiblement différentes de celles des fluides simples ou newtoniens, tels que l'eau. En effet, l'influence de l'écoulement sur la structure du fluide conduit à un changement de comportement et singulièrement à une évolution de la viscosité constatée avec les vitesses de déformations ou taux de cisaillement. Il importe donc de connaître la loi de comportement reliant les forces de frottement au sein du fluide aux vitesses de déformation et à la température. C'est le domaine de la

rhéologie. Un bon exemple est celui des fluides d'Ostwald dont la viscosité évolue avec la vitesse de déformation suivant une loi en puissance.

Lorsque la viscosité apparente croît avec la vitesse de déformation, le fluide est rhéoépaississant ou dilatant (cas des boues). Dans le cas contraire, il est rhéofluidifiant ou pseudo-plastique (cas de nombreuses solutions polymériques). Parfois, il existe un seuil d'écoulement ; on le constate pour les structures tridimensionnelles : émulsions, desserts lactés gélifiés. Il existe des comportements intermédiaires entre celui d'un fluide conventionnel et celui d'un solide élastique : polymères fondus. La viscosité apparente est en général très élevée, avec une incidence sur le frottement en paroi et les puissances de pompage requises dans les installations.

Il est également important de déter-

miner les lois d'échange de chaleur et de matière dans de tels écoulements. Les mécanismes en cause sont caractérisés par une forte interaction des champs de vitesse et de température, liée à la thermodépendance des comportements, nécessitant une formulation locale des lois de transfert. Le régime, le plus souvent laminaire, de ces écoulements est un obstacle à l'efficacité de l'échange. On recherche donc des géométries favorisant les instabilités : échangeurs rotatifs à surface raclée, échangeurs à plaques ondulées, réacteurs agités.

Michel Lebouché, professeur à l'université de Nancy I, responsable du Laboratoire d'énergétique et de mécanique théorique et appliquée - LEMTA (UA 875 CNRS), Institut national polytechnique de Lorraine et université de Nancy I, 2, rue de la Citadelle, B.P. 850, 54011 Nancy Cedex.

Noël Midoux, professeur à l'École nationale supérieure des industries chimiques, Laboratoire des sciences du génie chimique (I.P. 6811 du CNRS), École nationale supérieure des industries chimiques, 1, rue Grandville, 54042 Nancy Cedex.



Mesure de la vitesse d'un fluide complexe par vélocimétrie laser. Le point de mesure est à l'intersection des deux faisceaux lumineux (© LEMTA, cliché F. Nouet).

Mécanique des écoulements biologiques

La mécanique des fluides nous aide à comprendre la physiologie cardiovasculaire et respiratoire, ainsi qu'à élaborer des valves cardiaques ou à concevoir un pancréas artificiel.

Michel Jaffrin,
Jacques Dufaux, Patrice Flaud,
Robert Pélissier

Le sang est une suspension composée essentiellement de globules rouges, disques biconcaves de 8 microns de diamètre occupant 45 % du volume et, à une moindre concentration, de plaquettes et de globules blancs dans une solution de protéines, le plasma. Il circule dans un réseau extraordinairement ramifié où se succèdent tous les régimes d'écoulements depuis le régime pulsé et parfois turbulent dans la macrocirculation jusqu'à des régimes d'écoulements rampants à très faible vitesse dans la microcirculation.

Macro et microcirculation

La macrocirculation est le transport du sang, au moyen des artères et des veines, entre le cœur et les organes et tissus où s'effectuent, au niveau cellulaire, les échanges d'oxygène et de produits du métabolisme. La contraction périodique des ventricules produit un débit pulsé dans les artères qui, du fait de leur élasticité, s'accompagne d'ondes de pression et de dilatation dont la propagation est conditionnée par les propriétés élastiques et géométriques des vaisseaux. L'étude locale transcutanée par vélocimétrie ultrasonore à effet Doppler permet d'obtenir l'évolution temporelle et spatiale du champ de vitesse artériel. La mécanique des fluides permet de relier ces données expérimentales aux grandeurs physiques qui ont induit ce type d'écoulement et de déceler des pathologies d'origine cardiaque ou vasculaire.

La microcirculation relaye la macrocirculation au niveau des tissus. Elle est constituée de petits vaisseaux de diamètre inférieur à 300 microns, les artérioles, capillaires et veinules qui forment des réseaux maillés ou arborescents de plusieurs milliers de kilomètres. Dans ces vaisseaux, l'écoulement sanguin est conditionné par la déformabilité des globules rouges qui leur permet de traverser des capillaires de 5 microns de diamètre et par l'aggrégation de ces globules en rouleaux aux très faibles vitesses (figure 1). Cet écoulement est facilité par l'existence d'une couche plasmotique près des pa-

rois. Il peut être, par contre, gêné localement par une concentration élevée de globules blancs qui sont sphériques et relativement rigides. L'étude détaillée de la viscosité sanguine permet de diagnostiquer certaines affections hématologiques ou vasculaires.



Fig. 1 - Microcirculation. Grossissement montrant l'aggrégation en rouleaux des globules rouges. (© UA 343, cliché Dufaux)

Les organes artificiels

Essentiellement empirique au départ, la conception d'organes artificiels fait actuellement appel à des études théoriques et expérimentales des écoulements dans ces organes pour optimiser les formes et améliorer l'hémocompatibilité.

On recherche les causes hydrodynamiques de complications telles que l'hémolyse, la formation de thrombo-

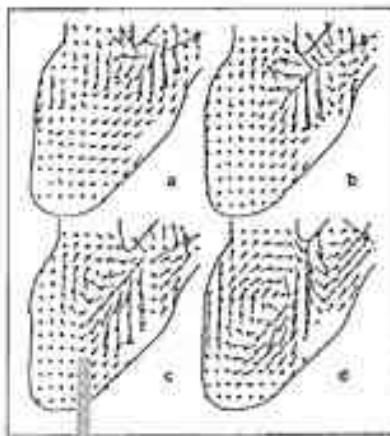


Fig. 2 - Projections du champ de vitesse sur un plan passant par l'apex et les orifices valvulaires au cours du remplissage (a, b, c) et la contraction (d) du cœur gauche.

ses, la calcification. On tente pour cela de reproduire aussi fidèlement que possible les conditions *in vivo* et d'obtenir une description très fine des champs de vitesse au voisinage des valves. L'Institut de mécanique des fluides de Marseille dispose d'un simulateur cardiovasculaire permettant de générer des variations de pression et de débit identiques à celles rencontrées dans la cavité cardiaque ou dans l'aorte. Les cartographies de vitesse bidimensionnelles ou tridimensionnelles autour des valves sont reconstituées à partir de mesures par vélocimétrie Doppler ultrasonore (figure 2).

Dans le pancréas bioartificiel destiné au traitement du diabète, la génération d'insuline et sa régulation sont assurées par du tissu pancréatique prélevé chez l'animal: les îlots de Langerhans qui sécrètent de l'insuline en réponse à un signal de glucose. Il est nécessaire de protéger les îlots contre le rejet par une membrane perméable au glucose et à l'insuline, mais arrêtant les anticorps. L'originalité du projet commun à la Division biomécanique et instrumentation médicale de l'UTC et au Service de diabétologie de l'Hôtel-Dieu est d'associer de manière optimale les transferts par diffusion et par ultrafiltration dans un module comportant un canal sanguin en « U » limité par une membrane repliée autour des îlots de Langerhans et destinée à être implantée en shunt artério-veineux. Cette géométrie, fruit d'une modélisation des écoulements et des transferts de masse, minimise les trajets du glucose et de l'insuline ainsi que le volume mort autour des îlots et permet une cinétique de transfert très rapide.

■ Michel Jaffrin, professeur à l'université de Compiègne, responsable de la Division biomécanique et instrumentation médicales (UA 858 CNRS), université de Compiègne, département génie biologique, B.P. 233, 60206 Compiègne.

■ Jacques Dufaux, maître-assistant à l'université de Paris VI, Laboratoire de biophysique et hydrodynamique physicochimique (UA 343 CNRS).

■ Patrice Flaud, maître-assistant à l'université de Paris VII, Laboratoire de biophysique et hydrodynamique physicochimique (UA 343 CNRS), université Paris VII et Paris VI, tour 33-34, 2^e étage, 2, place Jussieu, 75251 Paris Cedex 05.

■ Robert Pélissier, professeur à l'université Aix-Marseille II, Institut de mécanique des fluides (UM 34 CNRS), 1, rue Honnorat, 13003 Marseille.

Les fluides géophysiques

Fluides d'une importance vitale, l'atmosphère et les océans opposent un véritable défi à qui veut les comprendre.

Emil Hopfinger

Les fluides qui nous entourent, l'air, la mer, les rivières et les lacs, ont une fonction vitale pour l'homme et que la pollution, fléau des pays industrialisés, peut détruire. Pour enrayer la pollution, il faut naturellement intervenir à la source. Dans la plupart des cas, on peut la réduire moyennant des coûts élevés, mais on ne peut l'éviter totalement. En cela, une connaissance approfondie de la mécanique des fluides et des propriétés diffusionnelles de la turbulence est un élément essentiel pour prédire le devenir des polluants et les points d'accumulation.

L'océan est intimement lié à l'évolution du climat parce qu'il absorbe une grande quantité de l'énergie solaire et aussi parce qu'une partie de cette énergie sous forme de chaleur est redistribuée par les courants océaniques dont le plus connu est le Gulf Stream.

L'océan est aussi plein de ressources : d'abord, source d'alimentation vitale pour certains pays ; ensuite, ressources du sous-sol océanique (pétrole et minéraux). L'extraction de celles-ci pose un défi technologique par le fait qu'il faut faire face à l'élément fluide qui constitue l'océan.

Les principes physiques

A grande échelle, l'équilibre des fluides constituant les océans et l'atmosphère est dominé par la compétition entre la force de Coriolis

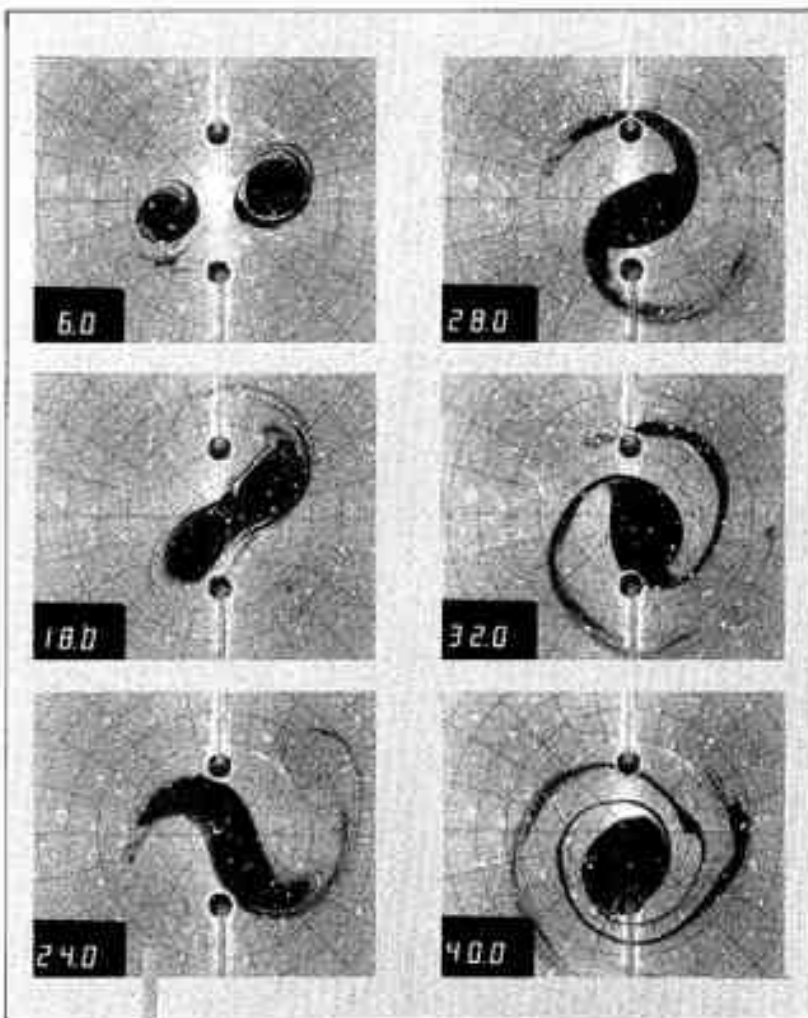
$-2\vec{\Omega} \wedge \vec{U}$, perpendiculaire à la vitesse, et les forces de pression. Cet équilibre géostrophique permet de déterminer les vents à partir des cartes météorologiques. La réalité physique est néanmoins bien plus complexe. Les variations en température qui sont le moteur des mouvements (les mouvements d'origine thermique les plus violents, bien connus et redoutés, sont les typhons et tornades) sont à l'origine d'une instabilité dite barocline, en grande partie responsable des tourbillons cycloniques (basses pressions) et anticycloniques (hautes pressions).

A plus petite échelle, la stratification en densité, lorsqu'elle est stabilisante (fluide plus léger au-dessus du fluide plus lourd) réduit et même bloque presque complètement la diffusion turbulente. Les inversions atmosphériques et la thermocline océanique sont les exemples les plus frappants. A Grenoble par exemple, les inversions sont fréquentes du fait que les vents froids des montagnes (vents catabatiques) s'accumulent dans la vallée et forment une couche de surface froide. Bien que très agitée, cette couche de surface ne se mélange que très difficilement avec l'air plus chaud de dessus. Lorsqu'une couche nuageuse au niveau de l'inversion empêche l'échauffement du sol, l'inversion peut persister pendant plusieurs jours.

Les variations de densité et la rotation terrestre, qui contrôlent les forces de pesanteur et de Coriolis, provoquent des forces de rappel et peuvent engendrer des ondes de types très variés. Celles-ci jouent un rôle essentiel dans la dynamique de l'environnement. Leur étude demeure un domaine de recherche passionnant pour le mathématicien comme pour l'ingénieur.

Défis scientifiques

Le développement de modèles mathématiques demande une connaissance approfondie des mécanismes physiques. Les progrès dans les observations satellitaires, dans les techniques de mesure et dans le traitement des signaux ont contribué substantielle-



Fusion de tourbillons anticycloniques dans un fluide en rotation et stratifié en bicouche (simulation expérimentale). La période de rotation dans le même sens que la terre est de une seconde et le temps orbital est de 44 périodes. Le temps affiché sur les figures est en secondes. La différence de densité entre les deux couches affecte la distance critique de fusion. Au-delà de cette distance critique, les tourbillons restent en mouvement orbital.

ment à cette connaissance. La véritable avancée passe cependant par des confrontations avec des modèles théoriques, des expériences numériques et des expériences de laboratoire. Dans ce contexte, la prédiction de l'évolution des instabilités hydrodynamiques au-delà du stade linéaire et jusque vers le chaos – la turbulence – est encore un véritable défi scientifique. La dynamique des tourbillons est un aspect fonda-

mental de la turbulence océanique et atmosphérique, mettant en jeu la fusion de tourbillons.

Les problèmes de frontières sont encore traités de manière très empirique et les effets topographiques des frontières sont abordés seulement dans le cadre de l'approximation géostrophique. Toutes les difficultés et lacunes de nos connaissances de la turbulence stratifiée et tournante et de l'interac-

tion courants-ondes-turbulence-frontières deviennent apparentes quand on considère que les valeurs proposées pour le coefficient d'échange vertical dans l'océan a parfois une incertitude d'un facteur de 10³.

Emil Hopfinger, directeur de recherche au CNRS, Institut de mécanique de Grenoble (UA 6 CNRS), université de Grenoble I, B.P. 68, 38402 Saint-Martin-d'Hères.

Prévision du temps et du climat

Robert Sadourny

A l'échelle planétaire, l'écoulement atmosphérique ne pourra jamais être prédit plus de vingt jours à l'avance. Mais cette limite théorique est encore loin des limites pratiques qui sont de l'ordre de trois à dix jours. La dernière décennie a été marquée par les progrès des systèmes opérationnels de prévision dont les limites ont progressé de deux à dix jours grâce à des observations satellitaires plus fines et au développement de modèles

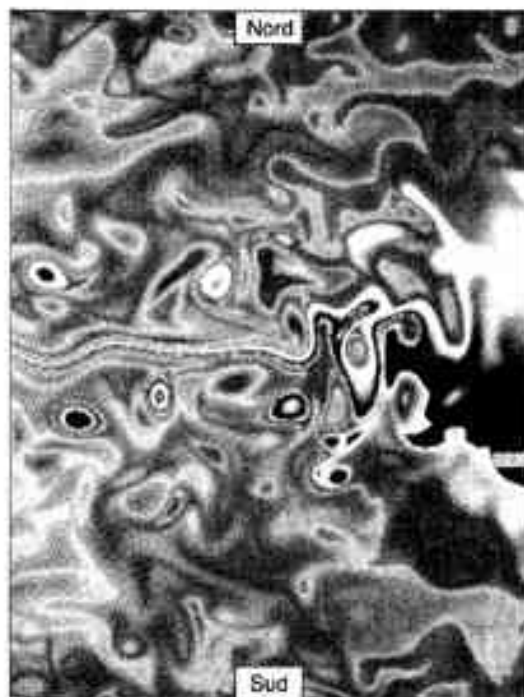
numériques adaptés aux ordinateurs vectoriels les plus puissants.

Au-delà de la prévision du temps, celle du climat vise quelques années ou quelques décennies. A l'échelle inter-annuelle, le mécanisme dominant est l'interaction entre l'atmosphère et l'océan tropical, illustrée par le phénomène du réchauffement pseudo-périodique mais irrégulier du Pacifique équatorial Est, baptisé El Niño, accompagné d'oscillations planétaires tropicales dont la prévision représente un enjeu économique et humain considérable. A l'échelle de plusieurs décen-

nies, le facteur principal est l'augmentation du gaz carbonique dans l'atmosphère, qui suit le développement de l'activité industrielle. Les changements climatiques globaux (on s'attend à un réchauffement moyen voisin de deux degrés d'ici l'an 2050) et régionaux qui vont s'ensuivre concernent de façon dramatique l'humanité tout entière, et pourraient s'accompagner d'une élévation du niveau des océans consécutive à la fonte d'une masse importante de glace antarctique.

Robert Sadourny, directeur de recherche au CNRS, directeur du Laboratoire de météorologie dynamique (LP 1211 du CNRS), Ecole polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex.

La physique originale des océans



La vorticité potentielle (une quantité proche du moment cinétique angulaire) des courants de surface dans un océan rectangulaire forcé par un régime de vent symétrique (vers l'Ouest au centre du bassin). Cette quantité, pierre d'angle des théories océaniques, est quasi conservée au cours du mouvement d'une particule fluide sauf aux très petites échelles où elle est dissipée. Des courants de bord Ouest convergent vers le centre du bassin puis p n tr nt l'intérieur, soumis à de grandes instabilités. Les flots de retour vers l'Est sont plus calmes et de grande échelle. Notez les anneaux tourbillonnaires de part et d'autre du jet central dirigé d'Ouest vers l'Est. Photographie d'une simulation numérique de Madame Bach Lien Hua.

Alain Colin de Verdière

De par l'impact climatique fondamental de l'océan et dans le souci de préserver son intégrité géochimique face aux pollutions accidentelles, une grande expérience océanographique internationale WOCE (World Ocean Circulation Experiment) est prévue   la fin de ce siècle pour révéler les courants océaniques avec une couverture géographique et temporelle inégalée. Elle permettra de voir comment le fluide océanique sujet aux contraintes de la rotation terrestre effectue son transport de chaleur. Il faut souligner que, d'une part, la turbulence dans l'océan est beaucoup plus riche que dans l'atmosphère, et que, d'autre part, les frontières méridiennes induisent un comportement de l'océan très particulier, le rapport de la taille des bassins océaniques à celle des tourbillons étant typiquement d'un ordre de grandeur supérieur à celui de l'atmosphère.

Alain Colin de Verdière, ingénieur de recherche au CNRS, Laboratoire de dynamique des circulations planétaires dans l'océan (UA 710 CNRS), IFREMER, COB, B.P. 337, 29273 Brest Cedex.

La surface du Soleil est turbulente

Les mouvements granulaires à la surface du soleil ne sont pas de nature convective mais turbulente. Découverte récente qui rappelle combien la mécanique des fluides est présente en astrophysique.

■ Jean-Paul Zahn

Nous vivons sur une planète solide, et de ce fait, nous avons tendance à oublier que presque toute la matière de l'Univers est sous forme fluide : les planètes géantes, le Soleil et les autres étoiles, le milieu interstellaire et l'espace intergalactique. En fait, le constituant principal de l'Univers est l'hydrogène ionisé. C'est pourquoi la dynamique des fluides – au sens large du terme, incluant la magnétohydrodynamique – joue un rôle si important en astrophysique.

Elle gouverne la plupart des phénomènes de transport ; elle domine les phases rapides de l'évolution stellaire, dont la manifestation la plus spectaculaire est une explosion de supernova ; dans les étoiles et dans les galaxies, elle est la clé de la génération du champ magnétique et donc des mécanismes d'activité ; les instabilités hydrodynamiques ont été déterminantes dans la structuration de l'Univers primordial.

Pourtant, bien que son champ d'application soit très vaste et qu'elle soit, comme on dit maintenant, incontournable, la dynamique des fluides astrophysiques est encore peu développée. Mais la situation est en train d'évoluer rapidement grâce aux nouveaux outils informatiques dont nous disposons, et grâce aux progrès réalisés dans le diagnostic. On en donnera ici une illustration qui concerne le Soleil.

Depuis les travaux de Bénard, on attribue l'aspect granuleux de la surface du Soleil (quand elle est observée avec une résolution suffisante, de l'ordre de la seconde d'arc) à des mouvements engendrés par la convection thermique. Or une percée est en train de s'opérer dans l'interprétation de cette granulation solaire. Utilisant un spectrographe de conception particulièrement bien étudiée, des astronomes de l'Observatoire de Meudon et de l'Observatoire Midi-Pyrénées ont réussi à mesurer au Pic du Midi le champ de vitesses à la surface du Soleil. Ils ont ainsi déterminé le spectre d'énergie cinétique des mouvements convectifs, et ont trouvé que la pente de ce spectre était très voisine de $-5/3$, prouvant ainsi la nature turbulente des mouvements granulaires, alors que l'on croyait avoir affaire à des cellules convectives classi-

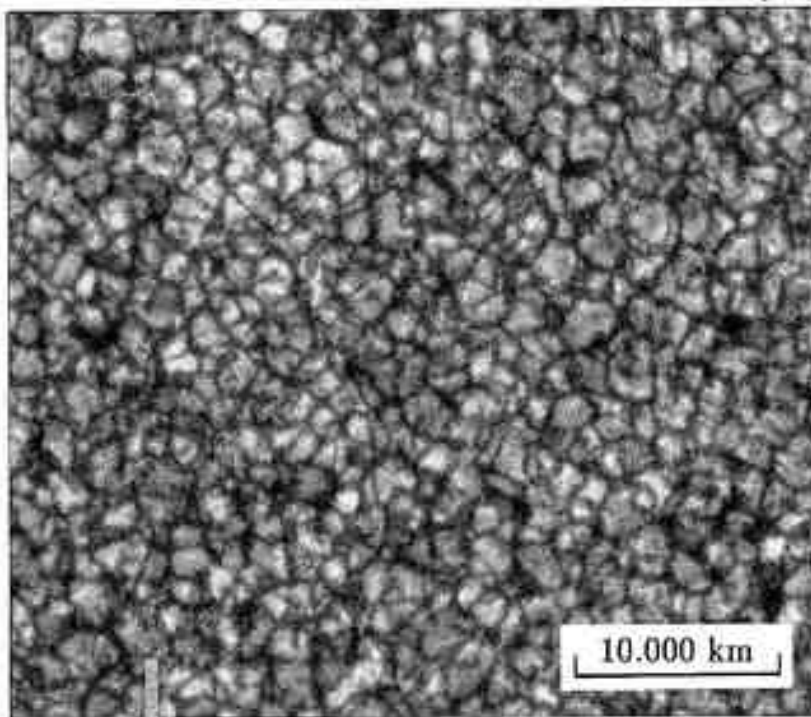
ques. Ces observations prouvent que l'instabilité convective se manifeste à des dimensions plus élevées, probablement à l'échelle de la supergranulation ; celle-ci a été découverte bien après la granulation, car elle n'est pas décelable simplement, comme elle, par des fluctuations d'intensité, mais seulement dans le profil de certaines raies, qui portent la signature de l'effet Doppler-Fizeau. Les astrophysiciens auront probablement quelque peine à admettre que les granules sont chauds (donc brillants) parce qu'ils montent, alors qu'il paraissait évident jusqu'ici qu'ils montaient parce qu'ils étaient chauds (poussés par la force d'Archimède).

Si ce résultat se confirme, il signifierait que les tentatives en cours de modélisation de la convection solaire sont vouées à l'échec. En effet, les calculs se font en retenant comme plus grande

taille, dans un pavage périodique de l'espace, celle de la granulation, soit environ 2 000 kilomètres, alors que toute l'énergétique est conditionnée par ce qui se passe à l'échelle de la supergranulation, soit 30 000 kilomètres. Or la période doit être portée à cette dernière dimension, si l'on veut être capable de décrire la cascade d'énergie depuis son injection, au niveau du supergranule, jusqu'à la limite de résolution imposée par la puissance et la mémoire de l'ordinateur. Au passage, on reconnaît l'importance des prescriptions auxquelles on est obligé de recourir pour représenter ce qui se produit aux échelles plus petites que la maille.

Sur cet exemple du Soleil, on a vu l'étroite imbrication de l'observation et de la modélisation, dans la manière d'aborder la dynamique des fluides astrophysiques. C'est ce qui explique la présence d'hydrodynamiciens dans les observatoires et laboratoires astrophysiques, mais trop peu nombreux encore pour tout le travail à accomplir.

■ Jean-Paul Zahn, astronome titulaire, Observatoire Midi-Pyrénées (INSU) 9 - U.A. 285 CNRS), université Toulouse III, 14, avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse.



La surface du Soleil est composée de cellules brillantes « granules » de 1 000 à 2 000 kilomètres de diamètre d'une durée de vie d'une dizaine de minutes et qui correspondent à un flux ascendant de matière chaude (© Observatoire Midi-Pyrénées).

Interlocuteur
des professionnels
de l'image et du son

Interlocuteur
des chercheurs

Interlocuteur
des médias

25 étoiles par seconde

Formation

Une mémoire

Une dramaturgie

Diffusion

Des outils
pour la recherche

Production

Un réseau Une équipe
Des équipements
(films et vidéo)

CNRS AUDIO-VISUEL
27, rue Paul BERT 94204 IVRY
Tél. : 46.70.11.52.

cnrs audio-visuel

Les champs de l'acoustique

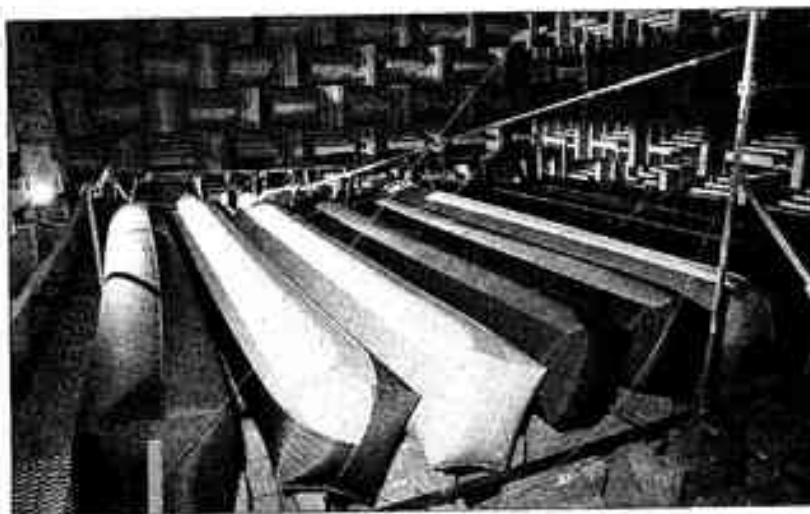
Branche de la mécanique, l'acoustique présente de nombreuses interactions avec les sciences voisines dont elle est parfois inséparable.

Michel Bruneau,
Jean Kergomard

Science du son, l'acoustique étudie la production, la transmission, la détection et les effets. La notion de son n'est pas attachée uniquement aux phénomènes aériens responsables de la sensation auditive, mais aussi à tous les autres phénomènes qui sont gouvernés par des principes physiques analogues. C'est ainsi que les infrasons et les ultrasons, la propagation acoustique dans les milieux denses (liquides, solides) et les vibrations relèvent de la notion générale d'acoustique. L'acoustique se distingue de l'optique et des ondes radio-électriques parce que le son est un mouvement ondulatoire mécanique et

non une onde électromagnétique. Elle est une branche de la mécanique.

L'immense étendue du champ d'intérêt de l'acoustique provient de causes variées. D'abord, nous subissons la nature omniprésente du rayonnement mécanique généré par des causes naturelles et par l'activité humaine. Mais le son est aussi un moyen de transport de l'information qui ne fait pas toujours référence à l'oreille (la communication sous-marine, par exemple), comme il est un moyen d'étude du milieu dans lequel il se propage et dont il porte la signature (l'échographie médicale en étant un exemple d'application). Enfin l'effet du son sur les substances et les corps avec lesquels il interagit ouvre encore un terrain de recherches et d'applications dans de nombreux domaines.



Relevé des caractéristiques acoustiques d'une paroi en matériau plastique gonflable dans la grande chambre anéchoïque du Laboratoire de mécanique et d'acoustique du CNRS à Marseille. (© LMA-CNRS).

Les domaines de prédilection de l'acoustique.

Interactions de l'acoustique avec les autres sciences

De nombreux domaines de l'acoustique apparaissent comme des sources d'inspiration et d'applications fécondes dans de nombreux secteurs de l'activité humaine. Ainsi, l'acoustique physique qui est inséparable de l'électromagnétisme (pour l'intérêt porté aux cavités, aux guides d'onde, au rayonnement, à la propagation atmosphérique ou sous-marine, etc.) est également étroitement liée à l'interaction onde-matière en ce qui concerne la propagation en milieux divers (périodiques, inhomogènes, aléatoires, diphasiques, etc.). Pour sa part, l'acoustique médicale traite de la physiologie, voire de la psychologie, de l'audition, fait usage de l'imagerie ultrasonore (échographie) et constitue un chapitre de la biomécanique par l'étude des écoulements sanguins, etc.

De son côté, l'acoustique musicale est étroitement liée au traitement du signal et à l'informatique (par l'analyse et la synthèse des sons) ainsi qu'à l'acoustique physique (par l'étude du fonctionnement des instruments de musique). Elle doit également à l'acoustique physiologique et psychologique, à l'acoustique architecturale ou encore à l'électroacoustique. L'acoustique de la parole connaît actuellement un développement important dans le domaine de la reconnaissance des formes et de la synthèse de la parole en liaison avec l'audition, la phonétique, le dialogue homme-machine, etc.

Il y a encore lieu de citer l'acoustique de l'environnement dont l'objet porte pour l'essentiel sur la lutte contre les bruits ainsi que l'électroacoustique dont l'intérêt apparaît en météorologie, en techniques du son, en détection acoustique (aérienne ou sous-marine), ou encore en téléphonie.

L'acoustique ultra-sonore est concernée par des applications qui entrent dans de nombreux domaines tels le contrôle non destructif, la microscopie acoustique, l'étude de propriétés de la matière, (supraconductivité, superfluides, états solides, plasmas, fluides denses, films minces, surfaces, etc.). Et « last but not least », l'aéroacoustique qui s'intéresse à la génération, à la propagation, à la diffusion et à la diffraction des ondes acoustiques dans les écoulements.

Cette liste est bien entendu incomplète et la classification comporte un certain arbitraire, tant sont indissociables bon nombre de branches de l'acoustique. Le diagramme de la figure

résume les courants du savoir et de la technologie en acoustique ; il est une simple image de l'étendue de l'acoustique et des disciplines auxquelles elle est associée.

Bien que trop rapides, les évocations qui précèdent permettent de souligner la place que tient l'acoustique dans l'activité scientifique d'aujourd'hui. Le bref historique qui suit montre combien l'acoustique omniprésente fut de tout temps un objet de fascination.

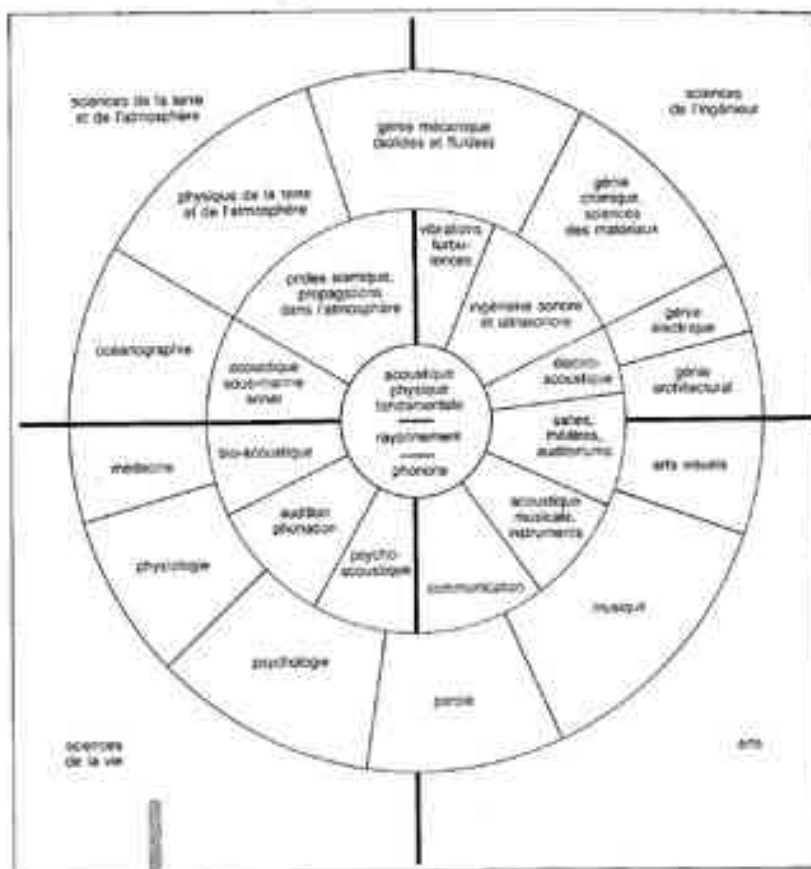
Historique

L'intérêt porté par l'homme aux phénomènes sonores remonte à la nuit des temps, mais cet intérêt ne fut pas dès l'origine d'ordre scientifique. Les premières recherches concernant les phénomènes sonores datent du VI^e siècle avant l'ère chrétienne, époque à laquelle l'école pythagoricienne se pencha sur le fonctionnement des cordes vibrantes et construisit une échelle musicale. Par la suite, l'éventualité que le son possède un comportement ondulatoire fut énoncée notamment par Aristote (IV^e siècle av. J.-C.), par Chrysippe (III^e siècle av. J.-C.), par Vitruve (I^{er} siècle av. J.-C.) et par Boèce (V^e siècle ap. J.-C.).

Les réflexions menées au cours des dix-sept premiers siècles de notre ère et à la suite des Anciens depuis Pythagore amenèrent le P. Marin Mersenne (1588-1648) et le célèbre Galileo Galilei (1564-1642) à faire de l'acoustique, en relation avec le développement de la mécanique, une véritable science du phénomène sonore. La seconde moitié du XVII^e siècle fut alors marquée par la mise en évidence de l'incapacité des ondes acoustiques à se propager dans le vide par Robert Boyle, puis par l'interprétation, en termes d'ondes, des phénomènes sonores et lumineux par C. Huygens.

La théorie mathématique de la propagation sonore a commencé avec Isaac Newton (1642-1727), et les progrès substantiels dans le développement de la théorie de la propagation du son apparurent au XVIII^e siècle avec les travaux de Leonhard Euler (1707-1783), Joseph-Louis de Lagrange (1736-1813) et Jean Le Rond d'Alembert (1716-1783). Durant cette époque, la physique du continu ou théorie des champs (dont le champ sonore) commença à accéder à sa structure mathématique définitive. Depuis lors, les théories, aussi complexes soient-elles, sont considérées pour la plus grande part comme des raffinements de celles qui datent de cette période.

La conjonction de ces découvertes fondamentales et de l'apparition des méthodes et techniques expérimentales



Les ramifications de l'acoustique. Diagramme (revu et modifié) adapté de R. B. Lindsay, « Journal of Acoustical Society of America », n° 36, 1964.

est à l'origine des multiples développements que connut l'acoustique au cours du XIX^e siècle. Parmi ceux-ci, citons ceux qui permirent la mesure de la vitesse de propagation des perturbations sonores (V. Regnault,...), l'analyse des sons complexes (H. von Helmholtz, F. Savart, J. Fourier,...) et la visualisation des vibrations de l'onde acoustique (capsule manométrique de K.R. Koenig).

À l'aube du XX^e siècle, le couronnement des recherches en acoustique a été marqué par l'œuvre magistrale de John William Strutt, lord Rayleigh (1842-1919), qui, notamment, synthétisa les connaissances acquises dans son traité « La Théorie du Son » (1877-1885). Les bases de l'acoustique étaient désormais posées.

L'histoire, au XX^e siècle, de cette vaste science qu'est l'acoustique, est parsemée de multiples ramifications, comme en témoignent les propos tenus dans les paragraphes qui précèdent et dans les articles qui suivent, présentant ces différents aspects modernes. Tout au plus citons-nous ici, pour conclure, quelques noms illustres qui ont marqué

leur époque dans des domaines divers : les frères Pierre et Paul-Jacques Curie, Paul Langevin, Yves Rocard, Léon Brillouin, Wallace C. Sabine, Philip M. Morse, Georg von Bekesy, James Lighthill...

Jusqu'à la seconde guerre mondiale, l'acoustique fut une discipline importante surtout en Allemagne et aux États-Unis. En France, hormis quelques pionniers, ce n'est que depuis le début des années 1970 qu'elle connaît son plein essor ; c'est ainsi qu'au dernier congrès international d'acoustique, qui s'est tenu en territoire américain, la centaine de Français présents représentait plus du dixième des congressistes.

■ Michel Bruneau, professeur à l'université du Maine, responsable du Laboratoire d'acoustique de l'université du Maine (UA 1101 CNRS).

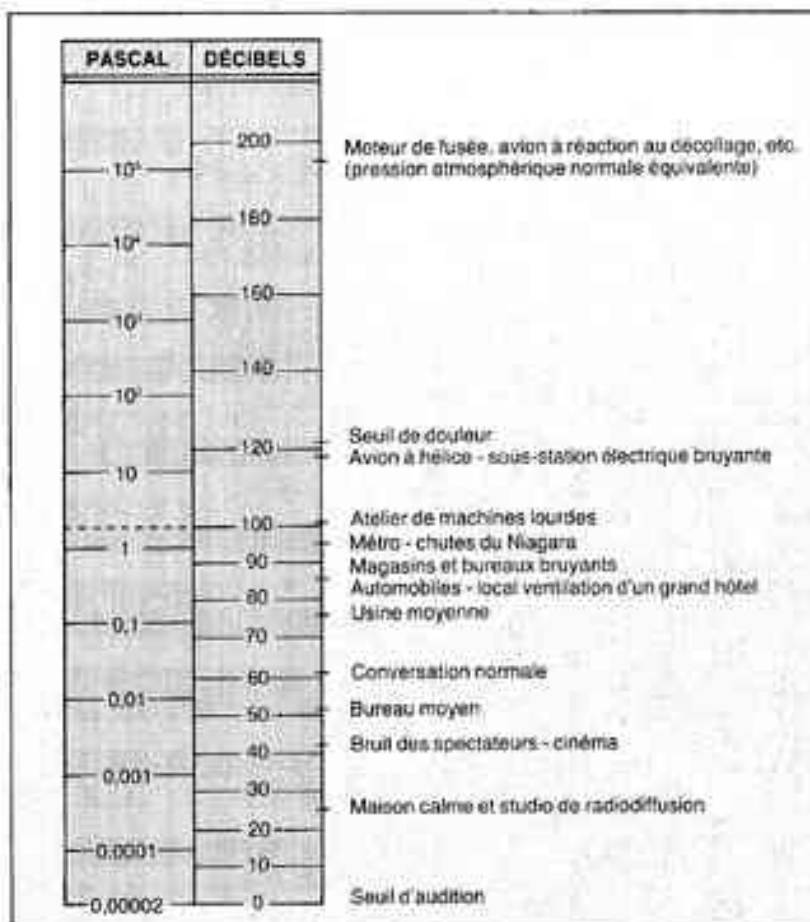
■ Jean Kergomard, chargé de recherche, Laboratoire d'acoustique de l'université du Maine (UA 1101 CNRS), UER des sciences exactes et naturelles, BP 535, 72017 Le Mans Cedex.

Les décibels

— Jean-Dominique Polack

Le diagramme ci-contre représente le niveau de pression acoustique de quelques sources sonores. Ce niveau s'exprime en décibels (dB), unité logarithmique définie par rapport à une pression de référence de $2 \cdot 10^{-5}$ pascal (Pa) qui correspond au seuil d'audibilité de l'oreille à 1000 hertz (Hz), fréquence où la sensibilité de l'oreille est maximale. Un sujet normal peut détecter des sons sur une plage de plus de 120 dB sans souffrir ni subir de dommage physique. Mais l'exposition prolongée à des bruits de plus de 90 dB peut suffire à détériorer l'audition à long terme. Bien qu'une variation de 3 dB corresponde à un doublement de la puissance acoustique, des expériences répétées sur un grand nombre de sujets ont montré qu'un accroissement de 6 à 10 dB produit un son qualifié de « deux fois plus fort ». Mais 1 dB correspond à peu près au seuil de détection de la variation d'intensité.

— Jean-Dominique Polack, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire d'acoustique de l'université du Maine (UA 1101 CNRS), université du Maine, BP 535, 72017 Le Mans Cedex.



La vitesse du son dans les fluides

— Michel Bruneau

Les premières mesures sérieuses ont été effectuées dans un programme de l'Academia del cimento de Florence en 1660, puis dans celui de l'Académie des sciences de Paris, qui proposa en 1738 la valeur de 332 mètres/seconde à 0 degré centigrade (par une mesure en plein air), alors que la valeur proposée depuis 1942 est de 331,45 mètres/seconde (à 0,02 % près) !

Aujourd'hui, la métrologie s'est affinée ; c'est ainsi que depuis peu, faisant usage d'un résonateur sphérique usiné avec une très grande précision, et dans des conditions thermodynamiques très bien définies, il est possible de mesurer la vitesse du son dans les gaz avec cinq chiffres significatifs.

On bénéficie de la sorte d'une



méthode d'obtention de paramètres caractéristiques de la nature du gaz. Plus généralement, la mesure de la célérité dans la matière (fluide ou solide), souvent jumelée à celle de l'atténuation du son (qui résulte de divers mécanismes dissipatifs), permet aujourd'hui l'accès à des informations précises sur le milieu de propagation et prend ainsi sa pleine signification.

— Michel Bruneau, professeur à l'université du Maine, responsable du Laboratoire d'acoustique de l'université du Maine (UA 1101 CNRS), UER des sciences exactes et naturelles, BP 535, 72017 Le Mans Cedex.

Expérience de mesure de vitesse du son par le Bureau des longitudes (1822), demandée par Laplace. (Extrait de L'acoustique de R. Radau, Hachette, 1880, p. 77).

Les chambres anéchoïques

— Henri-Simon Arbey



Chambre semi-anéchoïque de l'INRS; volume 500 m³, isolement en transmission 80 dB des 60 Hz, bruit de fond inférieur à 10 dB (© INRS).

L'absorbant acoustique sur les parois élimine toute réverbération des ondes: ainsi le champ sonore émis par une source est le même que si cette source se trouvait en espace libre, loin de tout obstacle. Pour éliminer le bruit de fond, on utilise la technique de la double enceinte: la chambre intérieure est isolée du reste du bâtiment à l'aide de suspensions anti-vibratiles, l'aération étant équipée de silencieux. Les chambres anéchoïques classiques sont utilisées pour mesurer le rayonnement acoustique des sources de petites dimensions; le plancher est traité acoustiquement et recouvert par un caillbotis amovible; elles se distinguent des chambres semi-anéchoïques, employées pour les sources de grandes dimensions (véhicules, machines,...), dont le plancher est en béton.

Henri-Simon Arbey, chef du service métrologie, acoustique, vibrations à l'INRS, Institut national de recherche et de sécurité, avenue de Bourgogne, BP 27, 54501 Vandœuvre Cédex.

L'essor du sondage acoustique

Depuis les premiers sonars, les méthodes de sondage acoustique ont connu un extraordinaire essor dont l'échographie médicale, la sismique-réflexion et le contrôle des pièces mécaniques ne sont que quelques exemples d'intérêt civil.

— Jean-Pierre Lefebvre

Bien avant l'homme, l'animal a su mettre à profit les propriétés de propagation et de diffraction des ondes acoustiques pour appréhender son environnement: le dauphin est doté par la nature d'un sonar extrêmement performant et la chauve-souris d'un sodar (homologue aérien du sonar) qui n'a rien à lui envier. Le dispositif de base du sondage acoustique est le Sonar (SOund Navigation Ranging), inventé par P. Langevin au cours de la première guerre mondiale, pour détecter les sous-marins. Ce sont cependant des préoccupations purement civiles, puisque d'ordre médical, qui devaient conduire au produit très achevé qu'est aujourd'hui l'échographie, prolongement naturel du sonar, et archétype avec la sismique-réflexion de l'écho-sondage acoustique. Il s'agit là de la première technique véritablement opérationnelle d'imagerie acoustique, après les déboires de l'holographie acoustique, exemple-type de l'imagerie acoustique en transmission. Cette dernière, imaginée empiriquement dans les années trente (soit une dizaine d'années avant l'holographie optique de D. Gabor) par S.J. Sokolov, ne devait jamais en effet sortir des laboratoires, du fait de l'absence d'un homologue acoustique de la plaque photographique, c'est-à-dire d'une rétine phonosensible.

L'échographie, stade imagerie du sonar, occupe actuellement une place de choix dans le domaine médical. On essaie maintenant de la diffuser à d'autres domaines comme, par exemple, le contrôle des matériaux. Dans ce dernier cas, on n'a plus affaire véritablement à des ondes sonores pouvant être décrites par des simples grandeurs scalaires, mais à des ondes élastiques, nécessitant d'avoir recours à des grandeurs vectorielles. On continue néanmoins à utiliser le même terme de sondage acoustique; de même qu'en sismique-réflexion, procédés échographiques d'investigation du sous-sol.

La tendance actuelle est à l'imagerie numérique dont l'objectif à terme est l'imagerie quantitative. C'est par

exemple, la tomographie ultrasonore, l'holographie numérique, l'antennerie synthétique. La voie a été ouverte, en génie biologique et médical, par la tomographie X et, en géophysique, par la sismique-réflexion, discipline où les enjeux économiques autorisent depuis toujours l'emploi des plus gros calculateurs. Cette généralisation du numérique est due aux progrès effectués par la micro-informatique. Celle-ci offre au mono-utilisateur des moyens de calcul déjà comparables à ceux du matériel implanté dans les « scanner » X de la première génération, et probablement bientôt comparables à ceux qu'offrent actuellement les superordinateurs utilisés pour le dépouillement des campagnes de sismique-réflexion.

C'est ainsi qu'est actuellement en train de se développer une nouvelle discipline, le sondage acoustique, discipline concernée principalement par trois grands domaines d'application:

- les applications géophysiques: sondage de la terre (sismique-réflexion et réfraction), de la mer (Sonar, Sonar Doppler, acoustique sous-marine en général), de l'atmosphère (Sodar, Sodar Doppler);
- le diagnostic médical (échographie, débitmétrie Doppler);
- l'analyse (spectrométrie ultrasonore) et le contrôle des matériaux (caractérisation des matériaux, contrôle non destructif, microscopie acoustique); celui des écoulements industriels (débitmétrie).

Dans cette discipline, tous les problèmes se posent à peu près dans les mêmes termes scientifiques (c'est-à-dire tant physiques que mathématiques et numériques): excitation d'une onde mécanique contrôlée dans un milieu, interaction de cette onde avec le milieu, mesures de diffraction ou de propagation, inversion des données pour atteindre les paramètres caractéristiques (du point de vue acoustique) du milieu. Le traitement du signal occupe une place centrale dans cette stratégie.

Les différences ne tiennent finalement qu'aux échelles et à la technologie de la transduction. En effet, pour avoir une sensibilité optimale aux paramètres recherchés, il faut que la longueur d'onde utilisée soit du même ordre de grandeur que les échelles ca-

► caractéristiques du milieu. Ceci nécessite un choix adapté d'une part de la fréquence de travail, d'autre part de la période d'échantillonnage spatial des mesures (qui doit être du même ordre de grandeur, et, si possible, inférieure à la longueur d'onde). On devra ainsi adopter des fréquences allant de quelques Hertz à quelques dizaines de Hertz en sondage sismique (longueurs d'onde décimétriques, voire kilométriques), à quelques centaines de mégahertz, voire de gigahertz pour la microscopie acoustique (longueurs d'onde micrométriques), en passant par exemple par le ou les Mégahertz pour l'échographie (longueurs d'onde de quelques dixièmes de millimètre).

Le résultat est qu'une « barette » (antenne linéique) d'échographie diffère quand même notablement, ne serait-ce que par la taille, d'une chaîne de canalisations de vibro-sismique.

On peut classer les applications au sondage en deux catégories : celles qui exploitent les propriétés de propagation des ondes et qui donnent accès aux échelles supérieures à la longueur d'onde ; et celles qui exploitent leurs propriétés de diffraction, et qui donnent accès aux échelles plus petites ou égales à la longueur d'onde. Dans les deux cas, on peut atteindre l'imagerie. C'est ce que font l'échographie et le sondage sismique en réflexion, l'échographie en transmission, et la tomogra-

phie dans les deux cas. Mais les ondes acoustiques peuvent délivrer des informations non seulement sur la morphologie, mais également sur la structure des matériaux. C'est ainsi que la spectroscopie d'absorption ultrasonore a permis la première de mettre en évidence un couplage non linéaire (dit « anharmonique ») entre le champ et les modes d'ondulation des couches dans les phases smectiques des cristaux liquides.

■ Jean-Pierre Lefebvre, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de mécanique et d'acoustique, (LP 7051 du CNRS), 31, chemin Joseph-Aiguier, 13402 Marseille Cedex 09.

L'évolution des transducteurs

Transformant l'énergie électrique en énergie acoustique, ou inversement, les transducteurs ne cessent d'évoluer dans leur principe physique, dans les matériaux utilisés et dans leur mise en œuvre.

■ Mario Rossi,
Jean-Noël Decarpigny

Il n'est pas de domaine de l'acoustique où l'on n'ait recours à des transducteurs. Des enceintes haute-fidélité aux têtes magnétiques d'enregistrement en passant par les projecteurs sonars, les transducteurs présentent des structures et des technologies très diverses du fait de la multiplicité des applications et des domaines de fréquence concernés, de la fraction de hertz au gigahertz.

Différents types de conversion d'énergie sont mis en œuvre : électrodynamique (haut-parleur à cône, par exemple), électrostatique (microphone à électret), magnétostrictive (nettoyage par ultrasons), ionique (haut-parleur à plasma), etc.

La conversion piézoélectrique est basée sur les effets Curie : déformation de certains matériaux soumis à un champ électrique et, réciproquement, polarisation effet d'une déformation. On distingue les matériaux piézoélectriques naturels de ceux, ferroélectriques, qui le sont devenus par application d'un champ électrique en fabrication. Le quartz est le matériau piézoélectrique le plus connu. Le niobate de lithium lui est supérieur, en particulier par sa température de Curie plus élevée. Les matériaux ferroélectriques

sont d'abord des céramiques, mélanges d'oxydes, principalement de titanates. Certains sont optimisés pour les transducteurs d'émission, d'autres pour ceux de réception. Leur principal avantage est la possibilité de les mouler dans différentes formes (barreaux, disques, cylindres, etc.) et de les polariser dans différentes directions. Les polymères ferroélectriques, par exemple le bifluorure de polyvinylidène, sont les matériaux les plus récents. Disponibles en films minces, ils se prêtent bien à la réalisation de microphones, d'hydrophones et d'écouteurs dont ils constituent la membrane réceptrice ou rayonnante.

Pour les applications industrielles ou les sonars actifs, les transducteurs piézoélectriques sont des dispositifs résonnants, c'est-à-dire qu'ils fonctionnent à une fréquence de résonance avec l'avantage d'un haut rendement, comparativement aux transducteurs à large bande. En-dessous de 100 kHz, un transducteur d'émission a des dimensions de l'ordre de la demi-longueur d'onde. Il comprend un empilement d'éléments piézoélectriques et des parties mécaniques assurant le transfert de l'énergie aux parties rayonnantes (pavillons, coques, sonotrodes, etc.) ou la définition des nœuds de vibration et des fixations. Les hydrophones, pour les basses fréquences, sont toujours beaucoup plus petits que les longueurs d'onde et comportent un élément pié-

zoélectrique sous enveloppe de protection, directement soumis au champ acoustique. Au-dessus de 100 kHz, un transducteur comprend une lame piézoélectrique épaisse d'un quart ou d'une demi-longueur d'onde, comprise entre un milieu arrière absorbant et un milieu avant formé de lames d'adaptation successives.

Une innovation récente est l'hydrophone acousto-optique. Son principe consiste à comparer les signaux laser issus d'une même source et transmis par deux fibres optiques, l'une étant soumise au champ acoustique. On détecte une variation de phase due aux variations de l'indice de réfraction et de la longueur de la fibre soumise au champ.

L'enregistrement audionumérique pose des défis difficiles. Ainsi, les têtes fixes de l'enregistrement magnétique longitudinal doivent être de très petites dimensions afin de loger un maximum de pistes sur un bande standard : 8, voire 16 pistes, plus 4 auxiliaires sur un bande de 6,3 mm. Pour réduire les pertes, les têtes sont réalisées par empilage de feuilles de ferrite et d'un matériau amagnétique. Dans les têtes à film mince, l'enroulement est formé par dépôt d'une couche sur un substrat magnétique, puis photolithographie. L'enroulement n'ayant que quelques spires, les courants d'enregistrement deviennent importants : d'où problèmes. Les difficultés de réalisation de têtes fixes pour appareils à cassettes ne sont pas encore surmontées.

■ Mario Rossi, Laboratoire d'électromagnétique et d'acoustique, Ecole polytechnique fédérale, CH 1015, Lausanne, Suisse.

■ Jean-Noël Decarpigny, Laboratoire d'acoustique de l'Institut supérieur d'électronique du Nord, (LIA 253-CNRS), 41, boulevard Vauban, 59046 Lille Cedex.

Acoustique sous-marine

Entre une source et un récepteur, l'onde acoustique est profondément perturbée par le milieu océanique. Pour construire des algorithmes permettant d'extraire des informations utiles, il faut passer par des modèles expérimentaux.

— Jean-Pierre Sessarego

Longtemps orientée vers les applications militaires, l'acoustique sous-marine (ASM) voit son développement actuel tourné pour une large part vers le domaine civil. Les besoins économiques des sociétés modernes nécessitent en effet d'exploiter les richesses de la mer, que ce soit au niveau de la pêche, de la recherche de pétrole ou de la recherche de nodules polymétalliques par grands fonds...

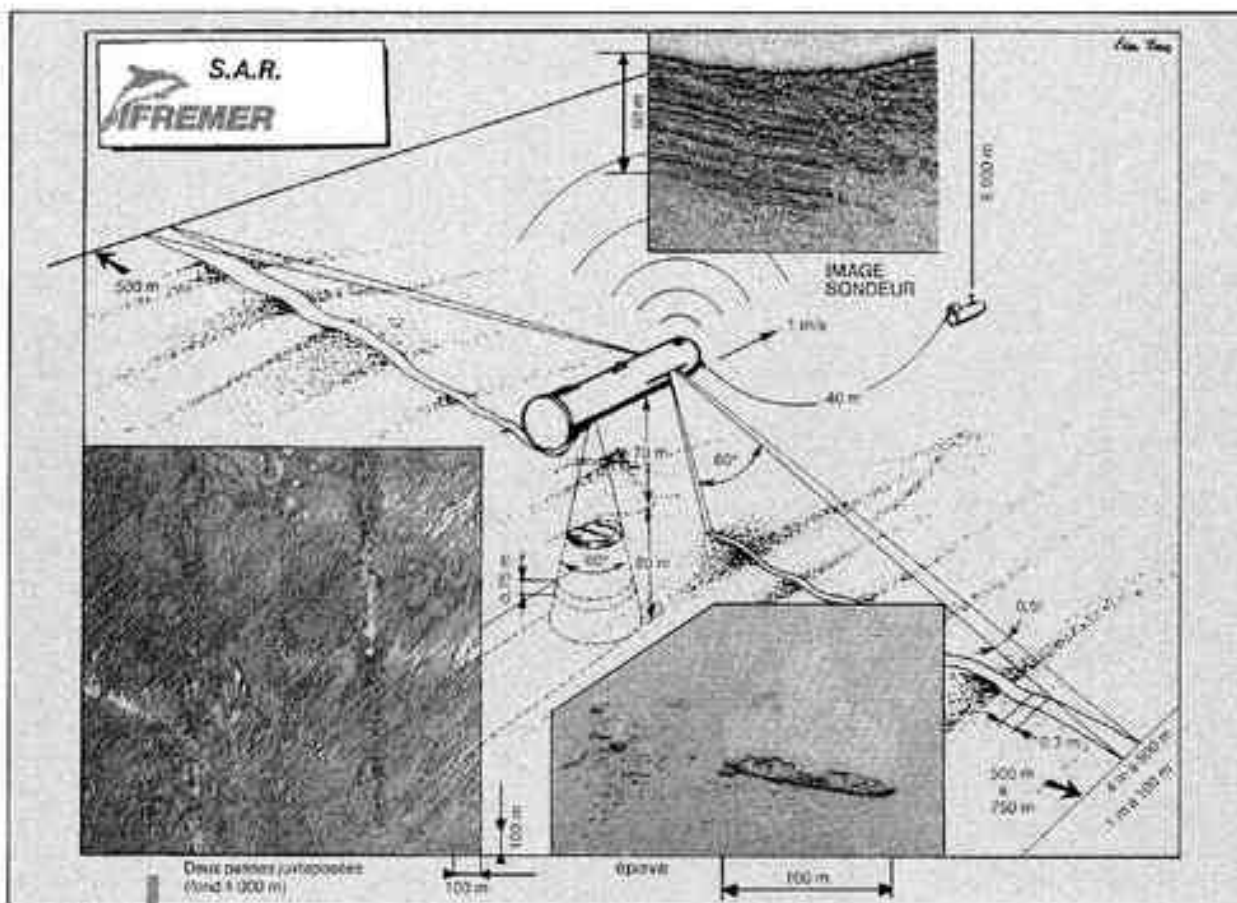
D'autres activités liées à l'océanographie physique, la cartographie du sous-sol marin, la recherche géologique, nécessitent également un développement et un transfert des techniques d'acoustique sous-marine dans le domaine civil. Ces besoins nouveaux se sont concrétisés par la mise en place en région Provence-Côte d'Azur d'un groupe de productique océanique dont l'objectif est d'assurer le transfert des connaissances entre chercheurs et industriels de la région ayant des activités tournées vers l'ASM ou des secteurs

très voisins. L'ASM englobe un champ d'applications tellement vaste qu'il serait hasardeux de vouloir la définir par quelques mots. Cependant on peut tenter d'effectuer une classification qui décrive les trois grands domaines que l'on peut dégager assez nettement.

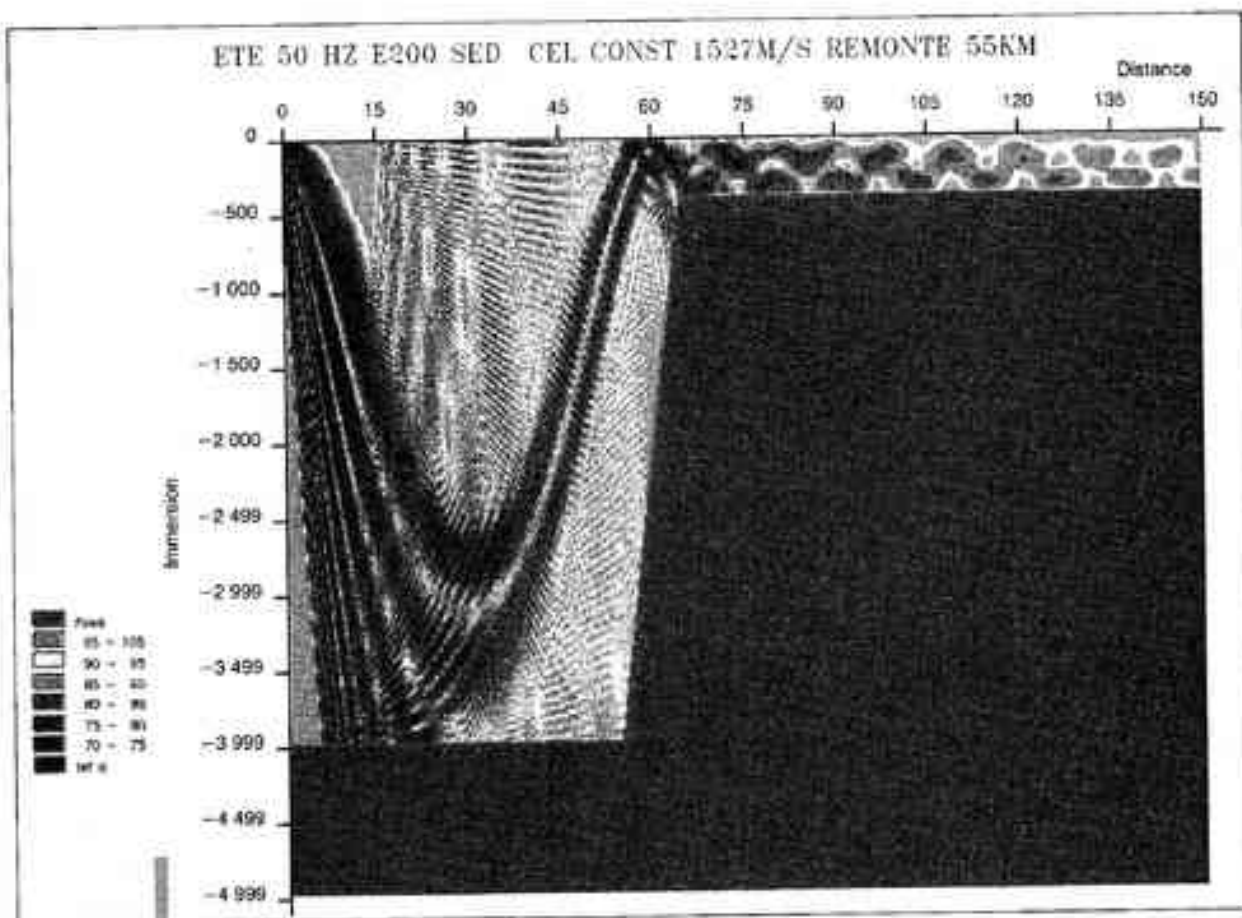
Le premier domaine regroupe tout ce qui concerne l'émission et la réception des signaux acoustiques. Il fait appel à la technologie des transducteurs et des hydrophones. C'est un domaine hautement technologique qui fait l'objet d'un article dans ce numéro, et nous ne le développerons pas plus avant.

Le deuxième domaine regroupe tous les problèmes liés à la propagation acoustique dans le canal marin.

Le troisième domaine rassemble plutôt l'imagerie, la détection et l'identification d'objets dans le milieu marin. C'est le domaine qui mobilise peut-être le plus de recherches et dont les applications au secteur civil sont immédiates.



Images en sonar latéral. Le SAR (système acoustique remorqué), développé par l'IFREMER avec le concours de Thomson Sintra et Eca, utilise la propagation des ondes acoustiques pour faire l'image des fonds sous-marins (sonar latéral) et l'image en coupe des couches de sédiments (sondeur pénétrateur). Les résolutions remarquables, de l'ordre du mètre, sont essentiellement dues au traitement du signal acoustique, à la directivité des antennes et à la stabilité du vecteur déplacement. (IFREMER).



Champ sonore calculé à partir de l'équation parabolique pour une source TBF (50Hz) immergée à 200 mètres avec une bathymétrie de type atlantique été. La variation du fond représente le talus continental avec un passage en quelques kilomètres du type « grand fonds » (4 000 mètres) à « petits fonds » (400 mètres). Une partie de l'énergie comprise dans la zone de convergence est alors « piégée » dans le guide d'onde que constituent les petits fonds. (© Bruno Grandvillain du GERDSM - La Brusc - Coopération CNRS/GERDSM).

► La propagation acoustique

Le problème direct : à partir d'hypothèses faites sur le milieu marin, on essaie de prévoir comment s'effectue la propagation. De nombreuses études sont entreprises soit en mer, soit en laboratoire après modélisation du problème sur maquette. C'est ainsi que l'on mesure l'atténuation des ondes acoustiques en basse fréquence et que l'on montre l'influence des effets de relaxation dus à des réactions entre les différents composants de l'eau de mer. On a étudié également sur maquettes l'influence des houles sur la propagation, l'influence des bulles et les problèmes liés à la propagation par petits fonds. Les études actuelles s'orientent vers la prise en compte de la nature du sous-sol marin. Les mesures de plus en plus fines effectuées en sismique marine nécessitent en effet de trier ce qui passe par le canal sous-marin de ce qui est transmis par le fond. Signalons en-

fin l'importance de l'équation parabolique comme outil privilégié pour résoudre certains problèmes de propagation.

Problème inverse : à partir de mesures locales, on espère remonter aux caractéristiques physiques du milieu marin. Les premières études menées en 1982 ont conduit à la tomographie océanique dont l'intérêt pour les océanographes ou pour les météorologues semble tout à fait évident.

Imagerie acoustique et détection d'objets

Aux États-Unis et surtout en France, des études ont été menées sur la diffusion acoustique par des cibles. Ces études avaient pour but d'étudier les mécanismes de formation des échos. Elles ont montré en particulier le rôle joué par les différentes ondes de surface dans le phénomène de la diffusion. L'étude de ces problèmes a pu être

faite grâce à des techniques élaborées de traitement du signal. Dans le cadre de l'imagerie proprement dite, les besoins en image haute résolution ont conduit à définir de nouveaux types de sonar. Le SPATH est un prototype de sonar hybride multifaisceaux alliant la précision du numérique à la rapidité de l'analogique. Il permettra l'aide à la navigation d'engins évoluant par grands fonds. Un sonar frontal utilisant une technologie basée sur l'optique de Fourier a été développé. Signalons aussi la mise en service du Système Acoustique Remorqué (SAR), sonar latéral haute définition, dont la vocation est la cartographie des fonds marins, et la réalisation d'un SONAR interférométrique pour la pêche.

■ Jean-Pierre Sessarego, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de mécanique et d'acoustique (LP 7051 du CNRS), 31, chemin Joseph-Aiguier, BP 71, 13402 Marseille Cedex 09.

Acoustique et parole

Une prise en compte approfondie des aspects acoustiques de la communication parlée contribuera à construire de meilleurs systèmes de reconnaissance, de synthèse et de transmission de la parole.

■ Jean-Sylvain Liénard

L'analyse, la synthèse et la reconnaissance de la parole sont des activités fortement liées à la reconnaissance des formes, l'intelligence artificielle, la linguistique, la psychologie. Pourtant, il ne faut pas oublier qu'il s'agit aussi d'acoustique, et que le signal est le seul matériau physique, objectif, par lequel se manifeste la parole. Nous en évoquons ici trois aspects : la production (phonation), l'audition et la transmission.

Le conduit vocal est un tuyau sonore, dont la forme, très irrégulière, et la configuration (un tuyau principal, le conduit oral, sur lequel se branche une dérivation, les fosses nasales) varient rapidement dans le temps. Ce tuyau est excité par une anche double, les « cordes vocales », aux instants « volés », ou par un jet d'air prenant naissance aux endroits où le canal est suffisamment rétréci (constrictions). L'ensemble source-conduit est contrôlé par une soixantaine de muscles, et permet de fabriquer une immense variété de sons, dont ceux de la parole.

On sait décrire par des équations le comportement de ce système ; mais certaines théories récentes remettent en cause les outils traditionnels de calcul, reposant sur des analogies électriques, et posent comme hypothèse que le déplacement d'ensemble du fluide n'est pas négligeable et que la vitesse peut localement atteindre des valeurs suffisamment élevées pour susciter des tourbillons qui se comportent comme autant de sources sonores secondaires.

L'audition met en jeu plusieurs processus acoustiques complexes. La fonction de transfert du pavillon de l'oreille et du conduit auditif modifie déjà la vibration aérienne. Puis le tympan et la complexe chaîne d'osselets de l'oreille moyenne transmettent la vibration (mécanique cette fois) à la cochlée, avec une fidélité toute relative. Enfin la cochlée, limacon liquide dans lequel se trouvent plongés des capteurs de déplacement (les cellules ciliées), est le siège d'une propagation ondulatoire en milieu dispersif. Au bout du compte, la vibration sonore est décomposée en fréquences graves et aiguës, et codée

en impulsions nerveuses avant d'être transmise au cerveau. Cette décomposition justifie l'utilisation du spectrographe acoustique pour l'étude de la parole (voir figure).

L'étude de l'audition a fait d'immenses progrès depuis une vingtaine d'années, mais n'a sans doute pas encore livré tous ses secrets. N'a-t-on pas découvert que le système auditif est un transducteur actif et non passif, c'est-à-dire que son fonctionnement physique dépend aussi d'impulsions venant du cerveau et traduisant en partie ce à quoi s'attend ce dernier ! Études psycho-acoustiques, simulations mathématiques et investigations physiologiques doivent se compléter pour avancer dans ce domaine délicat, où se déterminent en partie les structures acoustiques et perceptives de la parole.

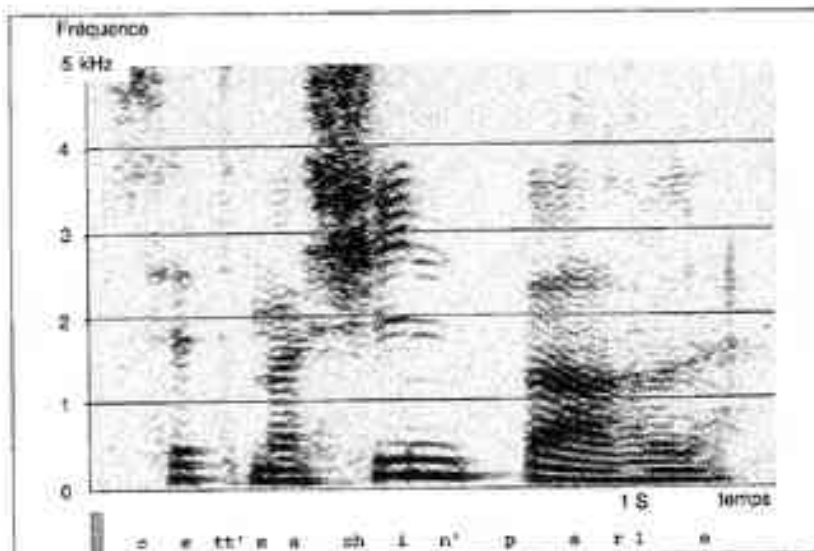
La transmission du signal entre l'organe vocal du locuteur et les oreilles de l'auditeur relève aussi de l'acoustique. Ici interviennent de multiples facteurs : la directivité acoustique de l'émetteur (la tête du locuteur), sa distance au récepteur (la tête de l'auditeur), la directivité de ce dernier, les bruits am-

biants, les distorsions de toutes sortes dues au local : échos, réverbération, résonances, antirésonances. L'audition met en jeu un capteur double – les deux oreilles – pour percevoir le relief sonore et compenser ces distorsions ; cette capacité extraordinaire n'est pratiquement pas exploitée par le traitement automatique de la parole.

On connaît mal la transmission sonore de l'organe vocal du locuteur vers son propre système auditif. Cette transmission se fait par voie aérienne – externe – mais aussi par voie osseuse, avec une atténuation et une distorsion considérables ; on est toujours surpris d'entendre sa propre voix enregistrée, comme l'entendent les personnes qui nous entourent. Ce phénomène de rétroaction est important, car c'est lui qui nous permet de réguler l'intensité, le débit, le timbre de la parole émise : il est sans doute essentiel dans l'apprentissage de la parole.

Il apparaît donc que les aspects acoustiques de la communication parlée, un peu négligés jusqu'à présent, méritent d'être étudiés pour mieux comprendre les phénomènes en jeu et, peut-être, contribuer à construire de meilleurs systèmes de reconnaissance, de synthèse et de transmission de la parole.

■ Jean-Sylvain Liénard, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire d'Informatique pour la mécanique et les sciences pour l'ingénieur - LIMSI, (LP 3251 du CNRS), université de Paris XI, bâtiment 508, BP 30, 91406 Orsay Cedex.



Spectrogramme acoustique de parole : la phrase prononcée est « cette machine parle » (locuteur masculin). On distingue une double structure : le réseau de raies représente l'évolution de la hauteur de la parole ; les zones plus ou moins noircies représentent les résonances du conduit vocal et correspondent à l'information phonétique de la parole.

Entre stimulations sonores et sensations

De notre sensibilité auditive à notre capacité à extraire une information du bruit ambiant, la psychoacoustique étudie les relations entre les signaux sonores et les sensations qu'ils procurent.

■ Georges Canévet

Nos réactions aux événements sonores dépendent de l'organe de l'audition, qui crée les sensations auditives, et surtout du cerveau, qui en effectue le traitement. Il y a donc nécessité d'étudier et de comprendre les mécanismes du fonctionnement de ce système. Une discipline est spécialisée dans cette étude : la psychoacoustique.

La psychoacoustique étudie les relations entre les stimulations sonores auxquelles nous sommes soumis et les sensations qu'elles engendrent chez l'être humain.

La diversité des recherches menées en psychoacoustique ne facilite pas une présentation synthétique. Cependant les grandes tendances de la recherche actuelle, en France et à l'étranger, sont assez bien représentées par la liste des thèmes décrits ci-dessous.

La sélectivité auditive

L'un des problèmes de base de la psychoacoustique concerne la détection, c'est-à-dire la capacité que nous avons de déceler la présence d'un signal acoustique dans du bruit. Cette détection n'est possible que si l'oreille possède un minimum de pouvoir de

discrimination, ou de séparation, qui lui permet de percevoir et de traiter séparément des sons de fréquences voisines. Comment pouvons-nous, dans le bruit, suivre la conversation d'un seul interlocuteur ? On a pu établir le rôle majeur de la capacité de sélection auditive dans la perception spatiale, dans le pouvoir de discrimination spatiale et dans la perception de la parole bruitée. Ainsi, les personnes atteintes de déficit auditif ont bien souvent des difficultés de compréhension de parole, non seulement à cause de la perte de sensibilité que cela entraîne, mais surtout à cause de la perte de sélectivité qui réduit considérablement la faculté de discrimination entre les signaux de parole utiles et les signaux de bruit. Actuellement, les recherches se poursuivent activement dans le monde entier pour tenter de mieux cerner ce problème et de parvenir peut-être à la conception de prothèses nouvelles.

La perception de l'intensité des bruits

L'intensité physique d'un son se traduit par une sensation d'intensité subjective que l'on appelle la sonie. La sonie d'un son dépend de sa durée. Et la mesure de sonie des sons très brefs ou impulsifs est encore une question

d'actualité. Une vaste campagne internationale de mesures avait été déclenchée il y a une quinzaine d'années pour résoudre ce problème (Round Robin Test). L'enjeu était d'aboutir à une normalisation qui permette d'évaluer les effets des bruits sur l'Homme, notamment dans son environnement professionnel.

L'opération a été très fructueuse, mais la variété et la complexité des bruits à caractère impulsif n'ont pas encore permis l'établissement de normes simples. Les recherches se poursuivent donc dans ce domaine. Un appareil spécialisé, sorte de sonomètre amélioré, est en particulier en cours de commercialisation.

Un autre aspect de la durée des bruits sur la sonie est le phénomène d'adaptation. On appelle adaptation de sonie, la décroissance dans le temps de l'intensité subjective d'un son continu dont l'intensité physique reste constante. La sonie, contrairement à la plupart des sensations, ne décroît généralement pas dans le temps si le son qui la provoque est d'intensité constante. Si elle se produit, cette décroissance est le reflet d'un effet de fatigue auditive, ou parfois de mécanismes complexes d'interactions binasales. Ces corrélations avec la fatigue, donc avec la fatigabilité et la vulnérabilité individuelle au bruit, font de l'adaptation de sonie un sujet de recherche tout à fait pertinent de nos jours.

Localisation et perception de l'espace auditif

On sait que le système auditif est très performant dans la localisation des sons. Cependant, le détail des mécanismes mis en jeu pour la localisation n'est toujours pas parfaitement connu. La tendance actuelle des recherches va donc dans le sens d'une meilleure connaissance de ces mécanismes et d'une tentative de leur modélisation. A terme, on souhaiterait développer des ensembles de localisation automatique de sources de bruit, y compris en présence d'échos, que l'on rencontre naturellement en acoustique des salles (effet de Hans).

■ Georges Canévet, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de mécanique et d'acoustique (LPM 7051 du CNRS), 21, chemin Joseph-Aiguier, BP 71, 13402 Marseille Cedex 09.



Isolé en chambre sourde, le sujet teste écoute des échantillons sonores dont on fait varier certains paramètres. Pour chacun d'eux, il rend compte de sa sensation à l'aide d'un clavier relié au laboratoire extérieur. (© LMA).

Images de l'acoustique musicale

Au service de la musique, de la physique et de la perception, l'acoustique musicale commence à faire ses preuves dans la facture des instruments traditionnels. Dans le domaine du son numérique, un champ immense s'offre à elle.

— Michèle Castellengo

Depuis une quinzaine d'années, l'étude du fonctionnement acoustique et du rayonnement des instruments de musique a connu un essor considérable. Comme par le passé, deux types d'approches coexistent : l'une qui s'intéresse au résultat sonore effectif obtenu par un musicien (analyse du son, perception) ; l'autre, ignorant largement l'instrumentiste, qui est à vocation explicative (modèles physiques, expériences fines).

La raison tient à la boucle de réaction musicien-instrument-son-salle-musicien qui a toujours été une difficulté majeure pour le physicien : ainsi les expériences avec instrumentistes sont-elles biaisées par le fait que ceux-ci adaptent l'émission à ce qu'ils entendent ; en même temps, cela motive l'intérêt de l'acousticien pour les instruments de musique traditionnels, créés au fil des siècles par adaptation et compromis successifs entre les données physiques, physiologiques et perceptives.

Fonctionnement des instruments

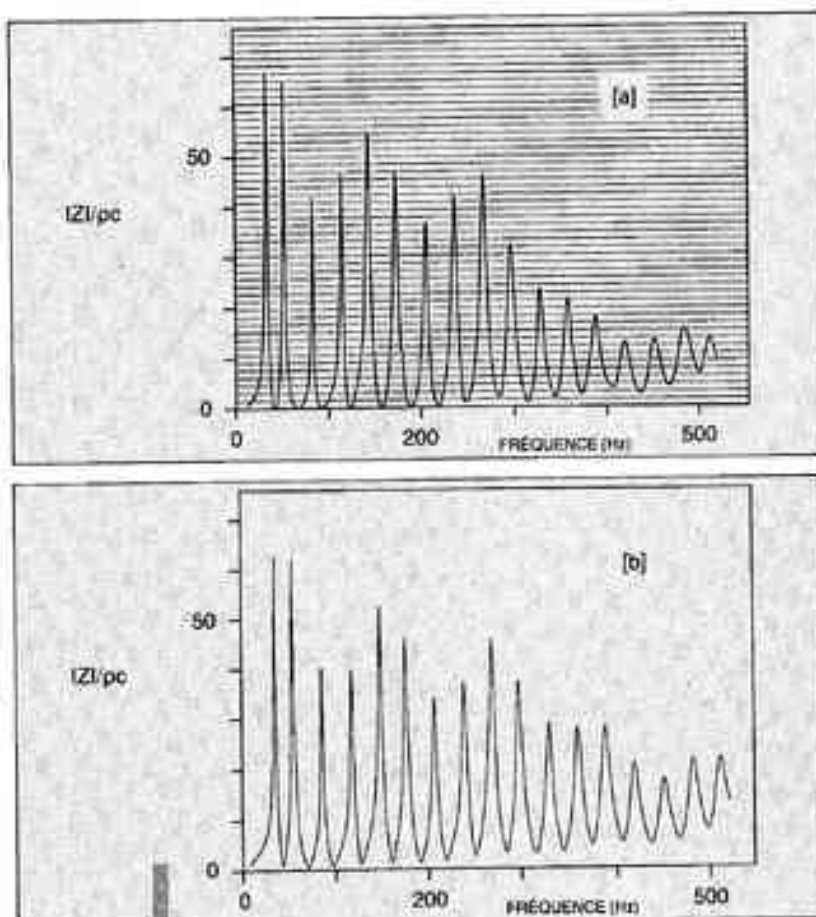
Dans le domaine expérimental, les progrès des capteurs (réduction des dimensions et du poids, construction de nouveaux capteurs, acquisitions multivoies) ont permis d'accéder à des mesures fines et sélectives. Ainsi, le problème de la corde vibrante s'est trouvé renouvelé par l'étude fine des cordes de clavecin : mise en évidence de couplages entre les modes longitudinaux et transversaux et de la non linéarité liée à la force de l'attaque, mesure de l'amortissement pour remonter aux paramètres physiques, ce qui ouvre des applications en métallurgie des cordes. Un autre exemple est celui des tuyaux sonores : la mesure de l'impédance d'entrée laisse entrevoir la possibilité de contrôler la qualité des perçes en fabrication. Elle a permis aussi de valider les théories des tuyaux sonores (avec dissipation) qui autorisent l'espoir d'une véritable conception assistée par ordinateur des modifications d'un

instrument. Ainsi, à la demande de musiciens de l'Institut de Recherche et de Coordination Acoustique Musique (IRCAM) et de compositeurs toujours désireux d'élargir les possibilités mélodiques des instruments, un système de clé permettant de jouer en 1/4 de tons vient d'être adapté à la flûte et à la clarinette (Brevet CNRS - IRCAM).

L'étude des vibrations des structures s'avère plus délicate : la visualisation

des modes des plaques (violon, guitare) par holographie interférométrique n'a pas apporté beaucoup plus de résultats que la méthode des poudres de Chladni, en raison de la limitation en fréquence et de l'interaction des structures. Quant aux éléments finis, ils conduisent à un volume de calculs considérable à cause du très grand nombre de paramètres.

La plus grande mutation théorique est apparue dans les années 80 avec l'apparition de modèles décrivant, dans le domaine temporel, l'ensemble des instruments à source d'énergie continue (cordes frottées, flûtes, anches). Leur fonctionnement non-linéaire, qui implique notamment l'enrichissement en harmoniques du son lors d'un crescendo, a été relié aux théories récentes du chaos déterministe, y compris lors de certains régimes particuliers comme les multiphoniques.



Courbe d'impédance d'entrée d'un tuba ([a] : expérience, [b] : calcul numérique). L'impédance d'entrée en fonction de la fréquence est une véritable signature acoustique de la forme intérieure d'un instrument à vent. La place et l'acuité des résonances donnent une indication respectivement sur les fréquences des notes jouées et leur facilité d'émission. (© René Causse, IRCAM ; J. Kergomard, Laboratoire d'acoustique de l'université du Maine ; X. Lurton, Thomson-Sintra).

Analyse, synthèse et perception du son musical

Le système auditif est un capteur d'information temporelle qui possède une très grande sensibilité différentielle à la fréquence et à l'amplitude. Dès qu'apparut le sonographe dans les années 50, son intérêt fut perçu par les acousticiens travaillant dans les domaines de la communication (parole, signaux animaux). Il fournit en effet une représentation donnant l'évolution de la fréquence et de l'amplitude en fonction du temps, qui est aisément interprétable en fonction des données de la perception (psychologie de la forme). Depuis, de nombreuses recherches ont été entreprises pour calculer et représenter la « fréquence instantanée » des signaux évolutifs ; elles ont abouti dernièrement à l'analyse par ondelettes conduisant à une représentation du type sonographe avec, de surcroît, toute la précision désirée.

Aujourd'hui un fait essentiel est l'utilisation de la synthèse numérique : grâce à elle, l'importance informative des phénomènes transitoires d'attaque ou d'extinction des sons et celle des petites fluctuations temporelles plus ou moins aléatoires fut mise en évidence. Les techniques actuelles offrent tous les moyens possibles de réaliser des sons complexes et intéressants.

Parmi ces techniques, la synthèse par simulation des phénomènes physiques utilisant les modèles temporels permet de restituer des transitoires instrumentaux d'un grand réalisme (bruits d'archet, attaque d'une anche), ainsi que les articulations du phrasé musical. Elle offre au compositeur un matériau pré-organisé, structuré par les règles physiques qui décrivent la vibration et qui, sur le plan de la perception, préservent une continuité sémantique lorsque l'utilisation musicale s'éloigne de la « simple » reproduction de sonorités d'instruments traditionnels. Enfin, elle permet au physicien de pouvoir éliminer, parmi les paramètres pris en compte dans ses modèles, les moins importants pour l'oreille.

Nous voyons là un exemple de convergence des deux approches citées plus haut, grâce à laquelle l'acoustique musicale sert à la fois la musique et la connaissance en physique et en perception. Pour les applications en facture instrumentale, cette science commence à faire ses preuves en ce qui concerne les instruments traditionnels et un champ immense s'offre à elle dans le domaine du son numérique.

■ Michèle Castellengo, chargée de recherche au CNRS, Laboratoire d'acoustique musicale (UA 868 CNRS), université de Paris VI, Tour 66, 4, place Jussieu, 75005 Paris.

Le luthier et les composites

Insensibilité à l'humidité, caractéristiques à la demande, reproductibilité ; les matériaux composites offrent des avantages auxquels les fabricants d'instruments à cordes sont loin d'être insensibles.

■ Charles Besnainou

Dans la facture des instruments de musique, les matériaux composites ont commencé à s'imposer en remplacement d'éléments de structure, puis d'éléments fonctionnels. Les premières tentatives remontent au début des années 70 : le manche et la caisse pour la guitare et, récemment, le clavier, les échasses et un cadre pour le clavecin. Mais la table d'harmonie, élément fonctionnel par excellence, reste en bois.

Le bois est un composite naturel de très haute performance dont l'anisotropie est utilisée dans le fonctionnement des instruments. Aussi plusieurs auteurs ont-ils cherché à étudier le bois en tant que tel pour en dégager un bon modèle.

A partir de vingt éprouvettes de bois couramment employées, Dominique Douau a fait des mesures systématiques : modules de Young longitudi-

naux, transversaux, radiaux, densité, pourcentage de bois d'hiver et de printemps, largeur des cernes annuels, longueur des trachéides, vitesse de propagation du son et amortissement viscoélastique. L'analyse factorielle des correspondances a permis de corréler les propriétés des bois avec les appréciations qualitatives portées par le luthier.

Un composite artificiel doit vérifier la cohérence du modèle. Une âme en carbone entre deux feuilles de placage en bois est la solution qui présente un moment d'inertie acceptable avec les qualités des modules de Young à haute fréquence, en même temps que les qualités esthétiques demeurent. Le calcul d'un composite a permis l'élaboration de tables de guitare qui donnent satisfaction au luthier et aux musiciens.

Les avantages de ce composite* sont sa complète insensibilité hygrométrique, ses caractéristiques mécaniques adaptables à la demande et sa reproductibilité. Plusieurs instruments sont déjà réalisés : luths, guitares, harpes. Nous poursuivons actuellement la réalisation de prototypes de violons, de clavecins et de pianos.

* Brevet CNRS - aide à l'innovation de l'ANVAR.

■ Charles Besnainou, assistant-ingénieur au CNRS, Laboratoire d'acoustique musicale (UA 868 CNRS), université de Paris VI, Tour 66, 4, place Jussieu, 75005 Paris.

Informatique musicale

Tout en étant mise au service de la synthèse et du traitement numérique des sons, l'informatique a contribué au renouvellement de la psychoacoustique musicale.

■ Jean-Claude Risset

Depuis quelques années, le marché de la musique est inondé de produits numériques, des synthétiseurs aux disques compacts. Cette invasion du numérique n'a pu se produire d'une façon aussi soudaine et conquérante qu'en s'appuyant sur les acquis d'un champ de recherche récent, l'informatique musicale, né en 1957 avec la mise en œuvre de la synthèse et l'enregistrement numérique des sons.

Les exigences musicales ont suscité d'importantes percées scientifiques et techniques dans le domaine du son numérique. L'informatique permet d'obtenir des sons de structure complexe et parfaitement connue. Cependant le choix des paramètres physiques ne suffit pas : ce sont les résultats auditifs qu'il faut maîtriser. Or la relation psychoacoustique entre paramètres physiques et effets sensibles est bien plus complexe qu'on ne le croit : on a pu synthétiser des sons qui semblent ralentir lorsqu'on double la vitesse de défilement du magnétophone. L'imita-

tion des instruments – véritable analyse par synthèse – a aidé à comprendre à quoi tenaient la vie et l'identité perceptive des sons. Les paradoxes auditifs ou illusions acoustiques réalisés grâce à l'ordinateur mettent en lumière les spécificités de la perception auditive, adaptée à extraire de l'environnement sensoriel des informations utiles à la survie. Il est naturel que la synthèse par simulation informatique des objets vibrants, spécialement étudiée en France, se prête à la fabrication d'objets sonores à l'identité robuste.

Le renouvellement de la psychoacoustique musicale est inséparable du travail sur les techniques de synthèse et de traitement numérique des sons. L'intérêt de ces techniques dépend de leur efficacité de calcul, mais également de leur capacité à contrôler des aspects du son auditivement pertinents. Il en est ainsi de la synthèse par modulation de fréquence, mais aussi des méthodes de distorsion non linéaire ou d'ondes formantes. Les méthodes d'analyse et de resynthèse peuvent permettre réduction de données, reconnaissance, mais surtout

transformations intimes sur des sons quelconques. Les applications sonores de la récente « transformation en ondelettes » paraissent particulièrement prometteuses (voir figure).

La recherche porte aussi sur la conception de stations de travail suffisamment puissantes, l'industrie ayant tendance à diffuser surtout des outils « clés en main » aux possibilités limitées. En France ont été réalisés de puissants processeurs de traitement du son musical. Le développement de circuits « very large scale integration » (VLSI) pose le problème de définir des architectures permettant des opérations musicalement utiles de façon économique. L'enjeu ultime déborde le milieu des musiciens professionnels : d'authentiques outils de création individuels pourraient susciter un renouveau de la pratique musicale.

■ Jean-Claude Rivet, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de mécanique et d'acoustique (LP 7051 du CNRS), 31, chemin Joseph-Aiguier, 13402 Marseille Cedex 09.

Chasse au bruit dans l'industrie

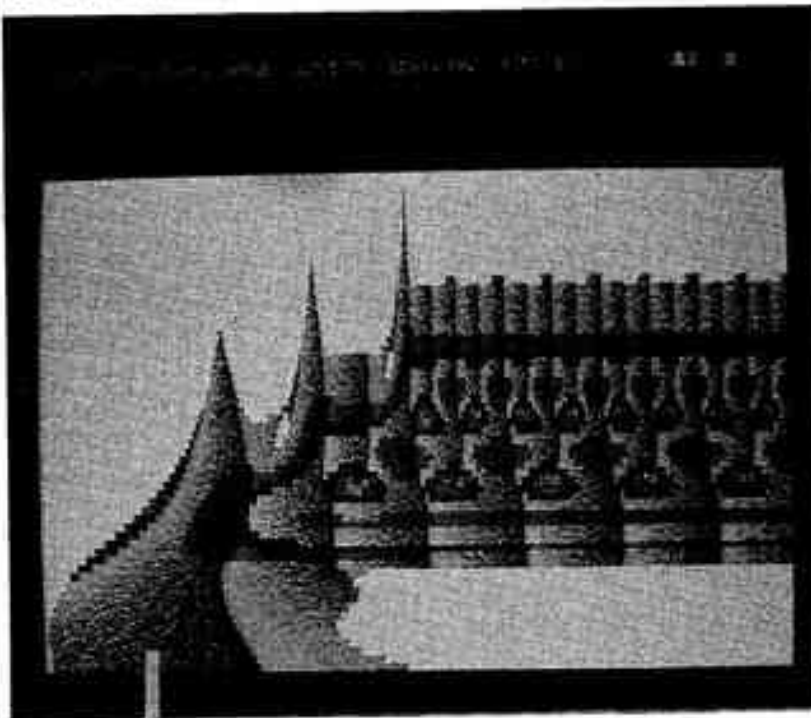
La recherche en acoustique industrielle s'efforce de remonter aux sources du bruit pour donner des outils permettant de prévoir et de réduire les nuisances sonores des machines futures, en même temps que la propagation des vibrations dans les structures et les bâtiments.

■ Jacques Delcambre

Le concept d'acoustique industrielle est apparu dans la décennie 60-70 : aujourd'hui, c'est une discipline en plein développement. Elle se situe à la frontière de la mécanique vibratoire, de la mécanique des fluides, de la thermique et de l'acoustique au sens classique du terme, et se nourrit aussi des apports de la psychoacoustique, de l'ergonomie et de la sociologie.

De quoi s'agit-il ? La conception d'un « objet », d'un produit manufacturé, d'une automobile, d'un atelier ou d'un ensemble industriel est tributaire d'une analyse spécifique pour que le bruit de cet « objet » ne soit pas cause de gêne ou de traumatisme dans son voisinage : tout ceci constitue le champ de l'acoustique industrielle.

Les recherches en ce domaine s'orientent résolument vers la prévision du bruit et plus précisément vers la compréhension et l'analyse des processus élémentaires de génération et de propagation de l'énergie sonore (ou vibratoire) mise en jeu dans toute machine, structure ou bâtiment. Ces processus sont essentiellement les suivants : la turbulence liée à l'écoulement des fluides, avec la présence ou non d'ondes de choc, la combustion ou les réactions chimiques, les changements d'état (cavitation, ébullition, etc.), le rayonnement des structures solides dû aux efforts vibratoires appliqués, aux frottements et aux chocs, les phénomènes électrodynamiques et la magnétostriction. La résolution des équations qui permettent de formuler ces problèmes est souvent rendue analytiquement impossible par la complexité géométrique ou fonctionnelle du moindre « objet » industriel. C'est le développement des mathématiques appliquées – induit et rendu possible par celui des ordina-

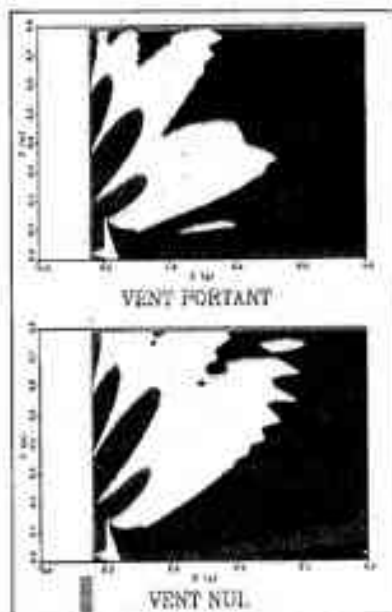


Représentation d'un son évolutif à l'aide de la transformée en ondelettes. L'onde sonore apparaît en haut de la figure en rouge. L'abscisse et l'ordonnée correspondent au temps et au logarithme de la fréquence. Sont figurés à la fois le module (en couleurs) et la phase modulo 2π (en densité de points noirs). Le module donne la distribution d'énergie. La phase permet de repérer facilement les discontinuités. À partir du module et de la phase, le son analysé peut être reconstitué ; on peut aussi lui faire subir des transformations intimes ou réaliser une synthèse croisée à partir de deux sons. (© réalisation : Richard Kromland-Martinet, photo Guy Riméymelle, Laboratoire de mécanique et d'acoustique du CNRS, Marseille)

teurs de hautes performances – qui permet aujourd'hui de lever en partie cette difficulté et de faire progresser l'acoustique industrielle de manière remarquable. Enfin, les techniques de surveillance des machines (diagnostic acoustique) peuvent évidemment bénéficier de ces développements ou encore les impulser.

Parallèlement à cette évolution, la métrologie acoustique a bénéficié des apports conjugués de la miniaturisation des capteurs et du développement des techniques de traitement du signal. La pression acoustique, seule grandeur qui fût pendant longtemps mesurable avec une précision satisfaisante, fait place à l'intensité sonore dont la mesure est désormais possible (voir article page suivante). Un processus analogue s'est engagé pour la métrologie des vibrations de structures : la vibrométrie, la vélocimétrie laser sont en plein essor.

Ce tableau rapide des développements actuels de l'acoustique industrielle doit mettre l'accent sur un fait : bien souvent, on ne sait pas concevoir une machine si peu bruyante que des dispositifs annexes insonorisants – tels que capotages, silencieux, ou revêtements amortissants – ne soient requis. Les techniques d'insonorisation – incluant l'absorption acoustique active –, sont donc elles-mêmes un champ de recherche en pleine expansion pour l'acoustique industrielle où calcul et simulation numérique se conjuguent à l'ex-



La propagation du son dans l'atmosphère : la modélisation numérique de plus en plus utilisée en acoustique industrielle est parfois la seule possible. On voit ici le calcul de l'effet d'écran sur la propagation du son provenant d'une source au voisinage du sol avec et sans vent. Par vent contraire, on observe que la zone d'ombre acoustique (zone bleue) est peu modifiée à proximité de l'écran. (© EDF ACT)

périence et à la tradition.

Cette description – non exhaustive – du champ de l'acoustique industrielle serait incomplète sans la mention de deux domaines d'intérêt majeur : l'acoustique prévisionnelle interne aux locaux industriels, où les préoccupations de sécurité et de confort dominent généralement le souci d'esthétique, et la prévision de la propagation du son en espace extérieur, où plusieurs approches sont utilisées (modélisation physique avec transposition fréquentielle, modélisation numérique, approches mixtes qui optimisent le dosage de ces deux techniques).

On remarquera que la cohérence de cette perspective de contrôle du bruit prend un éclairage particulier si l'on observe la préoccupation au bruit que certaines activités de loisirs semblent susciter aujourd'hui. La maîtrise de cette contradiction apparente dépasse le domaine de l'acoustique industrielle. Il s'agit plus d'analyse des comportements, de sociologie et de culture que de physique. Cependant, les succès attendus de l'acoustique industrielle posent des problèmes en termes nouveaux : après avoir minimisé les bruits industriels et domestiques, il faudra peut-être demain apprendre à les modeler pour les rendre harmonieux.

■ Jacques Delcambre, chef du département acoustique, EDF/Direction des études et recherches, 1, avenue du Général-de-Gaulle, BP 408, 92141 Clamart Cedex.

A l'écoute des matériaux

Sous contrainte, un matériau émet des signaux acoustiques transportant une information précieuse qui permet de le caractériser ou d'en surveiller le comportement.

■ James Roget

« **L'**émission acoustique est un phénomène de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires au sein d'un matériau soumis à sollicitation ». Autrement dit, elle est analogue à l'activité sismique enregistrée sur la terre, activité révélatrice de ruptures localisées de l'écorce terrestre par suite d'accumulation de contraintes

dépassant la résistance du matériau.

La détection et l'analyse des signaux d'émission acoustique permettent d'obtenir des informations inédites sur les mécanismes physiques associés à la déformation des matériaux ainsi que sur la présence de défauts.

Une méthode d'examen non destructif utilisant ces ondes de contrainte a été développée. Elle diffère des techniques usuelles de contrôle non destructif sous plusieurs aspects : le matériau génère lui-même le signal à analyser ; un signal d'émission acoustique ne peut être obtenu que si la structure est sollicitée ; l'émission acoustique peut révéler la présence d'un défaut, voire donner sa position et parfois, si les données de référence sont suffisantes, graduer sa nocivité. En aucun cas, l'émission acoustique ne vise à décrire la géométrie du défaut (profondeur, largeur, longueur, forme...) ; une structure de

grande dimension est contrôlable par l'émission acoustique en une seule opération au moyen d'un nombre limité de capteurs ; fondamentalement, il s'agit d'une technique de surveillance, puisque l'émission d'ondes de contrainte est étroitement associée aux mécanismes physiques qui accompagnent l'initiation et la propagation des défauts.

Actuellement, les quatre domaines principaux d'application de l'émission acoustique sont : la caractérisation des matériaux (ductilité, transformation martensitique) ; la surveillance de fabrications (usinage, soudage...) ; le contrôle non destructif (matériaux composites, capacités à pression) ; la surveillance en service.

Avec les nouveaux matériaux, les technologies nouvelles et l'automatisation accrue, les plus larges possibilités de développement lui sont offertes.

■ James Roget, Chef du service « essais et mesures physiques », Centre technique des industries mécaniques (CETIM), 52, avenue Félix Louat, 60304 Senlis.

Le silence par le bruit

L'élimination d'un bruit peut se réaliser en lui ajoutant un contre-bruit aux caractéristiques soigneusement pilotées.

— Paul Lucet

L'absorption acoustique active consiste à superposer à un signal indésirable un signal antagoniste de caractéristiques opposées afin d'obtenir une interférence destructive. L'élimination d'un son harmonique se propageant dans un tuyau est depuis longtemps réalisée en laboratoire, celle d'un signal large bande n'est possible que depuis peu.

Un système actif comprend : la détection du signal à annuler, le pilotage centré sur un microprocesseur, l'émission

du contre-bruit. La détection se fait avec un ou des microphones dont il faut séparer la quantité acoustique utile, puis la numériser. Le pilotage génère le contre-bruit à partir des informations de la détection et des conditions de propagation. Il s'agit d'une commande linéaire, la difficulté résidant dans la nécessité d'effectuer le traitement en temps réel.

Au Laboratoire de mécanique et d'acoustique, à Marseille, ces techniques se conçoivent en espace libre, confiné (casques), ou en propagation guidée (guignes). La première est du domaine du laboratoire, les dernières sont industrialisées et en phase de commercialisation. On peut citer les travaux de l'Ecole centrale de Lyon sur la suppression active des interactions acoustiques-écoulement. Contrairement au système anglais basé sur une technique synchrone, ne traitant que les bruits de raies, la technique française est générale et obtient des atténuations de l'ordre de 20 décibels de 100 à 800 Hertz, en propagation guidée. Aux Etats-Unis vient d'être commercialisé un système équivalent.

En ce qui concerne les casques, le bruit est mesuré dans la cavité, corrigé

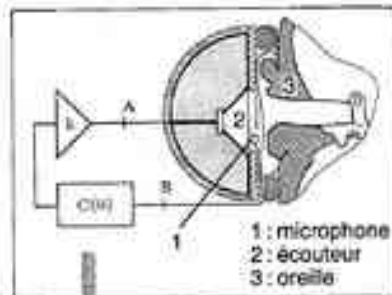


Schéma de principe du casque anti-bruit.

par un filtre électronique, amplifié et réinjecté dans la cavité. Leur efficacité est indépendante du spectre du bruit perturbateur et atteint plus de 30 décibels. Cette technique, objet d'un brevet CNRS, intéresse plusieurs industriels français et étrangers ; des modèles apparaîtront sur le marché d'ici peu.

— Paul Lucet, ingénieur de recherche au CNRS, Laboratoire de mécanique et d'acoustique (LP 7051 du CNRS), 31, chemin Joseph-Aiguier, 13402 Marseille Cedex 09.

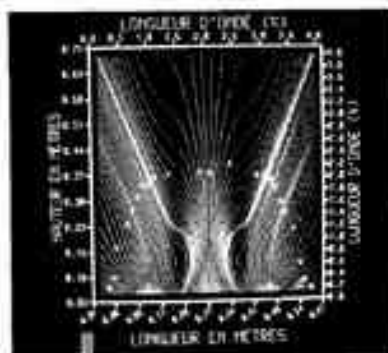
Ce que permet l'intensimétrie

Contrairement au niveau sonore, l'intensité acoustique permet de connaître le sens de la propagation de l'énergie dans l'espace.

— Jean-Claude Pascal

Savoir mesurer et représenter le rayonnement des sources acoustiques ainsi que la propagation du son dans des volumes plus ou moins complexes est une étape dont dépend le succès des activités d'amélioration des conditions d'écoute ou de réduction des nuisances apportées par le bruit. Depuis le début des années 80, les progrès des systèmes informatisés de traitement du signal ont permis, à l'aide d'une sonde composée de deux microphones distants d'environ un centimètre, de mesurer de façon courante une quantité qui caractérise l'énergie transportée par l'onde sonore : l'intensité acoustique. Elle se définit comme

le produit entre la fluctuation de pression acoustique et la vitesse vibratoire des molécules d'air. L'intensité acoustique possède, par rapport au niveau sonore mesuré à l'aide d'un sonomètre, l'avantage d'être une grandeur vectorielle. Elle contient ainsi une information supplémentaire, le sens de la pro-



Représentation à l'aide de l'intensité acoustique du rayonnement d'une plaque en vibration. Les lignes de flux tangentes aux vecteurs intensité sont tracées par interpolation des vecteurs déterminés sur un maillage régulier. Entre chaque ligne le flux est constant : leur resserrement traduit un accroissement du vecteur intensité (© CETIM).

pagation de l'énergie dans l'espace, qui offre la possibilité de créer une imagerie acoustique pour une meilleure compréhension des phénomènes de rayonnement. La figure illustre cette propriété : des lignes de flux obtenues à partir des vecteurs intensité mettent clairement en évidence la structure du champ proche, riche en informations sur son comportement acoustique.

Des applications de l'intensimétrie se sont rapidement développées dans les domaines de l'acoustique du bâtiment (mesure de l'isolation des parois et de l'absorption sonore des matériaux) et des équipements industriels (localisation des sources). L'application la plus spectaculaire, mais aussi la plus usitée, est la détermination de la puissance acoustique d'un équipement industriel, caractéristique intrinsèque de son émission sonore. La possibilité qu'offre l'intensimétrie de discriminer le sens des transferts d'énergie à travers une enveloppe fictive entourant la source industrielle à caractériser, permet d'isoler la mesure des perturbations du milieu bruyant.

— Jean-Claude Pascal, responsable du service développement acoustique, Centre technique des industries mécaniques (CETIM), 52, avenue Félix-Louat, BP 67, 60304 Senlis Cedex.

Acoustique de l'environnement

Des exemples qui montrent qu'il existe de multiples façons de prévoir les pollutions sonores et d'améliorer le confort acoustique.

Paul Filippi

Quand on parle d'acoustique de l'environnement, il faut entendre tous les aspects du milieu extérieur liés aux phénomènes de génération, de propagation et de perception des ondes sonores. Le travail du physicien vise deux buts : fournir les moyens de prédire les niveaux de bruit à l'intérieur comme à l'extérieur ; développer des méthodes qui permettent d'améliorer le confort acoustique, en réduisant le bruit à la source ou en intervenant sur la propagation des ondes sonores pour s'en protéger. Plusieurs sujets importants ont été développés par les chercheurs durant ces quinze dernières années.

Le premier concerne la caractérisation acoustique des sols. La pollution acoustique vient, en grande partie, des axes de circulation, des aéroports, des grosses installations industrielles, des chantiers de constructions immobilières et d'aménagements urbains. L'amortissement des ondes sonores étant fortement influencé par les propriétés des sols au voisinage desquels elles se propagent, la connaissance de ces propriétés s'est avérée nécessaire au niveau des études d'impact. Plusieurs techniques de mesure efficaces ont été mises au point, en particulier en France ; elles fournissent des résultats suffisamment précis pour les études d'environnement.

méthode des rayons telle qu'elle a été développée en optique. Récemment, l'introduction de « l'approximation parabolique » de l'équation régissant la propagation des ondes entretenues a permis de développer des programmes de calculs plus précis. Par contre, l'action de la turbulence sur la propagation du son dans l'atmosphère présente encore des difficultés importantes.

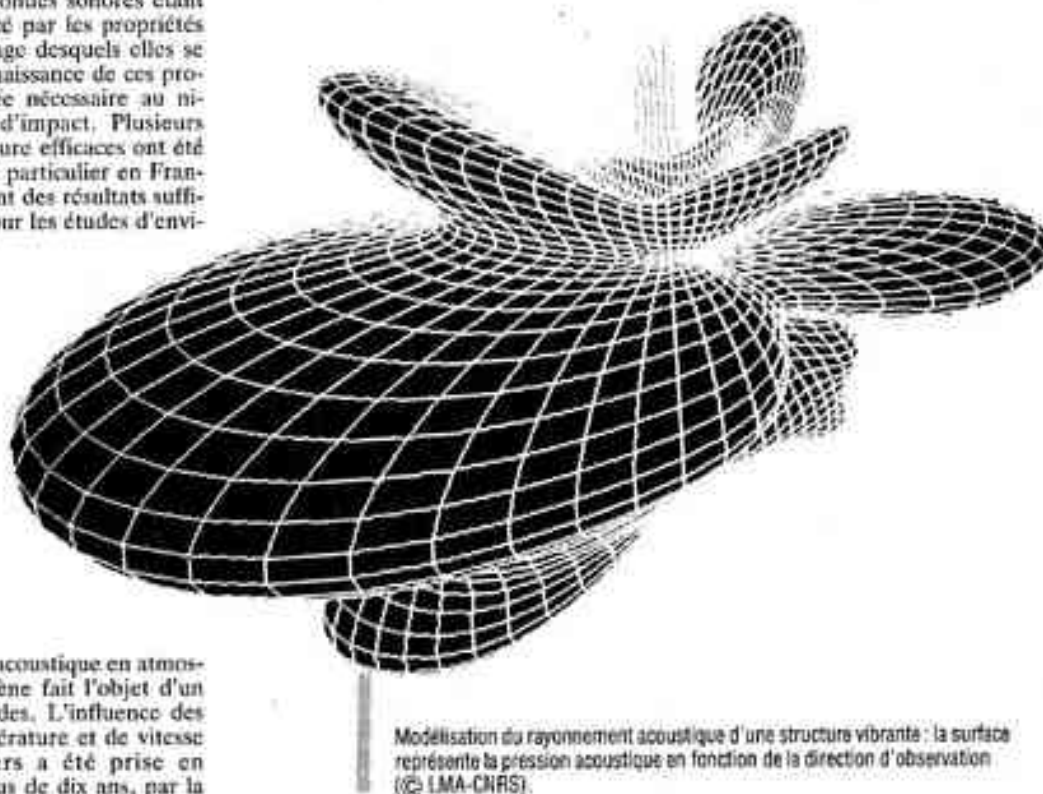
Pour étudier les performances des écrans de protection acoustique, on a eu d'abord recours à l'expérience sur maquettes. Puis on a développé des méthodes analytiques et numériques de prédiction qui permettent de faire des études paramétriques, parmi lesquelles nous pouvons citer : une méthode simple, basée sur l'approximation analytique « hautes fréquences » du champ diffracté par un obstacle qui permet une évaluation rapide de l'effet d'écran (l'atténuation ainsi prévue est un peu optimiste par rapport à la réalité) ; une méthode qui utilise les techniques d'équations intégrales de frontières, plus coûteuse de

mise en œuvre, mais dont la précision est très supérieure.

La modélisation des sources de bruit est également un autre sujet d'étude. La prévision des niveaux de bruit engendrés par les machines en tout genre, ainsi que la réduction du bruit à la source, passe par une meilleure modélisation des sources et une connaissance plus approfondie des processus de rayonnement acoustique. Des progrès récents sont apparus dans ce domaine, aussi bien sur le plan expérimental (intensimétrie, imagerie acoustique à l'aide d'antennes) que sur le plan théorique (développement de techniques de calcul du rayonnement d'une structure vibrante).

On peut donc dire que nombre de problèmes d'acoustique de l'environnement, à l'ordre du jour depuis une quinzaine d'années, ont reçu, dans leur ensemble, des solutions satisfaisantes ; ces succès ont été obtenus grâce, en particulier, à l'informatisation des matériels de mesure et au développement des mathématiques appliquées. Il reste encore beaucoup de problèmes incomplètement résolus, voire presque totalement ouverts.

Paul Filippi, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de mécanique et d'acoustique (LP 7051 du CNRS), 31, chemin Joseph-Aiguier, BP 71, 13402 Marseille Cedex 09.



La propagation acoustique en atmosphère non homogène fait l'objet d'un second type d'études. L'influence des gradients de température et de vitesse de vents réguliers a été prise en compte, depuis plus de dix ans, par la

Modélisation du rayonnement acoustique d'une structure vibrante : la surface représente la pression acoustique en fonction de la direction d'observation (© LMA-CNRS).

Le bruit des pneumatiques

Dans la chasse aux décibels, les ingénieurs ont fait subir aux pneumatiques des progrès sensibles au cours des dix dernières années. C'est aux laboratoires routiers, maintenant, de modéliser et d'expérimenter de nouveaux revêtements de la chaussée.

— Mariano Perulli

Le bruit du contact pneumatique-chaussée est un bruit d'impact dont le spectre de fréquences suit la vitesse de roulage et dont la condition d'existence de ces fréquences

est entièrement définie par le dessin de la sculpture de la bande de roulement du pneumatique, comme du revêtement de la chaussée. Cette condition d'existence se modélise à partir du dessin de la sculpture sur la base d'une théorie de modulation de fréquences.

Actuellement, les manufacturiers possèdent des critères nécessaires à un étalement spectral de l'énergie acoustique ainsi qu'à sa minimisation. Les progrès effectués au cours de ces cinq à dix dernières années se chiffrent avec un nombre de dBA proche de ce nombre d'années.

Le résultat majeur des études récentes est la mise en évidence du rôle essentiel du revêtement routier dans la génération de ce bruit de contact. En effet, il a été montré par différents laboratoires, à l'aide de différents procédés de mesure, que la dispersion d'une large variété en dimensions et marques de pneumatiques était bien inférieure à celle due aux revêtements routiers usuellement rencontrés. Aussi, à ce jour, les études et recherches sont-elles reportées vers les laboratoires routiers, d'autant qu'il a été établi que les modèles prévisionnels acousto-vibratoires publiés s'écartent trop de la réalité.

Néanmoins, les pneumaticiens maintiennent un certain effort dans le but d'aboutir à des compromis rendant plus performants leurs produits, plus pour des raisons de concurrence que pour satisfaire les normes existantes. Ces efforts sont relatifs à la définition et réalisation de matériaux nouveaux ainsi qu'aux procédés de fabrication avec le souci d'optimiser le rapport qualité/prix. Les recherches en amont que pourraient susciter les manufacturiers ont comme axe principal la définition et la mise en œuvre de codes de calculs pour représenter le pneumatique, élément essentiel d'un véhicule, qui peut se définir de la façon suivante : composites de dimensions finies, confinément déformables, soumis à de fortes déformations, enserrés entre deux conditions aux limites : la route et le moyeu.

— Mariano Perulli, professeur à l'université de Compiègne. En disponibilité pour effectuer des études et recherches d'intérêt national à la Manufacture française des pneumatiques Michelin de 1982 à 1987. Université de technologie de Compiègne, département de génie mécanique, BP 649, 60206 Compiègne Cedex.

Le bruit des avions

Le bruit des machines aéronautiques n'est pas limité à celui qu'engendrent les jets des réacteurs, mais provient aussi de toutes les pièces mécaniques mobiles et obstacles placés dans des écoulements.

— Michel Roger,
Geneviève Comte-Bellot

L'aéroacoustique concerne la génération de bruit par les écoulements, et ce domaine est apparu vers 1950 lorsque les avions à réaction commencèrent à remplacer les classiques avions à hélices. Les nuisances associées aux avions n'ont ensuite cessé de croître pour culminer avec les avions supersoniques tels que le Concorde. En effet, on souhaitait toujours des poussées plus grandes et des vols à plus haute altitude. C'est l'Ecole Britannique, avec Sir James Lighthill, qui jeta les bases des sources du bruit d'origine aérodynamique pour les jets des réacteurs. Parmi les tout premiers résultats acquis, citons la variation de la puissance acoustique émise avec la puissance 8 de la vitesse,

et l'importance des grands gradients de vitesse moyenne et des forts niveaux de turbulence.

Ce sont les montages à double flux qui ont permis de réduire de façon substantielle les niveaux du bruit tout en conservant les poussées souhaitées. Bien que limitées au subsonique, ces possibilités ont fait progresser l'industrie aéronautique de façon importante. Le succès de l'Airbus en est un exemple.

Dans le détail, les mécanismes physiques qui sont responsables du bruit créé à chaque instant ne sont que très partiellement connus. Les difficultés proviennent de ce que l'ensemble du champ d'écoulement serait à connaître à tout instant et que la fraction d'énergie acoustique rayonnée n'est qu'une très faible partie, 10⁻⁸ environ, de la puissance mécanique mise en jeu. Différentes expériences ont permis de lo-

caliser les zones les plus émettrices de bruit. La figure illustre quelques résultats obtenus pour un jet par la technique de l'intensimétrie acoustique vectorielle.

Mais dans les machines aéronautiques, les jets ne sont pas les seules sources de bruit d'origine aérodynamique. Les obstacles placés dans des écoulements et toutes les surfaces solides en mouvement qui sont à l'origine des écoulements (hélices, étages rotor-stator des turbines et des compresseurs, soufflantes, ventilateurs, rotors d'hélicoptères, etc.) sont aussi responsables de bruit par toutes les formes possibles d'instationnarité, et ce indépendamment de toute vibration.

Au bruit propre de l'écoulement, déjà envisagé plus haut, s'ajoutent le bruit des charges aérodynamiques (portance et traînée) exercées sur les pales et le bruit d'épaisseur dû au déplacement du fluide par les surfaces en mouvement.

Si l'on se restreint au bruit de charges, l'émission sonore peut revêtir

deux aspects différents selon que les charges sont à caractère déterministe ou aléatoire. Dans le premier cas, elle se manifeste aux harmoniques de la fréquence de passage des pales du rotor ou de l'hélice considérée. Les mécanismes correspondants trouvent leur origine dans les charges permanentes sur les pales, et dans les fluctuations de charges périodiques (inhomogénéités stationnaires de l'écoulement moyen, interaction rotor-stator, etc.). Dans le second cas, on observe un bruit à large bande qui provient des charges aléatoires induites par les phénomènes turbulents (couches limites, sillages...).

La turbulence déjà présente dans l'écoulement d'alimentation de la machine (préturbulence) peut produire à la fois du bruit à large bande et un bruit à bande étroite aux harmoniques de la fréquence de passage des pales, en raison de l'élongation (parfois importante) des structures à l'aspiration.

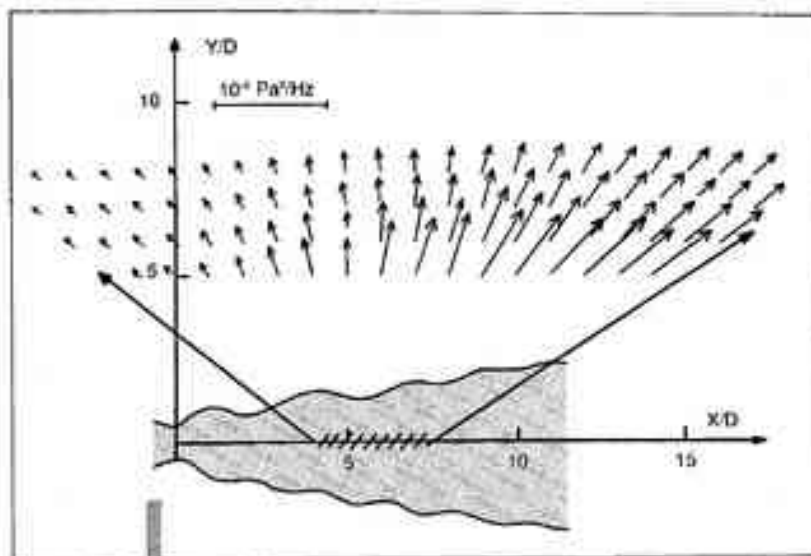
Enfin dans la pratique, une machine tournante est la plupart du temps carénée, et son comportement acoustique définitif dépend non seulement des sources, mais aussi de la modification de leur rayonnement naturel causée par le carénage. Il s'agit là de l'influence de surfaces passives sur la propagation, ce qui constitue un problème de diffraction. A l'heure actuelle, ce problème est étudié sur maquettes, grâce à des simulateurs de modes touronnants construits par des réseaux circulaires de haut-parleurs déphasés.

Les applications à l'hydroacoustique sont actuellement en plein développement. En particulier pour tous les bâtiments de notre Marine nationale, la discrétion acoustique est un objectif primordial.

La multiplicité de tous ces aspects oblige aujourd'hui le chercheur à se lancer dans des recherches de synthèse, incluant à la fois les mécanismes physiques, les simulations numériques et des expériences utilisant des techniques modernes d'acquisition et de traitement des données. Les travaux actuels ne se résument plus à un constat de nuisance *a posteriori*, mais doivent désormais intervenir au stade initial de la conception des machines.

■ Michel Roger, maître de conférences, Laboratoire de mécanique des fluides et d'acoustique (UA 263 CNRS).

■ Geneviève Comte-Bellot, professeur, Laboratoire de mécanique des fluides et d'acoustique (UA 263 CNRS), Ecole centrale de Lyon, 36, avenue Guy-de-Collongue, BP 163, 69131 Ecully Cedex.



Carte du vecteur intensité acoustique près d'un jet subsonique (vitesse de sortie 135 m/s, diamètre de buse 2 cm, fréquence d'analyse 2 000 Hz). (Juvé et Roland, *Revue d'Acoustique* n° 66, p. 170).

Les matériaux absorbants

Une théorie plus efficace pour prédire les propriétés acoustiques de l'ensemble des matériaux poreux, la théorie de Biot.

■ Jean-François Allard

Les absorbants acoustiques sont présents dans toute notre vie quotidienne, que ce soit une moquette placée dans un bureau ou une couche de mousse plastique au plafond d'une voiture. Pour pouvoir améliorer les performances de ces matériaux, il est important de pouvoir modéliser correctement la propagation du son dans les milieux poreux qui sont utilisés pour l'absorption sonore. Dans les années 70, de grands progrès ont été faits dans une telle modélisation avec les lois de Delany et Bazley. Ces lois, essentiellement empiriques, indiquent que, pour un matériau fibreux, les deux paramètres à prendre en compte sont la résistance spécifique au passage de l'air et la fréquence. La résistance spécifique au passage de l'air est le quotient entre la surpression sur

deux faces parallèles d'un cube unité de matériau et le débit d'air qui en résulte. Il est apparu ultérieurement que, dans le cas des matériaux à forte résistance au passage de l'air, il fallait faire usage d'une modélisation plus élaborée.

Depuis quelques années, la théorie de Biot est utilisée avec succès pour prévoir les propriétés acoustiques des absorbants poreux. Cette théorie, développée il y a un quart de siècle, fournit la formulation lagrangienne la plus générale de l'interaction fluide/structure dans un matériau poreux. Présentée initialement avec un certain arbitraire, elle a été justifiée plus récemment grâce à la théorie de l'homogénéisation. Dans le cadre de la théorie de Biot, l'interaction fluide/structure fait intervenir la viscosité et de nouveaux mécanismes de couplage. La prédiction des propriétés acoustiques des matériaux poreux à partir de la théorie de Biot ne s'effectue pas aussi simplement que dans le cadre des lois de Delany et Bazley. Cet accroissement, très relatif, de la complexité des calculs est le prix à payer pour obtenir des prédictions valables dans le cas des matériaux à forte résistance au passage de l'air, homogènes ou stratifiés.

■ Jean-François Allard, professeur à l'université du Maine, Laboratoire d'acoustique de l'université du Maine (UA 1101 CNRS), université du Maine, BP 535, 72017 Le Mans Cedex.

Architecture et confort sonore

Modéliser la propagation de l'énergie acoustique dans les structures, entre elles et hors d'elles, mais aussi porter l'accent sur l'évaluation de la gêne et de l'agrément des utilisateurs.

Jean-Dominique Polack

L'acoustique architecturale a vu son champ d'application se transformer au cours de la dernière décennie. En effet, la recherche fondamentale s'est dans l'ensemble détournée des problèmes de normalisation pour s'intéresser à la modélisation de la propagation de l'énergie acoustique, soit dans les structures, comme par exemple dans les matériaux absorbants (voir texte page précédente), soit dans les espaces que celles-ci délimitent, tant à l'intérieur des bâtiments (usine, salle de spectacle...) qu'à l'extérieur (urbanisme, bruit routier).

La modélisation acoustique

L'approche la plus ancienne consiste à effectuer, dans une maquette à échelle réduite de l'espace à étudier, des mesures acoustiques en tous points semblables à celles réalisées en vraie

grandeur. L'absorption très importante des ultra-sons dans l'air restreint cette méthode à des maquettes de grande taille (1/20, voire 1/10) pour affiner l'acoustique d'une salle de concert, comme c'est le cas pour le nouvel opéra de la place de la Bastille à Paris. Mais l'application de traitements spécifiques du signal fait envisager l'emploi de maquettes plus réduites (1/50).

L'avènement d'ordinateurs de plus en plus performants fait souvent préférer la modélisation par code de calcul. Cette technique de simulation, souvent appelée méthode des rayons, repose sur le calcul des trajets effectués par un grand nombre de rayons sonores issus d'une source. Des codes très performants sont actuellement disponibles, qui savent même prendre en compte l'état de surface du sol (rugosité, plantation) et l'influence des facteurs atmosphériques (le vent et la température, voir texte sur l'acoustique et l'environnement page 51).

Dans le domaine des structures, la

modélisation numérique se traduit elle aussi par la mise au point de codes de calcul. Les méthodes les plus utilisées sont les éléments finis et l'analyse modale, mais des résultats prometteurs viennent d'être obtenus par des méthodes d'échanges statistiques d'énergie entre sous-structures (SEA).

La mesure acoustique, la gêne et l'agrément

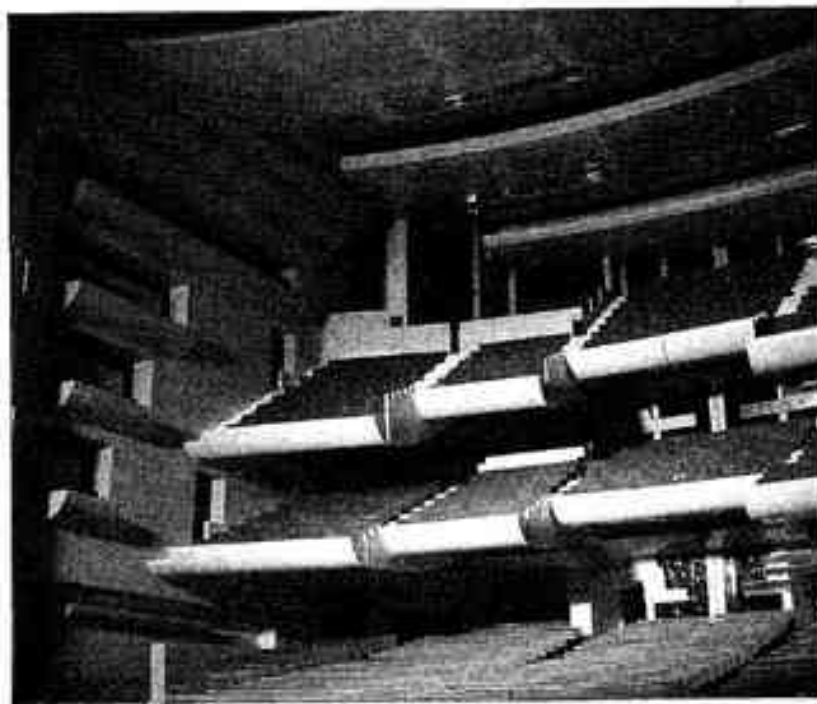
A l'exception de l'acoustique des salles, où la paramétrisation de la réponse impulsionnelle reste une question ouverte, le problème de la mesure acoustique peut être considéré comme résolu de manière satisfaisante. La miniaturisation croissante des processeurs de calcul a seulement rendu accessible à l'analyse *in situ* l'usage d'algorithmes performants jusque-là réservés aux centres de recherches.

L'amélioration des techniques de simulation et de mesure acoustique exige en contrepartie une amélioration de nos connaissances sur ce que l'on peut appeler le « confort » sonore. Les résultats de nombreuses enquêtes et observations ont ainsi fait progresser notre connaissance des effets du bruit sur l'homme et ont permis de chiffrer pour la première fois le coût du bruit, et de mettre au point des indices de gêne acoustique.

En acoustique des salles, la recherche psychologique porte davantage sur le repérage des facteurs perceptifs influant de manière essentielle sur la qualité d'une salle. Ce repérage exige le plus souvent la reproduction synthétique d'une salle à l'aide d'un certain nombre de haut-parleurs suspendus dans une chambre sourde. C'est ainsi que l'influence prépondérante des premières réflexions latérales sur la qualité acoustique d'une salle a été mise en évidence et vient parachever la liste des paramètres physiques : réverbération initiale, clarté...

Indices ou paramètres physiques sont au mieux des indicateurs de tendance : l'analyse statistique montre qu'au moins trente pour cent des réponses à la gêne ou à l'agrément sont motivées par le comportement individuel des sujets testés.

Au-delà de la prise en compte des phénomènes de propagation, un grand effort reste à faire pour que les techniques mises au point par la recherche en acoustique architecturale soient digérées par les architectes et urbanistes.



Vue de la maquette au 1/20 de l'Opéra de la Bastille (photo CSTB).

Jean-Dominique Polack, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire d'acoustique de l'université du Maine (UA 1101 CNRS), université du Maine, BP 535, 72017 Le Mans Cedex.

250 CARICATURES ANIMENT, AU JOUR LE JOUR, LA SCÈNE POLITIQUE RÉVOLUTIONNAIRE



**PRIX DE
SOUSCRIPTION**
Valable jusqu'au
30 septembre 1988
LE COFFRET 520 F
AU LIEU DE 650 F
N'ATTENDEZ PAS !

D' octobre 1791 au 10 août 1792 : dix mois de sursis pour Louis XVI, dix mois d'intense attaque contre-révolutionnaire sur le front de la dérision : les 150 **CARICATURES** **CONTRE-RÉVOLUTIONNAIRES** sont ici intégralement présentées. Chacune, en intégrant les documents d'époque les plus significatifs, montre le poids de la pression politique qui pèse sur les mois précédant la déclaration de guerre et la chute de la royauté. Les révolutionnaires utilisent plus volontiers le rire grivois, le grotesque, certaines paraboles parlantes, pour composer tout un univers révélateur de personnages politiques. **LES CARICATURES RÉVOLUTIONNAIRES** offrent un commentaire à chaud de l'événement et proposent l'illustration, croquée sur le vif, des toutes nouvelles techniques de la propagande.



La Caricature contre-révolutionnaire, par Claude Langlois, et *La Caricature révolutionnaire*, par Antoine de Baeque : 2 volumes 24 x 31 cm, de 256 pages, illustrés de plus de 300 gravures, noir et couleur, reliés toile sous jaquette 4 couleurs et réunis dans un luxueux coffret.

BON DE COMMANDE à retourner aux PRESSES DU CNRS
20-22, rue Saint-Armand, 75015 PARIS

Nom :
Adresse :
désire recevoir : coffrets Caricature à 520 F - ISBN 2-87682-015-5

Participation aux frais de port : 15 F pour la France, 25 F pour l'étranger, par coffret.
Ci-joint mon règlement de francs à l'ordre des PRESSES DU CNRS par :

chèque bancaire ☐ chèque postal ☐ mandat ☐

Je vous autorise à débiter mon compte carte bleue Visa

n°

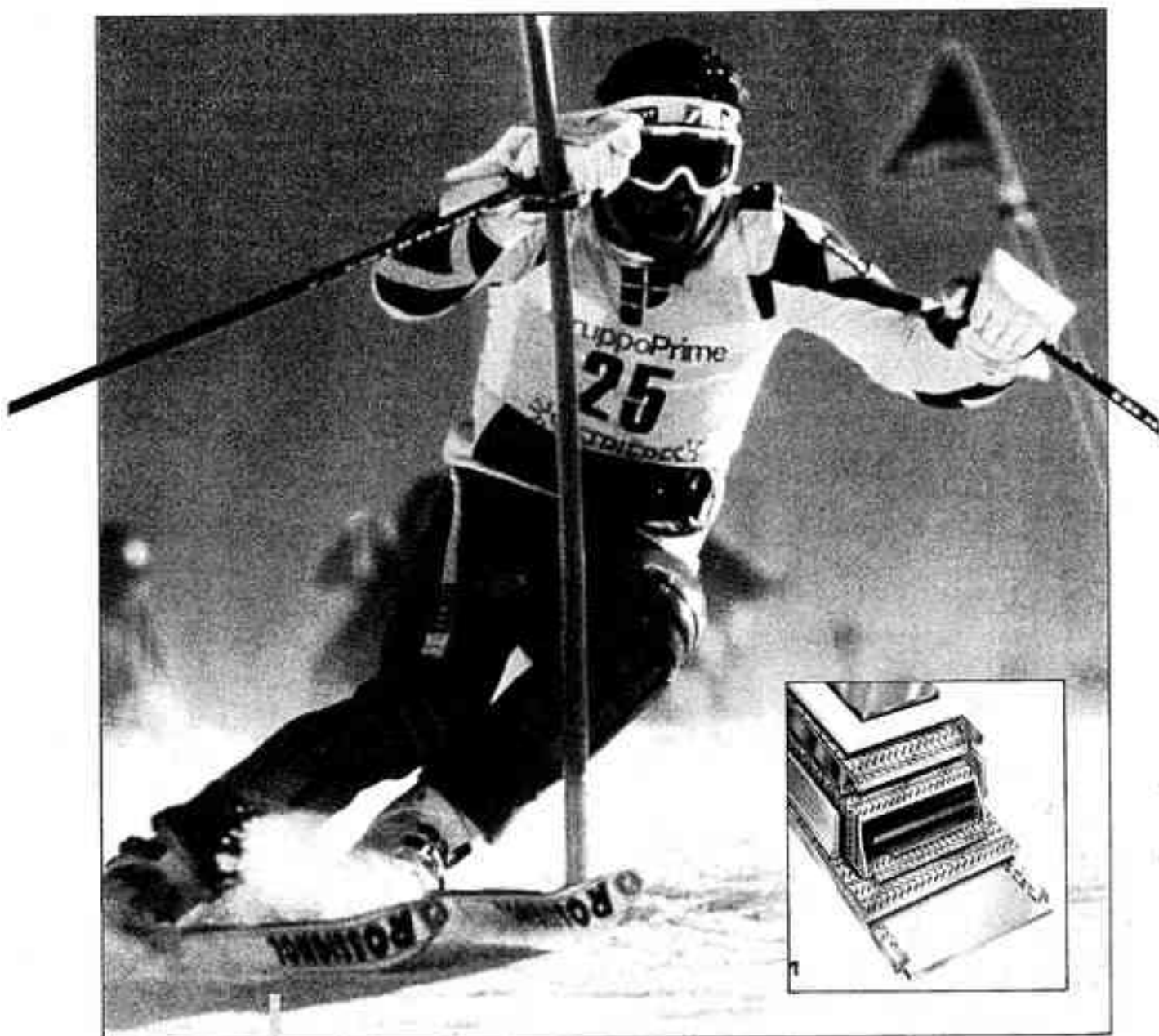
Date de validité

Date :

Signature obligatoire

Commande : IMA 001

La mécanique des matériaux



Un ski est constitué d'une association complexe de matériaux nécessitant des études poussées : composites fibre de verre - résine époxyde, fibre de carbone - résine époxyde, etc. Coupe d'un ski 4 SK. Tomba en pleine action. (© Rossignol).

Activité essentiellement interdisciplinaire, la science des matériaux ne se contente pas de formuler des lois. Les ingénieurs veulent fabriquer des matériaux sur mesure dont les propriétés mécaniques sont définies à l'avance.

— Dominique François,
Jean Hanus, André Pineau,
André Zaoui

Les constructeurs de l'Airbus, d'Hermès, des réacteurs nucléaires, de la Super Cinq, du TGV ou du tunnel sous la Manche doivent être capables de garantir que ces réalisations résisteront aux sollicitations auxquelles elles seront soumises pendant un nombre d'années ou d'heures de fonctionnement suffisant. Les efforts extérieurs comme ceux qu'exercent les rafales sur les avions, la houle sur les plates-formes en mer, le vent sur les ponts, la pression des terrains sur les tunnels, se transmettent au sein des matériaux utilisés dans ces constructions, y induisent des

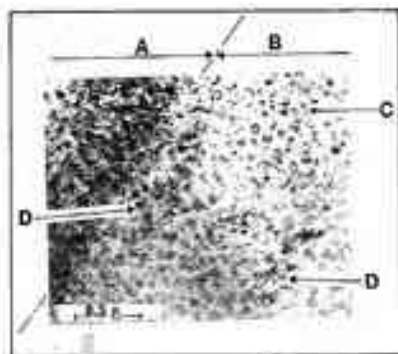


Fig. 1 - Précipités de la phase γ' ($L1_2$) dans un superalliage à base de nickel (Alliage Waspaloy) responsables de la bonne résistance de ces alliages à haute température. Observation par microscopie électronique à transmission d'un échantillon déformé cycliquement. Les particules ont un diamètre moyen de 90 nanomètres. On note, à cette échelle, la grande hétérogénéité de la déformation : la partie A est beaucoup plus déformée que la partie B, comme en témoigne la très grande densité de dislocations. Dans celle-ci on observe les interactions individuelles entre particules et dislocations conduisant à la formation de boucles (C) ou d'écheveaux plus complexes (D). Ces boucles et ces écheveaux sont responsables du durcissement qui est observé lorsque le matériau est déformé cycliquement.

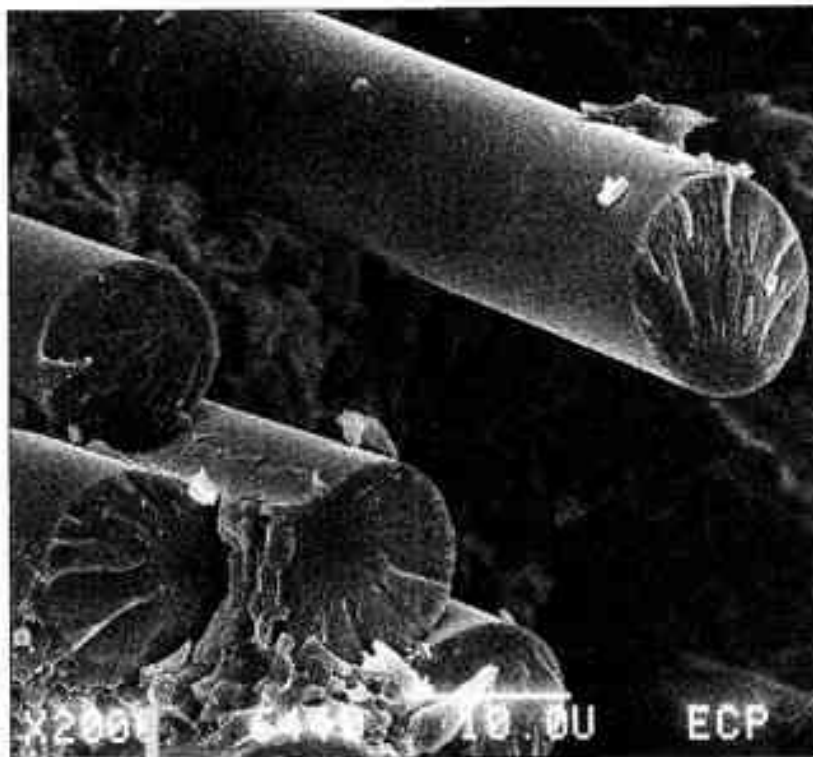


Fig. 2 - Photo de la surface de rupture d'un composite fibres de verre-époxy prise à l'aide du microscope électronique à balayage. La rupture s'est produite dans les fibres de verre là où elles sont le plus rapprochées alors qu'elles se sont décollées aux endroits où la résine qui les enrobe est épaissie.

contraintes et y provoquent des déformations. Il importe donc de les calculer. Pour le faire, il faut connaître la façon dont se déforment les matériaux sous l'effet de ces contraintes, c'est-à-dire leur loi de comportement. C'est ainsi qu'un même poids suspendu à un fil d'acier ou de caoutchouc ne produit pas le même allongement. Une fois calculées les contraintes dans les pièces, il faut s'assurer qu'elles restent inférieures à une valeur critique capable de provoquer des déformations excessives, des ruptures brutales, ou des fissurations progressives, c'est-à-dire au critère de ruine. Naturellement, il est possible de fabriquer des ouvrages sûrs en leur donnant des sections très fortes au détriment du poids ou du coût. Pour des avions, des engins spatiaux, ceci est évidemment prohibitif, mais il en est de même pour des automobiles puis-

que chaque kilogramme gagné signifie des économies de consommation de carburant.

La détermination des lois de comportement des matériaux et des critères est avant tout expérimentale. Elle nécessite des machines d'essais mécaniques capables d'exercer des efforts connus sur des éprouvettes dont on mesure les déformations. Ces essais doivent pouvoir être effectués à diverses températures et à diverses vitesses de sollicitation. Ils nécessitent souvent l'application d'efforts cycliques.

Mais comme dans les pièces s'exercent en général des contraintes plus complexes que celles obtenues sur une simple éprouvette cylindrique, il est nécessaire de réaliser des essais sur des corps d'épreuve de formes plus compliquées. Un couplage entre calcul et ex-

expérience est alors indispensable. Il faut en effet savoir quelle est dans cette éprouvette la répartition des contraintes, accessible seulement par le calcul.

Les propriétés mécaniques ainsi déterminées dépendent beaucoup de la structure intime des matériaux: un même acier recuit à 600 °C ou trempé depuis 900 °C dans de l'eau a une dureté faible dans le premier cas, très importante dans le second. Du duralumin, trempé depuis 550 °C dans de l'eau, durcit progressivement au cours du temps. Ces modifications résultent d'évolutions dans la répartition des atomes qui constituent ces alliages. Il s'avère donc essentiel de ne pas séparer l'étude des propriétés mécaniques de celle des microstructures auxquelles diverses techniques physiques donnent accès: microscopie optique ou électronique, diffraction des rayons X par exemple (figure 1). Il importe également de maîtriser les différentes étapes de mise en forme qui ont conduit aux pièces étudiées et de savoir relier leurs propriétés mécaniques aux conditions d'élaboration et de transformation.

Les matériaux modernes résultent souvent d'une association judicieuse de plusieurs constituants: par exemple, on fabrique des matériaux composites en associant des fibres à très haute résistance, fibres de verre, fibres de carbone, dans une matrice qui les agglomère et permet de leur transmettre les efforts (figure 2). Il est alors souhaitable de pouvoir prévoir les propriétés mécaniques de cette association à partir de celles des constituants de base. Celles-ci sont souvent meilleures que la simple moyenne des propriétés de chaque constituant. Pour le prévoir, là encore, le calcul doit être combiné avec des observations des microstructures.

Les modes de ruine d'un matériau sous l'effet d'efforts mécaniques sont variés. D'une façon générale, la première étape est un endommagement de quelques éléments de la microstructure: séparation de plans cristallographiques ou de joints de grains (figure 3), décohésion à l'interface d'inclusions, glissements irréversibles à la surface sous l'effet de sollicitations cycliques provoquant la fatigue, délaminage de matériaux composites formés de l'empilement de plis... Ces endommagements doivent être intégrés dans les lois de comportement des matériaux.

Ultérieurement, les divers endommagements microstructuraux coalescent pour former des fissures. Le comportement des corps fissurés est le domaine de la mécanique de la rupture bien fondée dans le cas où le comportement est élastique. Dans beaucoup de cas cependant, les matériaux présen-

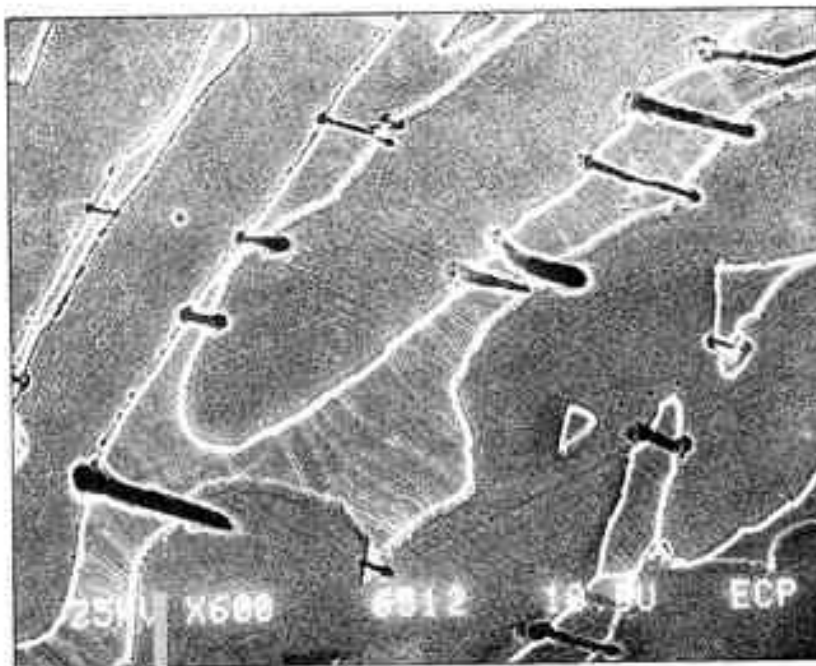


Fig. 3 - Micrographie d'un acier austénoferritique montrant des clivages dans la ferrite qui se sont produits le long de plans cristallographiques orientés perpendiculairement par rapport à la contrainte. On distingue également des lignes de glissement.

tent des déformations irréversibles qui compliquent singulièrement cette mécanique de la rupture.

Ces divers problèmes nécessitent des études spéciales lorsque s'ajoutent les effets de la température et ceux de l'environnement. Outre les difficultés que présentent alors les expérimentations à l'intérieur de fours ou de cryostats, d'enceintes sous vide ou de milieux agressifs, il faut tenir compte de lois de comportement plus compliquées, car les effets ne sont pas simplement additifs.

Ainsi, les études modernes sur les propriétés mécaniques des matériaux permettant de connaître avec le maximum de précision les lois de comportement, d'endommagement et de fissuration et, si possible de les prévoir, exigent-elles la combinaison des observations des microstructures, des calculs de répartition de contraintes et de déformations, et des essais mécaniques. La recherche française en mécanique des solides a remporté de grands succès dans ces divers domaines au cours des trente dernières années. Les approches thermodynamiques, conduisant à la formulation phénoménologique correcte des lois de comportement complexes, incluant les effets des grandes déformations et de l'endommagement, ont été, pour beaucoup grâce à elle, renouvelées et systématisées. Parallèlement, l'école française de mécanique des matériaux a dévelop-

pé les méthodes de passage du microscopique au macroscopique, tant pour la prévision des lois de comportement et d'endommagement des matériaux hétérogènes que pour celle de critères locaux de rupture, fondés sur des observations fines de la microstructure.

C'est de la combinaison de ces diverses approches et de la collaboration active entre mécaniciens, métallurgistes, physiciens et chimistes que dépendront de nouveaux progrès dans l'amélioration des propriétés mécaniques des matériaux par la maîtrise accrue de leur élaboration et de leur transformation et dans l'aptitude à leur fabrication « sur mesure ».

■ Dominique François, professeur à l'École Centrale, Laboratoire de mécanique des sols, structures et matériaux (UA 830 CNRS), École centrale de Paris, Grande voie des vignes, 92290 Châtenay-Malabry.

■ Jean Hanus, professeur, directeur du Programme interdisciplinaire de recherche sur les matériaux (PIRMAT), CNRS, 15, quai Anatole France, 75700 Paris.

■ André Pineau, professeur à l'École des mines de Paris, responsable du Laboratoire de métallurgie mécanique (UA 866 CNRS), École nationale supérieure des mines de Paris, Centre des matériaux, B.P. 87, 91003 Evry Cedex.

■ André Zausi, professeur à l'université Paris XIII, directeur du Laboratoire des propriétés mécaniques et thermodynamiques des matériaux (LP 9001 du CNRS), avenue Jean-Baptiste Clément, 93430 Villetaneuse.

Les machines d'essais

Des machines d'essais sophistiquées soumettent, simultanément, des échantillons de matériaux à toutes sortes de sollicitations afin de construire des modèles de comportement mécanique de plus en plus réalistes.

Claude Oytana

Les machines d'essais sont les instruments de base pour l'analyse des propriétés mécaniques des matériaux. Elles utilisent des éprouvettes prélevées dans le matériau à étudier, ou élaborées par les mêmes procédés que les pièces qu'elles doivent représenter. On leur impose soit une contrainte par l'intermédiaire d'une force ou d'un couple en mesurant les déformations, soit une déformation par l'intermédiaire d'un déplacement en mesurant la contrainte nécessaire.

L'installation la plus répandue est la machine de traction où la contrainte provient d'une tension ou d'une compression qui s'exerce sur une éprouvette de section constante, cylindrique ou rectangulaire, et où les déformations imposées ou mesurées concernent l'allongement de l'éprouvette et sa variation de section.

Par rapport à ce principe, on trouve diverses technologies selon le type d'essais à réaliser : traction, fluage, relaxation ou fatigue qui nécessitent que les forces ou les déplacements imposés soient continuellement variables, constants ou cycliques. Actuellement, les commandes et asservissements permettent de réaliser n'importe quelle succession des essais testés précédemment.

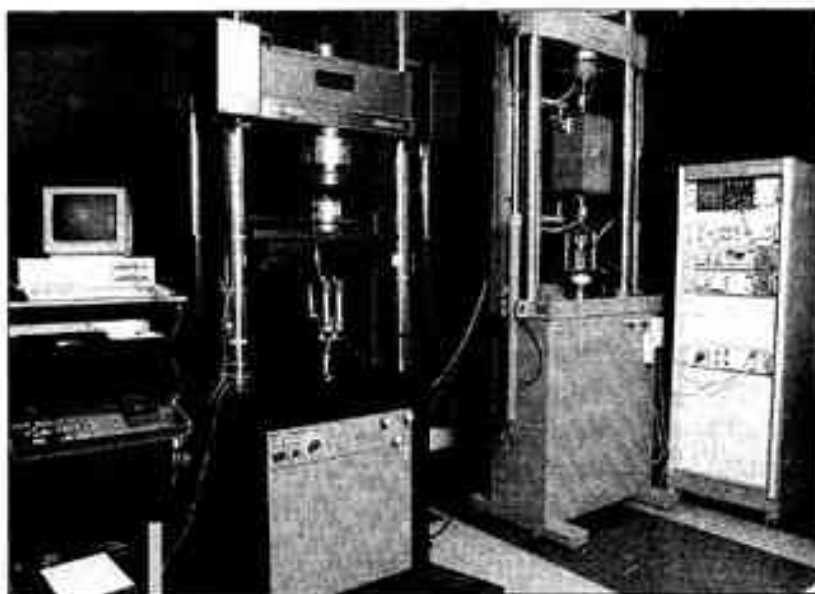
La variété des expériences est rendue nécessaire par la complexité croissante des modèles de comportement mécanique des matériaux, qui se veulent de plus en plus réalistes, donc de plus en plus sophistiqués : d'où le développement de machines dites multiaxiales, soumettant, par exemple, des tubes à des essais simultanés de traction et de torsion, en statique ou en fatigue. Mais les laboratoires étudient et réalisent d'autres types d'essais tels que : la mise en traction ou compression - torsion - pression interne (ou externe) de tubes ; la flexion - torsion de

barres (particulièrement utile pour les matériaux composites) ; la traction simultanée dans deux directions d'éprouvettes en forme de crois.

Enfin, compte tenu de l'importance de l'environnement sur les propriétés mécaniques, ces machines s'équipent de plus en plus d'installations permet-

tant des essais en température, sous vide ou en atmosphères contrôlées.

Claude Oytana, professeur à la faculté des sciences de Besançon, responsable du Laboratoire de mécanique appliquée - LMA - (UA 4 CNRS), université de Besançon, faculté des sciences et des techniques La Houloie, route de Gray, 25030 Besançon Cedex.



Ensemble de machines d'essai hydrauliques : traction compression ± 100 kilonewton avec équipement de flexion-torsion ; traction-compression-torsion (± 63 kilonewton ; $\pm 1\,000$ newton-mètres) avec équipement d'extensométrie biaxiale (réalisation LMA).

Mesurer les déformations

Une nouvelle méthode non perturbatrice permet de mesurer, en tous points d'une surface, de grandes ou de petites déformations jusqu'à un millionième sur une zone pouvant être réduite à dix micromètres de côté.

Alexis Lagarde

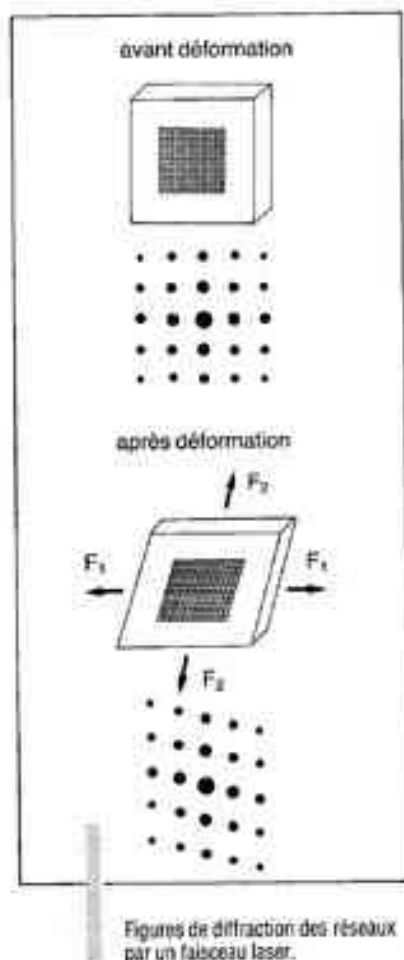
On appelle extensométrie l'ensemble des techniques de mesure des déformations à la surface d'une pièce mécanique. Localement, une déformation est caractérisée par trois paramètres. Imaginons un cercle de petite taille, dans l'état défor-

mé il devient une ellipse définie par trois paramètres qui sont les longueurs des axes et leur orientation.

Parmi quelques techniques de mesures on peut citer :

- la jauge à fil résistant, appelée ainsi car elle utilise le phénomène de proportionnalité entre la résistance électrique d'un conducteur et sa longueur. Collée sur une longueur l qui constitue la base de mesure et pour un allongement Δl de cette base elle permet d'obtenir l'extension $\Delta l/l$ avec une sensibilité de 10^4 . La base est comprise entre un dixième et quelques millimètres. Trois jauges sont nécessaires pour obtenir localement les trois paramètres qui caractérisent les petites déformations.

Pour leur part, les techniques de moiré utilisent un réseau de traits marqués à la surface de la pièce pouvant atteindre 40 traits par millimètre. Elles visualisent les lignes d'égal déplacement par superposition de l'image du réseau dans l'état déformé avec l'image du réseau avant déformation. L'utilisation simultanée de réseaux orthogo-



Figures de diffraction des réseaux par un faisceau laser.

naux permet, par dérivation du champ des déplacements, d'obtenir les déformations avec une sensibilité de $3 \cdot 10^{-5}$. — une méthode nouvelle utilise des réseaux orthogonaux dont le pas dépend de la taille de la base de mesure, marqués sur une surface pouvant être importante, pour divers matériaux. Elle permet, en tous points de cette surface, la mesure locale de petites (sensibilité de 10^{-6}) ou de grandes (sans limitation) déformations sur une base qui peut être très petite ($10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$). Le spectre du réseau croisé est obtenu soit optiquement par la diffraction d'un faisceau laser par ce réseau, soit numériquement par un traitement approprié de l'image du réseau enregistré par une caméra CCD. La comparaison des spectres avant et après déformations conduit à la connaissance des déformations et à la détection d'un gradient de déformation.

■ Alexis Lagarde, professeur à l'université de Poitiers, Laboratoire de mécanique des solides (UA 861 CNRS), université de Poitiers, UFR de sciences fondamentales et appliquées, 40, avenue du Recteur Pineau, 86022 Poitiers Cedex.

Modélisation, essais et calculs

La prévision du comportement des structures mécaniques nécessite une modélisation mathématique, une identification des paramètres à partir d'essais et enfin, une simulation numérique.

■ Noël Dahan,
Mircea Predeleanu

L'art du chercheur mécanicien est l'étude fondamentale en amont de la conception de systèmes jugés nécessaires par l'ensemble de la communauté. Cet art nécessite de la part de celui-ci, la maîtrise de la réponse du système envisagé.

Il va devoir caractériser les matériaux utilisés et calculer la tenue en service et la durée de vie du système. C'est seulement à cette condition que son étude sera terminée.

Pour mener à bien sa tâche et faire de la prévision, il utilise une modélisation mathématique des phénomènes physiques à appréhender, qui doit satisfaire les principes de la mécanique, de la thermodynamique et des conditions d'invariance (d'observation et de symétrie matérielle). Par conséquent, il doit ou devra maîtriser une formulation intrinsèque et concise.

Cette étape théorique franchie, il reste un problème qui n'est pas des plus faciles. Il doit identifier le modèle choisi conforme aux conditions précédentes. Pour cela, des essais plus ou moins complexes sont nécessaires à la caractérisation du modèle.

C'est maintenant qu'il doit faire preuve de talent d'expérimentateur. Il dispose ou disposera d'appareils d'essais dans son laboratoire permettant trois classes d'essais :

- les essais statiques (loi - contrainte - déformation élasto-plastique, évolution des coefficients d'élasticité avec l'endommagement,...) qui sont de loin les plus utilisés ;
- les essais cycliques à faible fréquence qui caractérisent la fatigue et le vieillissement. C'est une information sur la durée de vie ;
- les essais dynamiques qui se décomposent en essais hautes fréquences et faibles amplitudes et essais de fortes amplitudes et temps court comme, par exemple, les chocs.

L'expérimentation nécessite des moyens de mesure de type mécanique, électrique, électro-acoustique et opto-électronique.

Le problème crucial de l'identification des modèles réside dans le fait que, quels que soient les essais mis en œuvre, le mécanicien accède à des mesures de type « structure » (où sont

compris la nature des matériaux, la géométrie des pièces d'essai et les conditions limites, alors que les évolutions sont mesurées en surface extérieure pour des matériaux non transparents). Deux possibilités d'analyse expérimentale s'offrent à lui :

— soit il introduit avec grande habileté des hypothèses *ad hoc* pour obtenir un modèle local. L'hypothèse de continuité est utilisée bien qu'il sache que la matière est discontinue à l'échelle moléculaire ou à plus grande échelle. Une fois l'échelle choisie, il conçoit des éprouvettes soumises à des sollicitations simples pour décrire le comportement de l'élément de volume. Dès lors, l'accès aux paramètres du modèle est simplifié.

— soit il a la possibilité d'utiliser une technique de mesure *in situ* sur une structure complexe. Dans ce cas, l'identification du modèle nécessite la résolution d'un problème inverse et donc passe par un calcul numérique de structure.

Le traitement des données expérimentales est fait soit par une approche déterministe (avec un minimum de données et des hypothèses sévères), soit par une approche probabiliste (avec un plus grand nombre d'essais) qui met en évidence la notion de « plan d'expériences orthogonal », la notion de moyenne et la notion de qualité.

Cette analyse du traitement nécessite des moyens de calcul numérique, l'objectif étant de gérer de façon automatique les essais, mais aussi de calculer le comportement de la structure.

Après l'identification, il lui reste la validation du modèle. Pour cela, il dispose, suivant les cas : soit des mesures énergétiques (la partition de l'énergie dissipée et de l'énergie de blocage pour un écrasement en traction simple ; ceci est possible grâce à des mesures micro-calorimétriques et infra-rouges...), soit par le biais du calcul du comportement d'une structure vérifiant les conditions réelles.

■ Noël Dahan, ingénieur de recherche au CNRS, Laboratoire de mécanique et technologie (UA 860 CNRS).

■ Mircea Predeleanu, directeur de recherche au CNRS, directeur du Laboratoire de mécanique et technologie (UA 860 CNRS), Ecole normale supérieure de Cachan, 61, avenue du Président Wilson, 94230 Cachan.

Comment se comportent les matériaux

La connaissance des lois de comportement des matériaux est un point de passage obligé vers le développement de méthodes de calcul modernes plus précises et plus fiables.

Jean-Louis Chaboche

Les calculs des déformations des structures (changement de forme), d'endommagement (détérioration interne du matériau) et de durée de vie à rupture (initiation et propagation de fissures), impliquent une connaissance et une description précises de la résistance du matériau. Cette modélisation doit être suffisamment fine pour contenir les phénomènes importants dans le cadre de l'application envisagée, et suffisamment simple pour être utilisable dans les codes de calcul classiques.

Ainsi, la loi de comportement est constituée d'un ensemble de relations entre les sollicitations appliquées à l'élément de matière, leurs conséquences observables et un certain nombre de variables « cachées » qui décrivent l'état interne du matériau (son état microstructural par exemple).

Les variables le plus couramment utilisées, dans le cadre de la mécanique des milieux continus, sont : la contrainte σ , rapport de l'effort appliqué à la aire sur laquelle il s'applique ; la

déformation, décrivant les changements de forme de l'élément de matière ; la température, les variables d'écrouissage, décrivant la variation de résistance du matériau ; les variables d'endommagement, schématisant sa détérioration.

Pour caractériser et modéliser le comportement des matériaux, on fait appel à des méthodologies complémentaires telles que l'analyse microstructurale (microscopie électronique), les expériences de laboratoire sur des éprouvettes et la méthode phénoménologique qui traite le matériau comme s'il était macroscopiquement homogène.

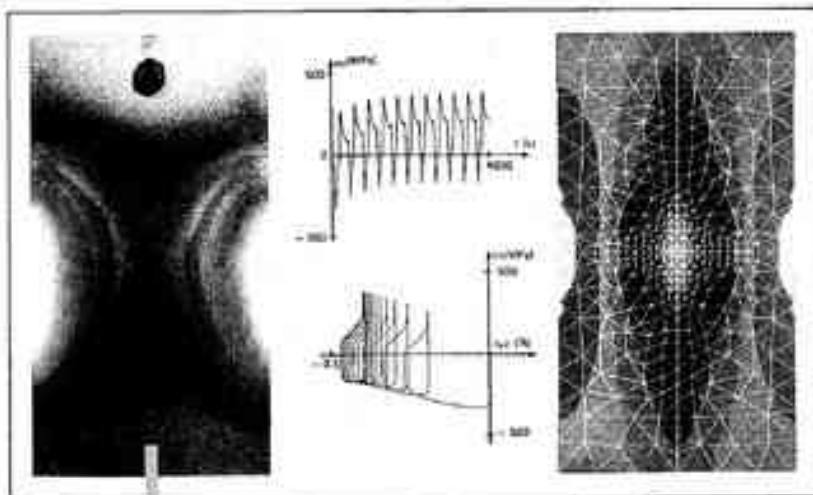
Les divers types de comportement

Le comportement élastique, le plus simple et le plus utilisé, correspond à une relation biunivoque entre la déformation ϵ_e et la contrainte. Il correspond de plus à l'écartement relatif des atomes et intervient pour la plupart des matériaux lorsque les sollicitations ne sont pas trop élevées. Si ce processus intervient avec retard, mais qu'il reste réversible, on parle de comportement viscoélastique.

Le comportement plastique (indépendant du temps) intervient au-delà d'un certain seuil (limite d'élasticité) pour des températures pas trop élevées. La déformation plastique ϵ_p est définie comme la partie irréversible de la déformation. Elle correspond pour les matériaux cristallins aux glissements des plans atomiques, avec création et mouvements de dislocations. L'augmentation de la densité de dislocation, leurs arrangements complexes, leurs interactions avec d'autres défauts provoquent l'écrouissage du matériau, c'est-à-dire, en général, une augmentation de sa limite d'élasticité. On observe souvent un écrouissage cinématique, qui traduit l'existence des « effets Bauschinger », c'est-à-dire, par exemple, la diminution de la limite d'élasticité en compression, suite à une déformation plastique en traction. Ces phénomènes sont particulièrement importants lorsqu'on s'intéresse aux chargements cycliques.

Le comportement viscoplastique intervient aux températures plus élevées. Les effets du temps deviennent prépondérants, traduisant par exemple le fluage du matériau (augmentation progressive de la déformation sous contrainte constante). De même, on observe un effet de la vitesse de la déformation sur les courbes de traction. Plus la vitesse de déformation est faible, plus la résistance (contrainte associée) est faible. Aux températures élevées peuvent se superposer des phénomènes complexes faisant intervenir des évolutions microstructurales en fonction du temps. Ce sont les effets de restauration (annihilation des dislocations, recristallisation, ...) ou de vieillissement (précipitation, ...).

Certains matériaux non métalliques ne font pas intervenir réellement des déformations plastiques. Les détériorations correspondent plutôt à des décohérences ou microruptures : décohérence des agrégats dans les bétons, décohérence fibre-matrice dans les composites. Leur comportement peut alors être décrit par la notion d'endommagement, avec une loi de comportement élastique dont le module d'Young est fonction d'une variable décrivant l'état d'endommagement. La mécanique de l'endommagement, en plein essor depuis une dizaine d'années, constitue aussi un outil précieux pour décrire les stades ultimes de résistance des matériaux métalliques (détérioration avant initiation de fissure et avant rupture).



Analyse expérimentale et numérique d'une plaque plane sous gradient thermique cyclique (origine ONERA). 1) Photo de la plaque au maximum du cycle. 2) Cycles contrainte-déformation calculés au point le plus chaud. 3) Carte de contraintes axiales au maximum du cycle.

Jean-Louis Chaboche, chef de la Division « rupture fatigue », Département des structures, ONERA, 29, avenue de la Division Leclerc, 92320 Châtillon Cedex.

Du microscopique au macroscopique

Partant de l'analyse microscopique discontinue d'un matériau, l'approche micromécanique cherche à prévoir son comportement macroscopique au terme d'une série d'opérations déductives.

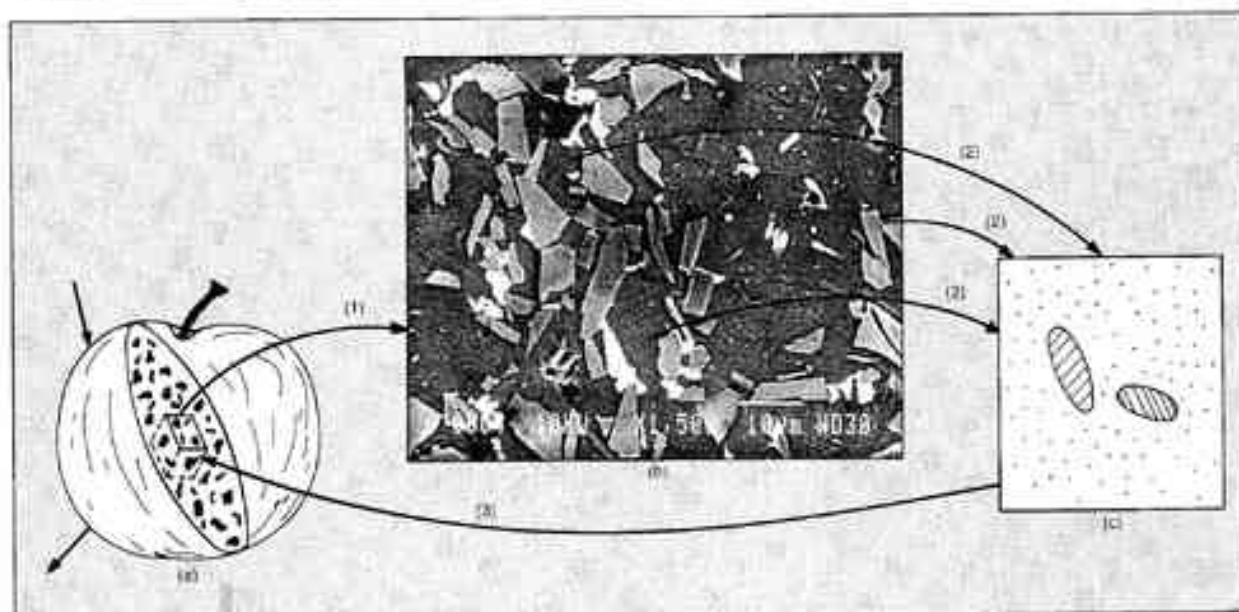
André Zaoui

La mécanique des solides a longtemps semblé se réduire à la représentation phénoménologique de quelques schémas de comportement au contenu physique limité. Elle s'est enrichie peu à peu, sous la pression conjointe du mouvement propre des connaissances et des besoins de l'ingénieur, de préoccupations et de compétences nouvelles, celles du « mécanicien des matériaux » d'aujourd'hui : attentif aux caractérisations microstructurales, attaché à saisir toute la complexité des matériaux, préoccupé d'en comprendre et modéliser les mécanismes microscopiques, il s'emploie à en reconstituer, avec un contenu physique enrichi, le comportement macroscopique. La finalité n'a pas varié : elle reste la formulation, mécaniquement correcte (c'est-à-dire objective, tensorielle et tridimensionnelle), de

lois macroscopiques, pouvant être utilisées dans des calculs de pièces, de structures, d'ouvrages... Mais les moyens, les outils et les méthodes se renouvellent, la culture s'élargit au contact de disciplines voisines, les problématiques se redéfinissent : le microscopique, l'homogène et le continu ne sont plus un point de départ mais un point d'arrivée, l'aboutissement d'une reconstruction déductive à partir d'éléments microscopiques, hétérogènes et discontinus en interaction.

Un exemple peut illustrer cette démarche : celui de l'emboutissage de tôles minces métalliques, obtenues par laminage à froid. On sait depuis longtemps que les déformations plastiques, irréversibles, considérables et très orientées, provoquées par le laminage (écrasement normal aux tôles et allongement dans le sens du laminage) induisent un comportement anisotrope qui, par la sensibilité qu'il traduit à la

direction de sollicitation, complique la conception de la forme initiale du flan à emboutir. Mais on sait aussi que cette anisotropie peut améliorer la capacité de la tôle à supporter sans déchirure un emboutissage de grande amplitude, d'une façon qui, cependant, peut varier beaucoup selon le matériau utilisé. Comment maîtriser ce processus ? Comment choisir le matériau le plus adapté ? Comment concevoir la succession des opérations ? La réponse classique du mécanicien des solides serait, pour chaque matériau, de procéder, à chaque étape de l'opération, à une caractérisation mécanique complète, permettant d'identifier les paramètres d'un modèle phénoménologique de comportement, afin d'apprécier le développement de l'anisotropie induite et ses conséquences. L'approche micromécanique, au contraire, analysera la structure initiale d'un élément de métal, verra dans un millimètre cube de matière polycristalline plusieurs centaines de milliers de « grains », appréciera par microscopie leur forme moyenne, déterminera par diffraction de rayons X la distribution statistique des orientations cristallines ; elle décrira, sur la base des connaissances disponibles en plasticité cristalline, le comportement mécanique des grains isolés, modélisera les interactions entre ces grains lorsqu'ils sont astreints à se déformer ensemble, reliera les grandeurs mécaniques macroscopiques aux grandeurs microscopiques et recompo-



Passage du microscopique au macroscopique : (a) : problème de structure à résoudre. (1) : passage au microscopique ; (b) : analyse micrographique (cas d'un composite à matrice en alliage d'aluminium et à renforts particuliers en carbure de silicium). (2) : modélisation géométrique et mécanique. (c) : résolution du problème de localisation. (3) : retour au macroscopique « homogénéisé ».

sera la réponse globale de l'élément «homogénéisé» aux sollicitations macroscopiques imposées. Pas à pas, elle suivra l'évolution de la distribution de la forme des grains et de leur orientation cristalline et déterminera les «textures» correspondantes et leur effet sur l'anisotropie résultante, rendant possible une meilleure maîtrise de l'ensemble du processus (choix du matériau, des traitements thermiques, des gammes de fabrication...).

On reconnaît, sur cet exemple, les étapes essentielles de la démarche générale de l'«homogénéisation».

méthode visant à déterminer le comportement homogène équivalent d'un matériau hétérogène : choix de l'échelle de départ (ici, les grains) ; définition, de manière statistique pour les matériaux aléatoires (ici, la texture) ou déterministe dans certains cas (voir, plus loin, le cas des matériaux à structure périodique), de la distribution spatiale des constituants (les phases) ; description de leur comportement mécanique ; modélisation des interactions entre phases, en reliant les grandeurs microscopiques et macroscopiques (c'est la localisation) ; retour aux gran-

deurs globales par des opérations de moyenne adaptées (voir figure).

Sur cette base, il n'est plus utopique de penser que le génie des matériaux de demain saura, pour chaque propriété attendue, maîtriser la constitution des matériaux dont les éléments seront définis, calibrés, proportionnés et répartis selon des règles scientifiquement fondées.

■ André Zaoui, professeur à l'université Paris XIII, directeur du Laboratoire des propriétés mécaniques et thermodynamiques des matériaux (L.P. 900) du CNRS, avenue Jean-Baptiste Clément, 93430 Villetaneuse.

Les milieux périodiques

Des méthodes de calcul permettent de décrire les propriétés mécaniques de milieux périodiques. Leurs applications à l'étude de matériaux composites sont en plein développement.

■ Pierre Suquet

Certains renforcements couramment utilisés dans le domaine des matériaux composites présentent une périodicité marquée : tel est le cas des tissus, des nids d'abeille, des composites multidirectionnels et d'autres renforts régulièrement disposés.

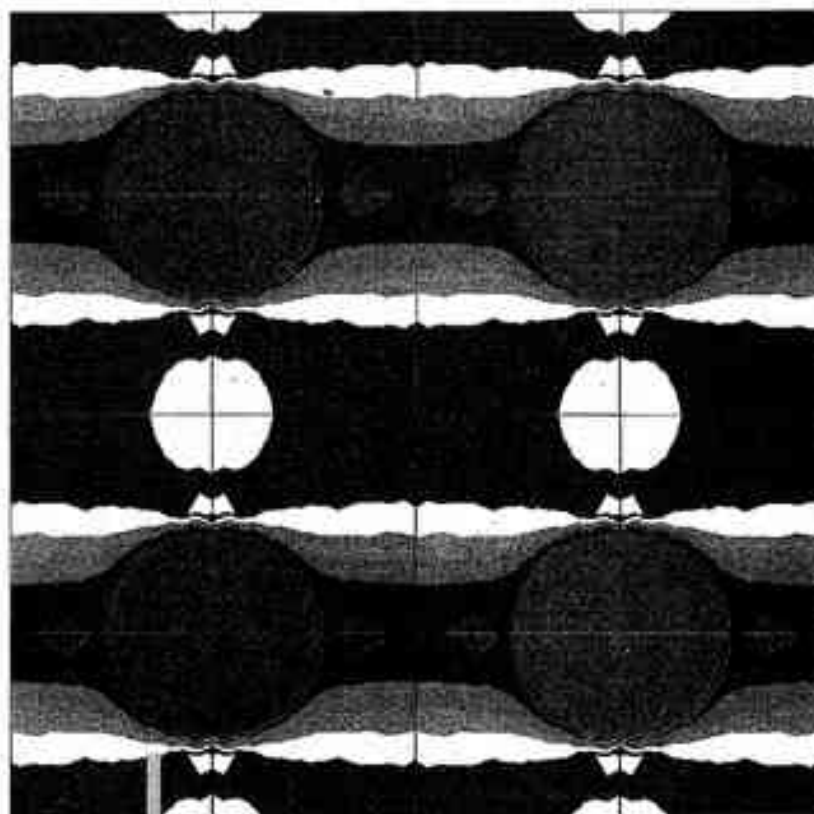
Cette périodicité du milieu impose sans ambiguïté certains éléments de la démarche générale de l'homogénéisation : le problème est évidemment déterministe ; le volume élémentaire représentatif est une cellule de base qui engendre par répétition la géométrie complète ; les conditions aux limites au bord du volume élémentaire représentatif imposent aux champs de contraintes et de déformation de se conformer, au niveau microscopique, à la périodicité du milieu.

Cette méthode est maintenant couramment employée dans le domaine élastique et implantée dans plusieurs codes de calcul. Elle permet de décrire complètement l'anisotropie élastique de composites industriels, comme les unidirectionnels ou les tissus, dont certains modules ne pouvaient être atteints ni analytiquement, ni même expérimentalement.

L'homogénéisation de milieux périodiques ne se limite pas aux propriétés élastiques, et des résultats ont été obtenus pour les propriétés viscoélastiques, viscoplastiques et élastoplastiques de ces milieux. Une voie particulièrement riche d'applications est la détermination du domaine de résistance macroscopique en fonction du domaine de résistance des constituants élémentaires.

Des exemples précis concernant les plaques perforées des générateurs de vapeur ou les sols renforcés ont déjà été traités.

■ Pierre Suquet, professeur à l'université Montpellier II, Laboratoire de mécanique générale des milieux continus (UA 1214 CNRS), université Montpellier II, place Eugène Bataillon, 34096 Montpellier Cedex.



Carte de la contrainte équivalente dans une extension macroscopique transverse (horizontale sur la figure) d'un composite à fibres circulaires. Les zones les moins sollicitées sont en blanc, les plus sollicitées : en rouge. Les fibres, plus raides, supportent une contrainte plus importante que la matrice. Ce report d'efforts est la base du renforcement par les fibres. (© Pierre Suquet)

La mise en forme rajeunie

Emboutissage, usinage, fonderie font de plus en plus appel à des études avancées en mécanique des matériaux et à des simulations numériques. Ce mouvement va bouleverser tout un secteur de l'industrie.

Jean-Michel Jalinier

La « mise en forme » désigne tous les procédés permettant d'obtenir une pièce, partie d'un système mécanique. Cette pièce peut être obtenue par déformation permanente d'un matériau comme dans les procédés de forgeage ou d'emboîtement, par façonnage, par enlèvement de matière dans les procédés d'usinage, par mise en forme directe à partir de l'état liquide ou fondu comme la fonderie de matériaux métalliques ou l'injection de polymères, ou encore par compaction d'un matériau en poudre (c'est la voie utilisée pour les céramiques ou la métallurgie des poudres).

Mise en forme par déformation permanente

Le matériau est déformé entre deux outils comportant une gravure à la géométrie de la pièce à obtenir. Lorsque ce matériau est massif il s'agit du procédé de forgeage, lorsqu'il est en tôle, il s'agit du procédé d'emboîtement. Le

problème posé aujourd'hui est d'être capable d'obtenir des formes de plus en plus complexes avec des matériaux à la résistance de plus en plus élevée. Or, une règle de la nature veut que lorsque la résistance augmente, la capacité à se déformer de façon permanente diminue. Obtenir des formes plus complexes avec des matériaux moins « formables » oblige à recourir à une modélisation.

Il est fait appel à l'analyse numérique pour la simulation sur ordinateur, à la connaissance des lois de contact et de frottement entre le matériau et l'outil et enfin à la connaissance de la loi de comportement du matériau sous des sollicitations très complexes (bien plus compliquées que le simple essai de traction) et dans certains cas à température élevée (cas du forgeage à chaud).

Mise en forme par enlèvement de matière

C'est l'usinage qui consiste à tailler par passes successives la pièce par enlè-

vement de copeaux.

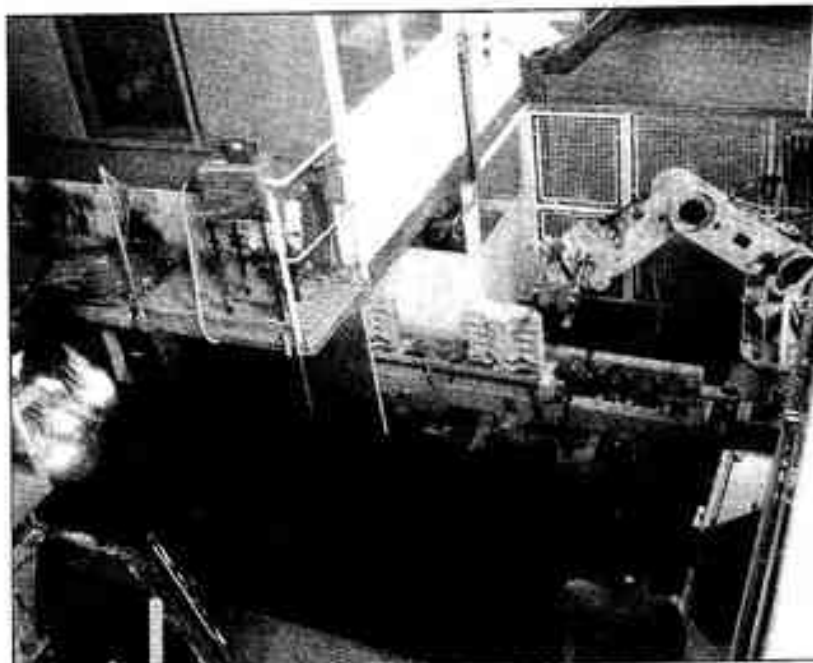
L'amélioration de la productivité demande des vitesses de coupe de plus en plus élevées, l'amélioration des caractéristiques des pièces fournissant des matériaux de plus en plus durs. La modélisation de l'usinage nécessite le développement d'études, d'une part, en mécanique du frottement et de l'usure (en particulier pour les outils coupants), et d'autre part, en mécanique du comportement à grande vitesse et à haute température pour modéliser la coupe du copeau.

Mise en forme à partir de l'état fondu

Se trouvent ici tous les procédés du type fonderie auxquels on peut assimiler l'injection des polymères assez voisine de l'injection sous pression de métal: le matériau liquide vient remplir une empreinte, il est ensuite refroidi pour se solidifier à la forme donnée par l'empreinte. Il est demandé à ces procédés de fournir des formes de plus en plus complexes constituées de parois minces de grandes dimensions avec une précision croissante. De plus, les propriétés finales de la pièce dépendent de la vitesse de refroidissement subie. L'optimisation de ces procédés passe donc par une étude de la solidification des matériaux, des échanges thermiques et du refroidissement de la pièce, du remplissage de l'empreinte par le matériau liquide et enfin des structures de la pièce obtenue.

Mise en forme à partir de poudre

A partir de poudres du matériau, est remplie une empreinte à la forme de la pièce, ensuite, compactée pour obtenir un matériau dense après frittage, opération consistant à assurer à haute température la liaison entre les grains de poudre. Le remplissage de l'empreinte peut s'effectuer de différentes manières, à sec, en voie liquide par mélange en barbotine, par injection en voie pâteuse par mélange à un polymère qui est pyrolysé au frittage. Bien qu'appliqué déjà à des matériaux traditionnels, l'acier en particulier, ce procédé est très utilisé ou prometteur pour de nouveaux matériaux: céramiques, super alliages, alliage d'aluminium à hautes caractéristiques... Sa mise au point nécessite des études importantes sur le comportement des matériaux en poudre en particulier lors de leur compactage.

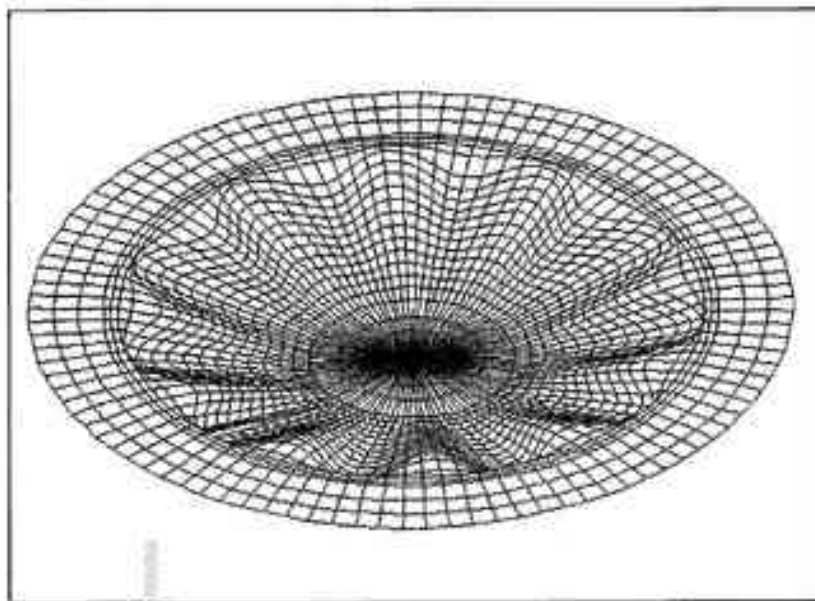


Chantier de coulée des carters cylindres de moteur dans un moule en sable vert: motte de sable en sortie de machine à moulée Disamatic; tour de coulée; robot de manipulation. (© Renault).

Jean-Michel Jalinier, responsable des recherches et développement en fonderie, Renault, service 0954, 92109 Boulogne-Billancourt Cedex.

Les logiciels de mise en forme

Les logiciels de simulation de mise en forme des matériaux, malgré leur complexité, doivent permettre de réaliser de substantielles économies sur la réalisation de prototypes industriels.



Simulation du plissement d'une tôle circulaire soumise à l'action d'un poinçon cylindrique. (© division MNM/UTC)

Gilbert Touzat

Les ingénieurs chargés de concevoir ou d'améliorer des procédés de mise en forme de matériaux réclament des logiciels de simulation capables de remplacer la construction de prototypes coûteux par quelques exécutions de ces programmes sur un ordinateur. Ceci est vrai chez les constructeurs d'avions et d'automobiles, mais aussi chez les fabricants de tubes ou profilés métalliques. Ces logiciels doivent calculer la forme finale d'une pièce fabriquée, par exemple, par écrasement d'une tôle ou d'un lopin entre les mâchoires d'une presse, ainsi que les déformations (changements de forme) et les contraintes (efforts internes dans la matière) à tout instant et en tout point de la pièce. Ils génèrent une maquette informatique du processus de mise en forme, sur laquelle l'ingénieur peut étudier l'influence de divers paramètres, et qui complète la collection des logiciels habituels de CAO (conception assistée par ordinateur). La création de logiciels de simulation de la mise en forme

est difficile, principalement à cause des équations complexes de la mécanique non linéaire des solides : équations d'équilibre écrites sur un domaine (forme de la pièce) inconnu a priori, équations de comportement du matériau qu'il faut exprimer dans un repère lié à (qui tourne avec) la matière des inéquations représentant le contact et le frottement entre la pièce et la matrice, et de la théorie des coques en grandes déformations. Comme beaucoup de logiciels de simulation en ingénierie, ils font aussi appel à d'autres domaines que la mécanique, telles que les mathématiques appliquées pour la résolution des équations, l'informatique pour la présentation graphique des résultats, etc. Ils sont donc complexes et d'un usage encore délicat. Plusieurs laboratoires associés au CNRS s'efforcent de rendre ces logiciels plus puissants, moins coûteux en temps-ordinateur et plus faciles à utiliser.

DRS Gilbert Touzat, directeur de Département, co-responsable du Laboratoire de mécanique et des matériaux (UA 849 CNRS), université de technologie de Compiègne, rue Personne de Rohersul, BP 649, 60206 Compiègne Cedex.

Approche locale en mécanique de la rupture

André Pineau

Un bon nombre de structures mécaniques contiennent des défauts et même des fissures. Il peut s'agir de défauts de fabrication ou qui apparaissent en cours d'utilisation. On est ainsi conduit à développer des outils qui permettent de calculer la durée de vie de structures mécaniques endommagées. C'est l'objet de la mécanique de la rupture qui s'est largement développée depuis une vingtaine d'années.

Elle vise, tout d'abord, à caractériser le champ des contraintes et des déformations à la pointe d'une fissure. Des recherches théoriques ont montré qu'il est possible de décrire approximativement ce champ à l'aide de paramètres de chargement globaux qui se calculent à partir du chargement et de la dimension du défaut. Des recherches ont ensuite été effectuées pour corréler la cinétique de la propagation des fissures avec ces paramètres globaux. On dispose ainsi d'un outil efficace et très utile, largement employé, mais qui souffre d'un certain nombre de limitations théoriques et pratiques. Ainsi, lorsque le chargement est complexe, lorsque la fissure n'est plus bidimensionnelle et que le chargement n'est plus isotherme, on est souvent confronté à de sérieuses difficultés.

L'approche locale de la rupture, dont le développement est plus récent, vise à lever de telles limitations. Schématiquement, on ne cherche plus à corréler, de façon empirique, le chargement et la réponse du matériau, mais à décrire, le plus fidèlement possible, l'évolution de son endommagement jusqu'au stade ultime qu'est la rupture. Des techniques numériques permettent de décrire successivement l'amorçage, puis la propagation de la fissure. Le développement d'une telle approche nécessite qu'au moins deux conditions soient remplies :

1 - On doit pouvoir représenter correctement l'histoire des contraintes et déformations à fond de fissure. Le développement de la méthode des éléments finis a permis de faire des progrès. Toutes les difficultés ne sont pas encore levées. Cependant dès maintenant, en adoptant une voie « raisonnable », des cas pratiques ont pu être traités.

> tés et incorporés dans des logiciels de calcul.

2 - A ce champ, on associe une fonction d'endommagement qui, écrite sous forme incrémentale, décrit l'évolution de l'état de la matière vis-à-vis de la rupture. Là aussi, diverses voies sont possibles. Pour l'une, voir l'article suivant « avant la rupture ». La voie métallurgique s'impose de décrire, le mieux possible, les diverses étapes physiques de la rupture. Elle est esquissée ci-dessous.

Approche locale de la rupture en plasticité

Dans le cas particulier de la rupture par cavitation, sous l'effet du champ local de contraintes-déformations régnant en pointe de fissure, le matériau devient poreux. Des modèles représentent l'évolution individuelle des microdéfauts (amorçage et croissance) puis leur interaction (coalescence). Le critère local de rupture dépend de la nature du matériau. Il peut s'exprimer en terme de taux de croissance critique. Le modèle identifié, on l'applique à la pointe d'une fissure afin de simuler, par des méthodes numériques, la propagation stable de celle-ci et prévoir la charge critique à rupture.

Dans le domaine de la rupture fragile par clivage, l'approche locale a également permis de traiter des applications importantes. Les mécanismes sont également bien connus. De manière simplifiée, on peut les associer à l'existence d'une contrainte critique en présence de déformation plastique, condition nécessaire à la propagation instable d'un microdéfaut. L'analyse se fait à partir d'un élément de volume caractéristique de la microstructure. Les modèles les plus récents reprennent ces idées mais expriment les conditions de rupture en terme de probabilité (statistique de Weibull). Ces modèles ont été utilisés pour simuler numériquement les aspects tridimensionnels et rendre compte de phénomènes de rupture fragile sous conditions anisothermes.

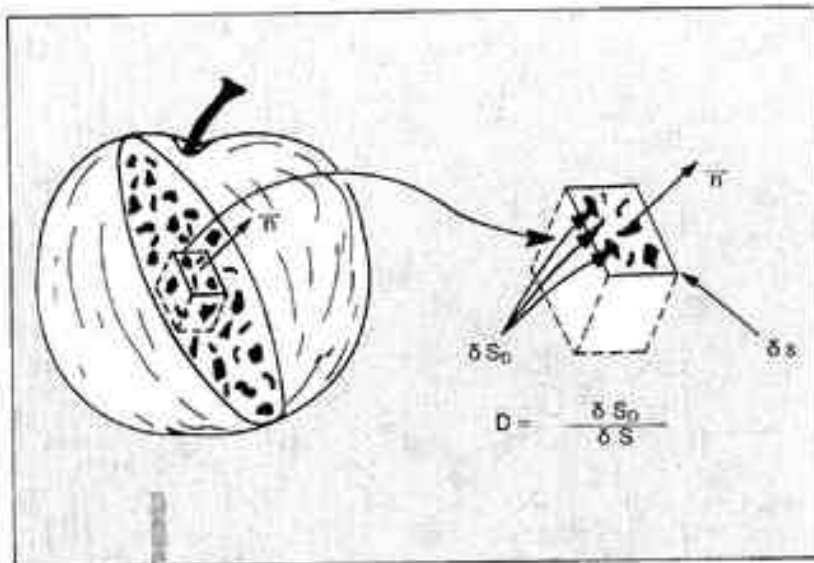
La méthodologie de l'approche locale ne s'applique pas qu'aux matériaux cristallins. Récemment, elle a également été appliquée avec succès à la rupture d'autres matériaux comme les mousses syntactiques. Par ailleurs, des tentatives encourageantes sont menées pour l'étendre au domaine de l'amorçage et de la propagation des fissures en viscoplasticité.

André Pineau, professeur à l'École nationale des mines de Paris, responsable du Laboratoire de métallurgie mécanique (UA 866 CNRS), École nationale supérieure des mines de Paris, Centre des matériaux, B.P. 87, 91003 Evry Cedex.

Avant la rupture

La mécanique de l'endommagement décrit l'évolution des microdéfauts des matériaux qui peut conduire à la rupture.

Jean Lemaitre



Définition d'une variable continue d'endommagement.

Pendant longtemps, on n'a caractérisé la rupture des matériaux que par les conditions d'apparition d'une fissure ou d'une cassure visible à l'œil nu : force de rupture d'un brancard de chariot au Moyen Âge, contrainte ultime de rupture dans une section critique de l'attache d'une aile d'avion au milieu du 20^e siècle. Mais avant la rupture que se passe-t-il ? On a d'abord pu observer ce phénomène bien caché grâce aux microscopes, puis envisager timidement de le modéliser à la fin des années 50, pour enfin le comprendre et le prévoir dans les années 70. Cela a permis de l'incorporer dans les calculs de sécurité des structures du génie aéronautique, du génie nucléaire, du génie mécanique, du génie civil dans les années 80. Il en est résulté la mécanique de l'endommagement pour étudier la détérioration progressive des matériaux qui précède la rupture à l'aide des outils de la mécanique que sont les forces ou contraintes, les déplacements ou déformations, la température et le temps.

La difficulté essentielle résidait (et réside encore dans une certaine mesure) dans le choix d'une variable d'endommagement qui pose le problème de

l'échelle à laquelle on étudie le phénomène. Comment représenter par une variable continue (c'est nécessaire en mécanique !) les micro-fissures et micro-cavités qui se développent dans tout matériau fortement sollicité ? Le choix de la densité surfacique de défauts D conduit naturellement à la notion de contrainte effective rapportée à la section qui effectivement résiste aux efforts et à une modélisation par la mécanique des milieux continus. La section doit être choisie, ni trop petite pour contenir suffisamment de microdéfauts, ni trop grande pour que la notion de dérivée spatiale utilisée en mécanique garde son sens mathématique (voir figure).

Le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles a permis de développer des lois de comportement exprimant comment évolue cet endommagement dans les matériaux sollicités. Par exemple, $D = 0$ correspond à un matériau vierge de tout endommagement. $D = 0,2$ correspond à une section élémentaire dans laquelle les micro-fissures et les traces des micro-cavités occupent 20 % de la surface. $D = 1$ correspond à l'élément de volume complètement rompu, c'est-à-

dire la fissure macroscopique visible à l'œil nu (de l'ordre de 1/10 de millimètre pour les métaux). Une loi d'endommagement est une relation locale qui exprime, pour un matériau donné, la vitesse d'endommagement dD/dt en fonction des contraintes et des déformations existant au point considéré. Le formalisme de la thermodynamique conduit à la forme de la loi, mais c'est l'expérience de laboratoire sur le matériau considéré qui donne les valeurs numériques des paramètres qui interviennent dans l'équation. De même que l'élasticité de chaque matériau est caractérisée par la valeur de son module d'Young, sa résistance à l'endommagement est caractérisée par quelques coefficients. Le rôle de ces expé-

riences d'identifications est fondamental pour les applications industrielles puisqu'elles permettent de quantifier la fragilité, la ductilité ou la fatigue des matériaux.

Mais comment prévoir la valeur de l'endommagement en tel point de telle tuyauterie, de telle centrale nucléaire au bout de 30 ans de bons et loyaux services ($D \ll 1$ on espère !)? Dans un premier temps, on calcule en fonction du temps, et en tout point de la structure, les contraintes et les déformations qui résultent du programme de charges supposées appliquées tout au long de la vie de la structure. Là, entre en jeu la puissance des ordinateurs, car ces calculs qui utilisent le plus souvent la méthode des éléments finis sont très

longs. Dans un deuxième temps, un critère d'endommagement écrit en fonction des contraintes permet de localiser le point le plus sollicité où l'endommagement sera le plus important. En ce point, on écrit la loi d'évolution de l'endommagement, fonction de l'histoire des contraintes et des déformations. La solution est fonction du temps $D(t)$. Il est alors facile de calculer le temps au bout duquel l'endommagement atteint une valeur critique inacceptable pour la sécurité de la structure et de son environnement.

Jean Lemaître, professeur à l'université Paris VI, Laboratoire de mécanique et technologie (UA 860 CNRS), Ecole normale supérieure de Cachan, 61, avenue du Président Wilson, 94230 Cachan.

Où se produira la fissure ?

On a découvert récemment que dans les simulations numériques, la propagation d'une fissure ne respectait pas toujours les symétries.

Giuseppe Geymonat

Mis en évidence récemment, l'un des aspects les plus intéressants de la mécanique de l'endommagement est la possibilité de localisation du phénomène, induite par le caractère adoucissant des matériaux en cours d'endommagement. On a d'abord rencontré ces effets de localisation lors de simulations numériques du comportement de structures complexes. La figure donne un exemple de prédiction de la progression d'une fissure dans un cylindre avec un trou hexagonal et soumis à un déplacement croissant sur le bord extérieur (figure a). Les calculs permettent de prévoir l'amorçage du processus de fissuration aux sommets de l'hexagone (figure b) en respectant les symétries géométriques du problème. Par contre la propagation de la fissuration (c'est-à-dire, de la zone très localisée où l'endommagement a atteint le seuil critique) ne respecte pas les symétries géométriques et de plus elle dépend du

maillage choisi (figure c). Le caractère imprévisible de ces résultats a conduit d'abord à douter de la validité des codes de calculs ou des méthodes numériques employées.

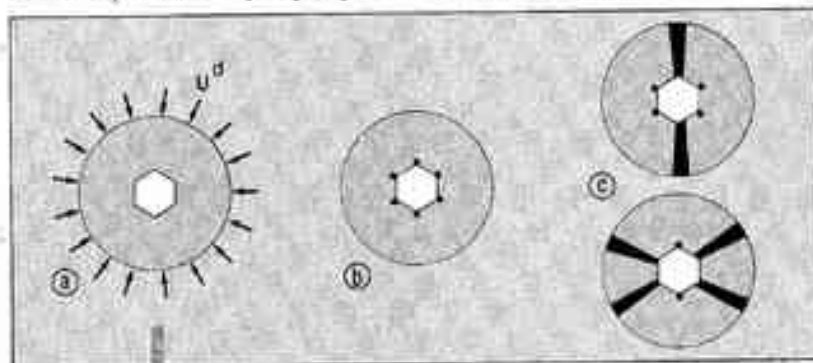
Des travaux menés au cours de ces dernières années en France comme à l'étranger, ont permis de vérifier le caractère intrinsèque de ces phénomènes dont l'origine est liée aux effets de couplage entre l'endommagement, le comportement mécanique (élastique et/ou plastique) et la géométrie des pièces.

Dans certains problèmes d'élasticité en grandes déformations, on a déjà rencontré ce type de phénomènes, liés au changement de structure des équations aux dérivées partielles, qui localement peuvent perdre leur ellipticité. Ces résultats suggèrent de nouvelles méthodes pour des analyses plus précises.

Par exemple, l'effet dévastateur de petites imperfections sur les résultats des simulations numériques (figure c) montre la perte d'unicité de la solution.

Les recherches s'orientent maintenant sur les méthodes à utiliser pour réintroduire l'unicité de la solution et sa stabilité par rapport aux petites perturbations. Il s'agit des approches locales pour obtenir une meilleure compréhension des mécanismes physiques qui interviennent à la pointe d'une fissure. On espère en déduire des critères de rupture locaux plus précis qui devraient conduire les simulations numériques à choisir la bonne solution...

Giuseppe Geymonat, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de mécanique et technologie (UA 860 CNRS), Ecole normale supérieure de Cachan, 61, avenue du Président Wilson, 94230 Cachan.



Progression de zones endommagées dans un cylindre avec un trou hexagonal.
 (a) géométrie et chargement utilisés ;
 (b) points d'amorçage ;
 (c) sensibilité de la propagation aux défauts géométriques provoqués par le maillage (deux maillages différents ont été utilisés)
 (d'après A. Benallal, J. Florez et G. Geymonat).

Des modèles pour la fatigue des matériaux

L'avion qui décolle et atterrit est soumis à des efforts qui emmènent certaines pièces au-delà de leur limite d'élasticité. La modélisation de la redistribution des contraintes permet d'évaluer leur « fatigue ».

Georges Cailletaud

Fatigués ? Les matériaux le sont lorsqu'on les soumet à des chargements cycliques. Dans ces conditions, ils peuvent se rompre pour des efforts relativement faibles par rapport à leur résistance initiale. Entendons-nous bien, on s'intéresse ici aux « grands » cycles, marche-arrêt d'un moteur, d'une centrale, cycle aéronautique sol-air-sol, au cours desquels les amplitudes de chargement sont telles qu'elles entraînent des dépassements de la limite élastique sur certains points critiques ; l'approche classique les prenait en compte par un calcul élastique et des coefficients de sécurité, mais la tendance actuelle consiste à effectuer une modélisation aussi proche que possible de la réalité, par une représentation complète de la marche normale, ou la simulation d'incidents de fonctionnement. Il est donc nécessaire de disposer de bonnes relations de comportement contrainte-déformation inélastique si l'on veut effectuer des simulations fiables.

Modèles actuels

La façon la plus souple, mais aussi la plus performante pour construire des lois de comportement inélastique variables sous chargement cyclique consiste à considérer la contrainte macroscopique comme la somme d'une contrainte interne, représentant le nouvel « état neutre » du matériau après écrouissage, d'une contrainte de friction, qui caractérise le seuil à dépasser autour de cet état neutre pour provoquer l'écoulement inélastique, et enfin (éventuellement) d'une contrainte « visqueuse », qui dépend de la vitesse de sollicitation. Chacune d'entre elles

est l'image au niveau macroscopique de mécanismes physiques de l'échelon microscopique :

— La première est liée à l'apparition d'inhomogénéités de déformation au niveau microscopique (d'un grain à l'autre, mais également à l'intérieur des grains, par la présence d'une phase durcissante, ou par apparition de cellules de dislocations). Ceci favorise la naissance de contraintes résiduelles auto-équilibrées, à longue portée, entre les différents constituants, et déplace d'autant la limite d'élasticité macroscopique. La contrainte interne est donc un tenseur d'ordre 2 qui caractérise la translation du domaine élastique. Son évolution est liée à celle de la déformation inélastique ; il s'agit d'une variable d'écrouissage « cinématique », dont la variation est rapide au cours de chaque cycle. L'introduction d'un tel type de variable est nécessaire pour représenter correctement l'« effet Bauschinger », qui indique que la limite élastique en compression diminue si l'on effectue des pré-chargements en traction. Dans les modèles les plus anciens, cette contrainte interne est proportionnelle à la déformation plastique, ce qui conduit à des courbes contrainte-déformation bilinéaires ; on préfère maintenant utiliser une relation non linéaire, ce qui permet de simuler correctement les boucles d'hystérésis (voir figure 1).

— La seconde provient de la multiplication des obstacles due à l'accumulation des déformations, qui induit une augmentation de la résistance au mouvement des dislocations. On est en présence d'une contrainte à courte portée. Elle est de nature scalaire, caractérise le rayon du domaine d'élasticité, et dépend de la longueur du trajet de chargement dans l'espace des déformations. Elle varie relativement peu, de façon monotone, au cours du chargement, et atteint une valeur limite, qui correspond au « cycle stabilisé ».

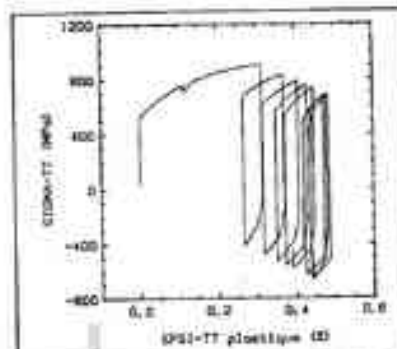


Fig. 1 - Il n'est pas facile de prévoir a priori l'allure et les niveaux des contraintes au cycle stabilisé. Cette figure illustre un cas favorable pour lequel on atteint le cycle stabilisé après une vingtaine de cycles de fonctionnement : le problème est celui d'un disque de turbine d'hélicoptère, pour lequel les sollicitations principales sont la force centrifuge et le gradient thermique ; on a représenté le comportement du point le plus critique, situé à l'aîsage (calcul Zébulon, EMP).

Perspectives

Nous nous trouvons actuellement dans une phase cruciale pour le développement des calculs de structures sous chargements cycliques, dans la mesure où des lois de comportement de bon niveau sont maintenant établies sur élément de volume, et installées dans quelques codes de calcul ; et la montée en puissance des ordinateurs rend les calculs en bidimensionnel relativement abordables. Ceci permet donc de réaliser les premiers essais « en vraie grandeur » de l'ensemble de la chaîne de prévision, et d'évaluer les gains de temps... et d'argent apportés par la simulation numérique.

Georges Cailletaud, maître de recherche à l'Ecole des mines, Laboratoire de métallurgie mécanique (UA 866 CNRS), Ecole nationale supérieure des mines de Paris, Centre des matériaux, BP 87, 91003 Evry Cedex.

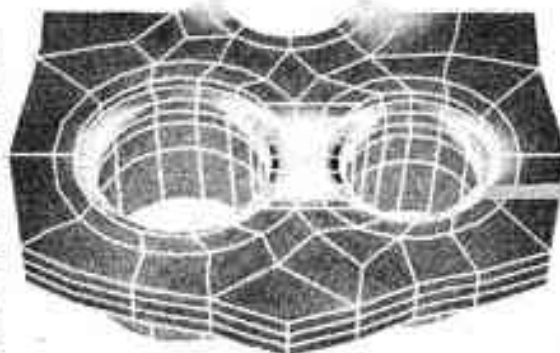


Fig. 2 - Concentrations de contraintes au régime maximum dans une culeasse Diesel (étude pour RNUR ; calcul Zébulon, EMP ; visualisation CAEDS-Supertab).

Contraintes résiduelles

Tout traitement mécanique, thermique ou de diffusion conduit à l'établissement de contraintes résiduelles favorables ou néfastes, suivant les cas, aux propriétés du matériau traité.

■ Gérard Maeder

Les matériaux sont aujourd'hui utilisés au maximum de leurs performances, et les pièces mécaniques sont calculées en résistance avec des coefficients de sécurité (ou d'ignorance) les plus réduits. Or, aux contraintes extérieures appliquées au matériau, se superposent des contraintes internes au matériau appelées contraintes résiduelles. Ces contraintes vont avoir, suivant leur signe, leur amplitude et leur répartition en surface ou en volume, des influences favorables ou défavorables sur le comportement des pièces en service.

Origine et définition

Pour introduire la notion de contraintes résiduelles, nous allons considérer deux plaquettes de caoutchouc de même section mais de longueurs légèrement différentes (voir figure). Pour réaliser par collage un seul bloc parallélépipédique, il est nécessaire de contracter la plaquette la plus longue et d'allonger la plaquette la plus courte en leur appliquant respectivement des forces opposées. Les contraintes de compression et de traction ainsi introduites dans chacune des plaquettes vont subsister dans le bloc formé par collage : ce sont des contraintes résiduelles dans le sens où elles restent dans le matériau en absence de toute force extérieure.

Ces contraintes proviennent donc d'une incompatibilité des déformations entre différents volumes d'une pièce, et existent aussi bien à l'échelle microscopique qu'à l'échelle macroscopique suivant laquelle on considère le matériau. Elles sont équilibrées en force et en moment dans toute section du matériau et peuvent pour cette raison conduire à des déformations à l'échelle macroscopique, comme dans le cas décrit ci-dessus des deux plaquettes minces.

Tout traitement mécanique (laminage, tréfilage...), thermique (trempe, solidification, soudage...), de diffusion (cémentation, nitruration), qui entraîne une déformation locale (source des contraintes), conduit à des contraintes résiduelles qui peuvent atteindre la limite d'élasticité. L'existence de ces contraintes est donc générale.

Influence et détermination

Les contraintes résiduelles entraînent de nombreux effets dont les plus importants agissent sur la résistance des matériaux et la déformation des pièces.

Agissant comme état de précontrainte dans le matériau, les contraintes résiduelles modifient en particulier sa limite d'élasticité. Opposées aux contraintes appliquées, elles auront bien entendu des effets favorables : c'est le domaine des traitements superficiels de précontrainte qui ont pour but d'introduire dans les couches superficielles des matériaux (quelques dixièmes de millimètres) des contraintes résiduelles de compression s'opposant aux sollicitations de fatigue (torsion ou flexion oscillant autour d'une valeur moyenne), ou de corrosion sous contrainte. Le traitement superficiel le plus utilisé est ainsi le grenaillage de précontrainte qui consiste à projeter de petites billes d'acier ou de verre très dures sur la surface sollicitée en service.

Si l'équilibre des forces internes liées aux contraintes résiduelles est détruit, la pièce « réagit » en se déformant pour retrouver un nouvel état d'équilibre de

ces forces. Cette déformation peut se produire soit par enlèvement de matière (usinage), soit par introduction de contraintes résiduelles, soit par enlèvement de ces contraintes (traitement thermique de détensionnement). Les conséquences sont bien sûr très importantes pour la fabrication de pièces ou de montages de précision.

A côté des moyens de calculs qui se développent, il faut cependant reconnaître que les déterminations sont essentiellement expérimentales. Pour cette détermination, il faut mesurer une déformation, puis calculer une contrainte en utilisant les caractéristiques d'élasticité du matériau.

Dans le cas de méthodes mécaniques, on provoque la déformation en détruisant l'équilibre des forces internes par perçage d'un trou, d'une gorge, ou par découpage. Cette déformation est mesurée par des jauges résistives collées sur la surface de la pièce. Cependant, il existe une méthode non destructive utilisant comme juge, grâce à la diffraction des rayons X, la distance séparant des plans atomiques voisins. Cette méthode, bien que limitée aux matériaux cristallins, est plus répandue grâce à l'existence d'appareillages déplaçables entièrement automatisés (voir figure).

■ Gérard Maeder, professeur à l'Ecole nationale supérieure des arts et métiers (ENSA-M), responsable de l'unité associée « Microstructure et mécanique des matériaux » (UA 1219 CNRS), ENSAM, 151, boulevard de l'Hôpital, 75640 Paris Cedex 13.

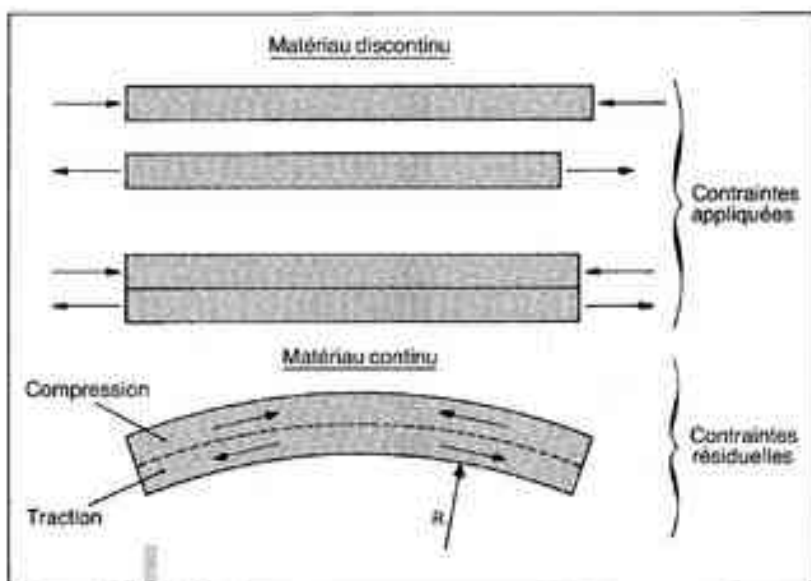


Schéma de l'introduction de contraintes résiduelles.

La corrosion sous contrainte

La corrosion d'un matériau, sous les influences conjointes de la chimie et de la mécanique, est présente dans de nombreuses industries et constitue un réel problème économique-sécuritaire.

Didier Desjardins

On parle de corrosion sous contrainte (CSC) lorsqu'un matériau soumis à l'action conjointe d'un environnement chimique et de sollicitations mécaniques subit un dommage de nature différente de celui qu'il subirait sous l'action successive de l'environnement chimique et des sollicitations mécaniques. On dit que le phénomène est synergique.

La CSC intéresse de nombreux types de matériaux solides : métaux et alliages, polymères, verres, composites et les environnements capables de provoquer ce phénomène sont divers et dépendent du matériau considéré : électrolytes aqueux, sels fondus, métaux liquides, gaz...

Les industries concernées sont nombreuses : transports, bâtiments et travaux publics, chimie, pétrochimie, nucléaire..., de sorte que la CSC demeure un réel problème économique et de sécurité pour l'ingénieur.

Le cas de CSC qui reste le mieux connu sur le plan des mécanismes est celui des matériaux métalliques en milieu aqueux dans le cas où les sollicitations mécaniques sont sensiblement constantes. Lorsque les sollicitations sont cycliques, on parle de fatigue-corrosion (FC). Dans les deux situations, l'endommagement résulte en une fissuration transcrystalline ou intercrystalline due à la localisation des processus mécaniques d'endommagement de la surface, à la dissolution électrochimique qui peut en résulter et à une éventuelle fragilisation par l'hydrogène produit par certaines réactions électro-

chimiques à l'interface métal-milieu.

Pour s'en tenir au cas particulier des alliages métalliques, il faut rappeler que les endommagements dus à la fatigue et à la corrosion ne sont pas simplement additifs. Il existe un effet de synergie qui conduit à un endommagement très important en fatigue-corrosion aqueuse.

Cet effet est d'autant plus significatif que la fréquence du cyclage est faible (afin que les processus de corrosion aient le temps de prendre part à l'endommagement) et fortement dépendante du mode de sollicitation imposée (contrainte imposée ou déformation imposée) de sorte qu'il existe une frontière floue entre CSC et FC qui conduit à englober les deux phénomènes à l'intérieur d'une terminologie plus générale telle que « rupture assistée par l'environnement » (Environment Sensitive Fracture).

Didier Desjardins, maître de conférences à l'université de Bordeaux I, Laboratoire de mécanique physique (UA 867 CNRS), université de Bordeaux I, 351, cours de la Libération, 33405 Talence Cedex.

Les alliages à mémoire de forme

Certains alliages correctement « éduqués » gardent en mémoire deux formes stables : ils passent de l'une à l'autre par un simple changement de température. Ce qui permet de développer d'intéressantes applications industrielles.

Marcel Berveiller

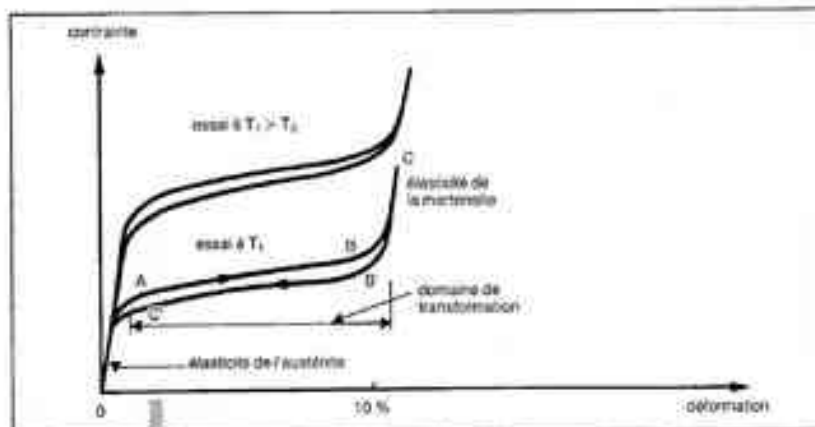
L'effet mémoire de forme résulte d'un changement de phase à l'état solide appelé transformation martensitique : sous l'effet d'une variation de température ou de la contrainte, la phase mère (austénite) se transforme en martensite. Ce changement de phase est accompagné d'un changement de forme ou défor-

mation de l'élément de volume. La symétrie cristalline de la phase mère engendre une multiplicité de variantes ayant la même structure mais pour lesquelles la déformation est différente.

Le comportement de tels alliages présente alors différents aspects :

1) dans la pseudoélasticité ou superélasticité, la formation de martensite à partir de l'austénite sous l'effet d'une

augmentation de contrainte est accompagnée d'une déformation réversible de l'ordre de 10 % (voir figure). Pour les métaux usuels, cette déformation ne dépasse pas 0,1 %. La courbe contrainte-déformation n'est pas linéaire et présente un seuil lié au début de la transformation. Ce seuil dépend de la température : si on chauffe un échantillon en martensite, la transfor-



Pseudoélasticité par transformation martensitique :
 - entre 0 et A, l'austénite se déforme par élasticité classique
 - entre A et B, l'austénite se transforme en martensite
 - entre B et C, déformation élastique de la martensite
 C → B' → C' → 0, séquence inverse.

mation inverse (martensite-austénite) développe des contraintes atteignant deux mégapascal par degré Celsius ;

2) dans l'effet mémoire de forme simple effet, une contrainte appliquée à un échantillon martensitique déforme celui-ci de manière permanente par une réorientation des différentes variantes. Lors du réchauffage, la transformation inverse se produit et redonne sa forme initiale à l'échantillon ;

3) l'effet mémoire de forme double

sens est obtenu après un traitement thermomécanique appelé éducation qui joue le rôle de catalyseur pour certaines variantes. On peut ainsi obtenir deux formes stables pour l'échantillon à deux températures différentes.

Les alliages les plus étudiés et pour lesquels les applications sont les plus nombreuses appartiennent à trois classes : cuivre-zinc-aluminium, nickel-titane, fer. Les applications industrielles concernent la connectique (mé-

canique et électrique), la régulation thermique (les dispositifs en matériau à mémoire de forme jouent le rôle de capteur et d'actionneur), la robotique, l'orthodontie, la chirurgie orthopédique, etc.

■ Marcel Berveiller, professeur à l'université de Metz, responsable du Laboratoire de physique et mécanique des matériaux (UA 1215 CNRS), Institut supérieur de génie mécanique et productique, université de Metz, île de Saulcy, 57045 Metz Cedex 01.

Les superalliages

Dans le domaine des hautes températures, les superalliages, sans cesse améliorés, sont les matériaux les plus avancés face aux futurs matériaux céramiques.

■ Luc Rémy

Les superalliages sont utilisés dans les parties chaudes et fortement sollicitées des moteurs d'avion et d'hélicoptère. Les plus utilisés sont des alliages complexes à base de nickel, contenant de nombreux éléments d'addition, jusqu'à 30 % en poids : cobalt, chrome, tungstène, aluminium, titane, tantale, niobium, molybdène, bore et carbone. Ces alliages sont durcis par une précipitation de phase ordonnée, appelée γ' , dont la composition est du type Ni_3Al . La limite d'élasticité de cette phase augmente avec la température jusqu'à 800 °C et, en proportion élevée, elle permet à l'alliage de conserver de bonnes propriétés mécaniques jusqu'à 1 000 ou 1 100 °C.

Ces alliages servent principalement à fabriquer les aubes (ailettes) et les disques de turbine. Les constructeurs cherchent en permanence à augmenter la température d'entrée des gaz dans la turbine, afin d'accroître le rendement du moteur. Cette température dépasse 1 500 °C dans les moteurs en développement, grâce à l'évolution des superalliages et des techniques de refroidissement des pièces.

Le risque majeur d'une turbomachine aéronautique est l'éclatement du disque qui entraîne la perte de l'appareil. En vol, le disque est soumis à un effort centrifuge (dû à sa masse et à celle des ailettes accrochées à sa périphérie), à une température de 400 à 650 °C. La répétition des cycles démarrage-arrêt conduit à un endommagement par fatigue oligocyclique (à faible nombre de cycles) avec amorçage et croissance de fissures dans les zones les plus sollicitées. Les disques des mo-

teurs en développement sont en alliages élaborés par métallurgie des poudres qui ont une limite d'élasticité élevée jusqu'à 700 °C. Ils contiennent cependant des défauts (porosités, débris céramiques) dont la taille peut atteindre celle des grains de poudre (0,05 à 0,15 millimètre). Le calcul de durée de vie des disques doit donc être fait en tenant compte de ces défauts initiaux qui peuvent amorcer des microfissures. L'utilisation de la mécanique de la rupture doit permettre d'y parvenir. Des études expérimentales visent actuellement à caractériser la cinétique de croissance de petits défauts (voir figure) mais un gros effort doit être accompli pour améliorer les outils théoriques (compte tenu de l'intervention du fluage et des effets d'environnement).

La rupture des aubes est le second

risque majeur d'endommagement du moteur. On distingue les aubes fixes de distributeur à l'entrée de la turbine qui orientent le flux des gaz chauds et les aubes mobiles qui prélèvent une partie de la puissance pour entraîner le compresseur. La fissuration des aubes entraîne une baisse de rendement du moteur et la rupture d'une aube mobile peut provoquer des ruptures en cascade.

Les aubes exposées aux plus hautes températures sont élaborées par fonderie à partir d'alliages qui doivent fondre à très haute température et bien résister à l'oxydation et à la corrosion (même si on leur applique souvent un revêtement protecteur). Les aubes mobiles doivent bien résister au fluage (la force centrifuge peut atteindre 50 000 fois leur poids).

La fissuration par fatigue thermique tend à devenir le facteur limitant la durée de vie de ces pièces. Les aubes sont de plus en plus refroidies par l'intérieur et en surface à l'aide de techniques sophistiquées. Les démarrages, les arrêts et les variations brutales de régime induisent de façon transitoire des diffé-



Propagation par fatigue (à 650 °C) d'une fissure semi-elliptique à partir d'un défaut initial en surface dans un alliage élaboré par métallurgie des poudres. On observe l'évolution de la forme de la fissure grâce aux marques laissées sur la surface de cassure à chaque arrêt du cyclage. Les différences de coloration sont dues à la fine pellicule d'oxyde formée à la surface.

» rences de température entre les différents points de la pièce. Il en résulte des contraintes thermiques dont la direction principale coïncide avec la grande dimension des aubes comme l'effort centrifuge. Le dimensionnement de ces pièces est possible grâce au développement de modèles de comportement visco-plastique complexes (à variables internes) tenant compte des variations de température. La durée de vie à l'amorçage peut être prévue grâce à la mécanique de l'endommagement qui décrit l'interaction de la fatigue et du fluage. Sur le plan expérimental, le développement d'essais de fatigue anisothermes permet de tester les prévisions des modèles de comportement et d'endommagement. À l'aide d'un micro-ordinateur, on cycle simultanément la déformation et la température d'une éprouvette qui simule un élément de volume critique d'une pièce réelle.

Des travaux récents ont montré le rôle essentiel de l'environnement dans la fissuration par fatigue thermique. Une simple exposition dans l'air à haute température, sans effort appliqué, provoque une diffusion de l'oxygène en avant des fissures. Cette diffusion réduit la ténacité locale de l'alliage et peut le fragiliser en entraînant une propagation des fissures catastrophique, lors de sollicitations ultérieures. Des modèles unissant métallurgie et mécanique (fondés sur l'approche locale de la rupture) permettent de prévoir la croissance des fissures sous chargements thermiques et mécaniques combinés, en tenant compte de l'oxydation et de la microstructure des alliages.

Les aubes de turbine des moteurs en développement sont maintenant élaborées par solidification orientée monocristalline (voir l'article suivant). L'intérêt principal de ce procédé, qui recule les limites d'apparition de décohésions en fluage grâce à la suppression des joints de grains, est d'améliorer considérablement la résistance à la fatigue thermique des aubes. Cependant, les propriétés mécaniques de ces alliages sont fortement liées à la direction de sollicitation. Compte tenu de la complexité des chargements de ces aubes, seuls des travaux pluridisciplinaires entre mécaniciens et métallurgistes, comme ceux qui ont été initiés par le GRECO « grandes déformations et endommagement », permettront d'arriver à une prévision satisfaisante des lois de comportement et des durées de vie en service.

Luc Rémy, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de métallurgie mécanique (UA 866-CNRS), Ecole nationale supérieure des mines de Paris, BP 87, 91003 Evry Cedex.

Les aubes monocristallines

De nouveaux alliages et des techniques de fonderie raffinées permettent de réaliser des aubes de turboréacteurs dont le comportement est exceptionnel sous les sollicitations thermiques et mécaniques.

Yves Honnorat

L' évolution des technologies a conduit progressivement à abandonner les techniques de fabrication par matriçage des aubes de turbine en superalliages de nickel, incompatibles avec les exigences croissantes de refroidissement interne et à exploiter la coulée en creux perdue dans ses raffinements successifs. C'est ainsi qu'en trente ans les températures d'entrée de turbine se sont accrues de plus de 600 °C. Une étape décisive a été franchie avec la solidification monocristalline de pièces à parois minces fortement refroidies pour lesquelles une nouvelle génération d'alliages a été développée sous l'égide de la SNECMA et dont l'AMI est l'un des aboutissements les plus achevés.

Ces progrès spectaculaires sont le fruit de deux développements parallèles :

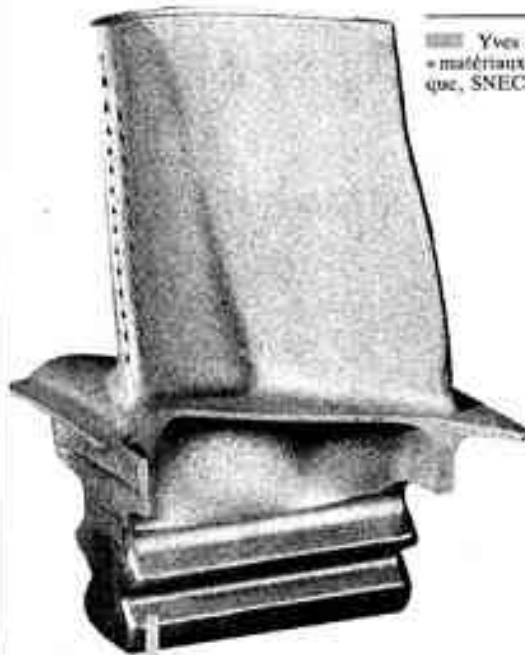
— des techniques de fonderie très avancées, combinant l'utilisation de céramiques adaptées (noyaux et érupces) à

base d'alumine faisant appel aux concepts les plus modernes de cette classe de matériaux, à la mise en œuvre de machines de fusion-solidification hautement automatisées dont la modélisation du fonctionnement a été poussée très avant pour mettre sous contrôle la progression du front de solidification dans des conditions de gradient thermique élevé ;

— l'identification de lois de comportement élasto-visco-plastique dans tout le domaine d'utilisation du matériau qui permettent, sur la base de calculs par éléments finis très raffinés de ces structures complexes, de prédire avec précision la durée de vie des pièces et leur déformation en service.

Ces développements d'aubes monocristallines sont le fruit de plus de dix ans d'efforts de la SNECMA et de ses partenaires industriels et scientifiques. Ils s'appuient largement sur les structures de coopération que sont les GS « superalliages monocristallins » puis « structures et propriétés des superalliages monocristallins » et le GIS « rupture à chaud ».

Yves Honnorat, chef du Département « matériaux et procédés », Direction technique, SNECMA, BP 81, 91003 Evry Cedex.



Aube mobile de turbine HP du moteur militaire SNECMA M.88 : état coulé, après attaque macrographique. (© SNECMA - Evry Corbeil).

Composites dans les secteurs de pointe

Grâce à des progrès constants dans leur conception et leur fabrication, les matériaux composites sont maintenant présents, même dans les structures de première importance pour la sécurité des matériels aériens.

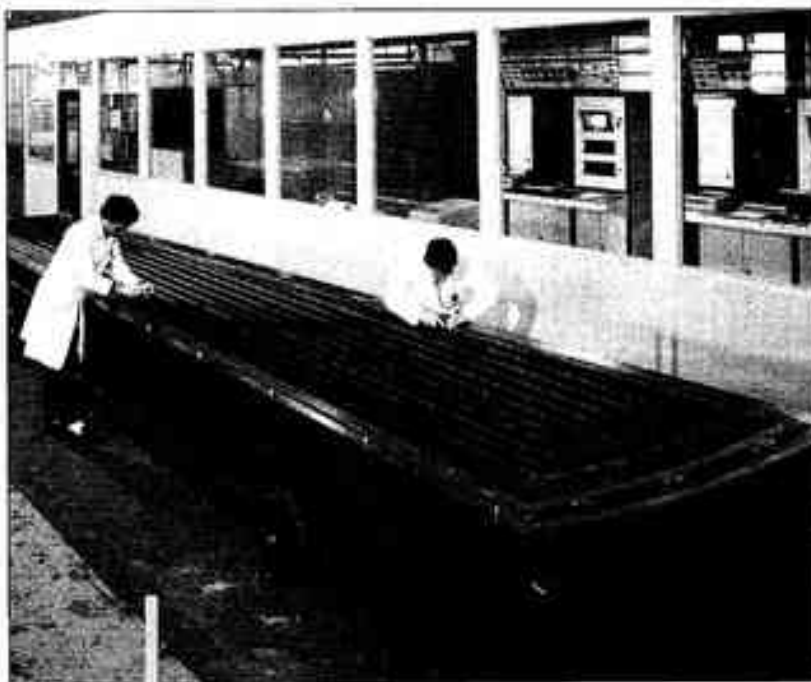
■ Jacques Odorico

Les premières applications des matériaux composites fibre/résine sur avions civils remontent à Concorde. Sur cet avion exceptionnel à bien des égards, des parties mobiles de voilure et des trappes de train ont été réalisées en structure sandwich, utilisant des unidirectionnels fibres de carbone (résine pour les peaux, âme en nid d'abeille métallique - 1970).

Ces premières applications ayant donné toute satisfaction (gain de masse, vieillissement), des structures monolithiques ont ensuite été envisagées sur Airbus (peaux et nervures de raidissage en fibres de carbone/résine) en utilisant toujours des unidirectionnels, plus efficaces quant au gain de masse que les tissus.

À titre expérimental, quelques avions ont été équipés de parties mobiles de voilure de cette conception ; là encore les gains de masse (environ 20 %) et en vieillissement (chute de caractéristiques en compression inférieure à 10 % de l'initiale pour les résines polymérisant à 170 °C) ont permis de passer en série.

Toutes ces structures carbone étaient jusqu'alors exclusivement des structures dites « secondaires ». L'expérience d'emploi de fibres de carbone/résine sur structures « primaires » (de première importance pour la sécurité de l'avion) a été obtenue au travers du programme V.10 F. Mené conjointement par les sociétés avions Marcel Dassault et Aérospatiale, ce programme a permis de réaliser, de certifier et de mettre en service journalier pour transport civil un Falcon 10 équipé d'une voilure totalement composite. À ce jour, après plus de deux ans d'utilisation et 2 000 heures de vol en



ATR 72 : premier panneau de série en carbone. (© Aérospatiale Nantes).

compagnie, les résultats sont excellents.

Sur ce programme, des outils de calcul ont pu être validés ; la philosophie de tolérance aux chocs de faible énergie et les protections à la foudre des structures contenant du carburant ont été élaborées.

Alors, où en sommes-nous maintenant ?

Sur Airbus, l'A 310 présente environ 12 % de sa masse de structure à vide (sans moteurs, ni équipements) en matériaux composites avec, notamment, une dérive (partie verticale de la queue) tout en carbone ; l'A 320, certifié très récemment, en possède environ 20 % de sa masse de structure avec, en plus, des parties déjà traitées sur le type précédent, le PHR (plan horizontal réglable, partie horizontale de la queue).

Sur ATR (avion de transport régional) : l'ATR 42, en service depuis quelques temps, présente environ 10 % de sa masse de structure en matériaux composites ; l'ATR 72, qui effectuera son premier vol à l'automne de cette année, a sa voilure extrême (des moteurs au bout d'aile) en fibres de carbone/résine ; c'est une première mondiale pour un avion civil de série.

Un effort particulier d'industrialisation est actuellement conduit pour implanter en usine des prototypes fonctionnant dans le centre commun de recherche de l'Aérospatiale : logiciel de

détermination des découpes, machine de coupe et machine de dépose automatique, machine de contrôle santé des pièces finies, machine de parachèvement.

Tous ces moyens permettent d'annoncer un prix des structures composites très peu supérieur à celui des mêmes structures en matériaux métalliques.

Et pour le futur proche ? Sur les projets d'avion de cent places de 1995, et sur les convertibles à venir (c'est-à-dire les appareils de transport décollant comme un hélicoptère et volant en croisière comme un avion), une voilure complète tout carbone est envisagée. Par contre, rien sur les fuselages.

Il est clair que les composites ont pris leur place sur les structures, et ce, grâce à leur densité extrêmement faible ; pourtant, tout n'est pas réglé : les produits présentent encore des faiblesses (chocs, notamment), les outils de calcul doivent être améliorés, la standardisation des produits n'est toujours pas amorcée, l'industrialisation doit être poursuivie, mais gageons que les efforts de recherche et développement des universitaires, des constructeurs et des élaborateurs porteront leurs fruits.

■ Jacques Odorico, Centre commun de recherches Louis Blériot, Laboratoire central, Aérospatiale, 12, rue Pasteur, BP 76, 92152 Suresnes Cedex.

Le collage : au-delà de l'empirisme

Le collage, qui a désormais droit de cité dans l'industrie, devrait sortir définitivement d'un certain empirisme. Une meilleure connaissance intrinsèque des adhésifs, surfaces et interfaces y contribuera, et la modélisation permettra de prévoir leur comportement.

Henri Ancenay

De la carte à puce à la voiture, de la seringue hypodermique au soc de charrue... nous sommes environnés d'objets collés performants. Le collage assemble sans affaiblir un très grand nombre de matériaux, en particulier les plastiques techniques, les composites, les céramiques, les tôles minces de métaux et alliages revêtus ou non. Il répond à des besoins actuels : esthétique, étanchéité, tenue à la corrosion, légèreté des structures. Il est souvent d'un coût de mise en œuvre peu élevé en ne nécessitant quasiment pas d'opérations de reprise, de finition.

Une évolution notable de la technologie au cours de ces dix dernières années permet de trouver sur le marché des adhésifs structuraux qui, s'ils n'ont pas encore des caractéristiques mécaniques aussi élevées que celles des produits utilisés en aéronautique, sont

beaucoup plus faciles à mettre en œuvre. Ces produits tenaces, ayant un bon comportement au vieillissement, peuvent durcir en quelques minutes voire en quelques dizaines de secondes avec l'aide ou non de la température, certains peuvent même adhérer sur des surfaces polluées. Dans le cas de fabrications de moyenne ou grande série, on dispose maintenant d'applicateurs fiables délivrant des quantités d'adhésifs avec une très grande précision, quelle que soit la viscosité de ceux-ci. Ces équipements peuvent déposer des cordons de colle continus ou discontinus de diamètres constants. L'opération de collage peut ainsi s'affranchir du facteur humain et gagner en reproductibilité.

Les techniques d'analyse et de caractérisation des surfaces et des interfaces ont permis dans de nombreux cas (exemple : l'aluminium, les aciers pré-revêtus) de mieux appréhender les paramètres physico-chimiques jouant un

rôle dans l'adhérence interfaciale des matériaux et donc de choisir ou d'améliorer les traitements les plus aptes au collage.

Dans les prochaines années, les applications du collage vont connaître un développement encore plus rapide. Les efforts de recherche entrepris dans les différents pays industriels qui se sont déjà traduits par des résultats probants s'intensifient. Le collage devrait sortir définitivement d'un certain empirisme grâce à une meilleure connaissance des propriétés intrinsèques des adhésifs, des surfaces, des interfaces, et à une compréhension accrue du comportement à court et long terme des assemblages collés. Dans un avenir proche, des outils de calcul* devraient permettre aux concepteurs de dimensionner rapidement et économiquement leurs assemblages collés, facilitant ainsi leur emploi dans les produits de la mécanique.

*Exemples en France : les actions des groupements scientifiques « collage » et « calcul des assemblages collés » initiées et subventionnées pour l'une, par le ministère de la Recherche et pour l'autre, par la Direction des recherches études et techniques (DRET) - Ministère de la Défense.

Henri Ancenay, responsable du Secteur « lubrifiants chimie collage », Centre technique des industries mécaniques, 10, rue Barradin, 42029 Saint-Etienne Cedex 1.

Le bois, objectif qualité

Confronté à la concurrence d'autres matériaux, le bois fait l'objet d'une recherche de base visant à améliorer la qualité de la production forestière comme celle de la transformation industrielle.

Pierre Morlier

Mélange structuré de polymères naturels (cellulose, hémicellulose et lignine), le matériau bois est anisotrope, hétérogène et variable ; son comportement mécanique, viscoélastique, est fortement affecté par les variations de température et d'hygrométrie ; à ce titre, il pose des problèmes de caractérisation et de modélisation tout à fait originaux en science des matériaux.

Le bois, matériau anisotrope : dans les recherches entreprises dans les formations du Groupement scientifique rhéologie du bois*, la plus grande attention est portée à l'anisotropie de structure et de comportement du bois ;

en particulier en matière de rupture, on imagine l'effort expérimental qui doit être accompli pour mener à bien de telles investigations.

Le bois, matériau hétérogène : le problème est posé à différentes échelles ; c'est, par exemple, à l'échelle de la paroi cellulaire qu'un paramètre prépondérant pour l'élasticité du matériau doit être évalué par des mesures de type cristallographique, l'angle des microfibrilles ; c'est à l'échelle des cerne et de l'alternance bois de printemps - bois d'été que se situe l'interprétation de certains résultats sur la propagation de fissures et sur la migration de l'eau dans ce matériau ; c'est aux dimensions, dites structurales, des pièces de bois pour la construction que des singu-

larités plus évidentes (nœuds, pente du fil) ont une influence essentielle sur la résistance et la déformabilité. L'existence de ces différentes échelles emboîtées fait émerger un certain nombre de questions concernant la représentativité des essais de laboratoire et explique, en partie, l'extrême variabilité de ce matériau. On ne peut manquer, en effet, lorsqu'on a pratiqué d'autres matériaux, d'être frappé par la dispersion des propriétés les plus élémentaires, comme la densité du matériau bois à l'intérieur d'un arbre, d'un peuplement, d'une essence.

Procédés industriels

Au niveau de l'ingénierie et de la conception de structures bois, l'hétérogénéité de ce matériau amène à privilégier des approches probabilistes ; on peut signaler que c'est le seul matériau

*Quatre partenaires : le Centre national de la recherche scientifique, l'Institut national de recherche agronomique, le Centre technique du bois et de l'ameublement et le Centre technique forestier tropical.

de construction pour lequel les règlements proposent un coefficient d'effet d'échelle significatif. Pour la transformation, les industriels développent, par ailleurs, des techniques dont l'objet est d'homogénéiser le matériau, sous forme de bois reconstitué: contreplaqué, aggloméré, panneau de fibres, papier et carton.

Le déroulage, moyen prépondérant pour valoriser les produits de la forêt française, nécessite des études allant de l'analyse structurale du matériau (microdensitométrie, anatomie quantitative) à la conception de machines-outils plus performantes, en passant par l'analyse physicomécanique approfondie du processus de coupe lui-même: processus rapide, sur du bois vert, matériau inélastique pour les sollicitations du déroulage, cisaillement devant l'arête et compression sous la barre de pression.

Pour le bois dans la construction, il faut estimer l'effet du temps (sur une échelle de quelques décennies) sur la résistance et la déformation des structures, sans mobiliser trop longtemps de gros investissements expérimentaux, par exemple en utilisant l'analogie temps-température; la fluctuation des conditions hygrométriques autour de la structure pose encore de façon nette

le besoin de maîtriser l'effet mécanosorptif.

Citons enfin les recherches sur les contraintes internes. La plupart des arbres à croissance rapide sont le siège de contraintes, sur pied; leur mesure, leur estimation théorique, leur évolution lors des différentes étapes liées à la mobilisation et à la transformation des produits forestiers sont un ensemble de connaissances dont les retombées économiques sont certaines. Par ailleurs, on sait que des contraintes dues au séchage sont à l'origine de pertes de matières non négligeables: leur prévision, leur diminution par des conduites appropriées de séchage ouvrent le champ à des recherches très fondamentales sur les transferts de masse et leur couplage avec les déformations viscoélastiques; à nouveau, il est clair que l'échelle d'observation est importante et que certains phénomènes locaux sont prépondérants.

■ Pierre Morlier, professeur à l'université de Bordeaux I, directeur du Groupement scientifique «rhéologie du bois», Laboratoire de génie civil, université de Bordeaux, Institut universitaire de technologie «A», 33405 Talence Cedex; Laboratoire de mécanique physique (UA 867 CNRS), université de Bordeaux I.

Les céramiques et l'art du compromis

Le développement des céramiques vers des emplois nouveaux est limité par leur fragilité. On cherche donc à introduire des mécanismes, dans les céramiques de seconde génération, ayant pour résultat une résistance s'accroissant lorsque la fissure progresse.

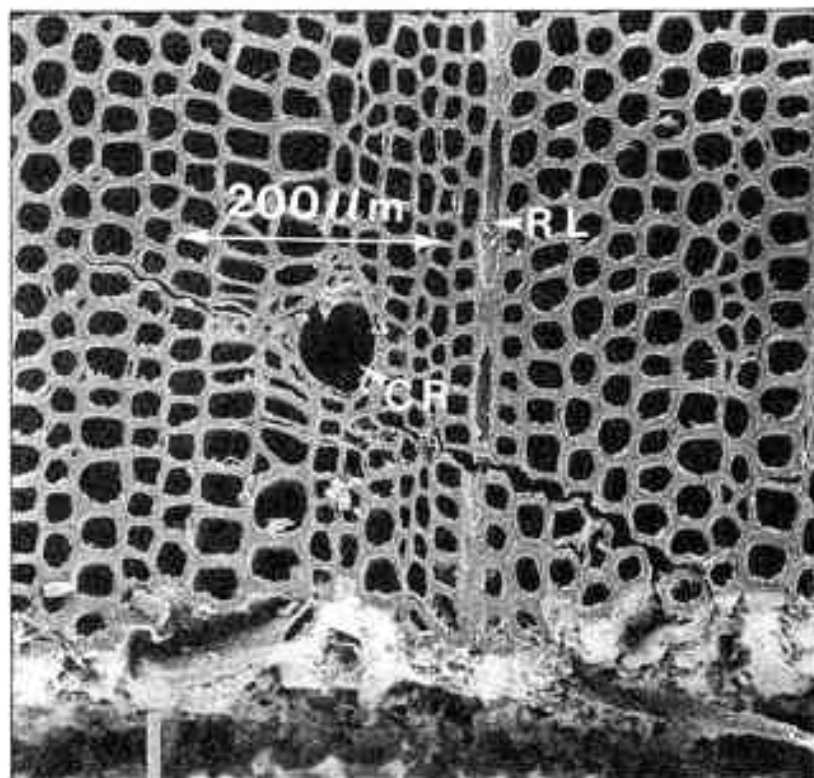
■ Philippe Boch

Les liaisons atomiques des céramiques ne permettent pas la ductilité: le comportement est fragile jusqu'à des températures élevées. La fragilité est un obstacle au développement des céramiques vers des emplois nouveaux; en particulier pour les pièces de machines thermiques, qui bénéficieraient de la résistance aux hautes températures des céramiques «thermomécaniques». Les recherches sont donc focalisées sur l'amélioration des caractéristiques mécaniques.

Les premières céramiques thermomécaniques étaient des matériaux sensiblement monophases (nitrure et carbure de silicium). L'approximation linéaire de la mécanique de la rupture s'applique à ces produits: la charge à la rupture (σ_F) est proportionnelle à la «ténacité» (K_{IC}) et inversement proportionnelle à la racine carrée de la longueur de fissure (a_c):

$$\sigma_F = K_{IC} / \sqrt{a_c} \quad (1)$$

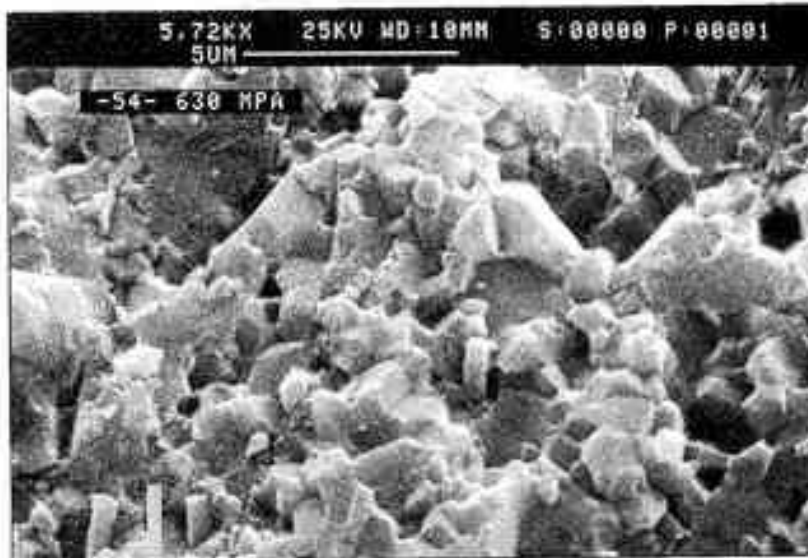
où K_{IC} est indépendante de a_c . Accroître σ_F signifie choisir des composés à forte énergie de rupture - ce qui augmente K_{IC} - et mettre en œuvre des technologies améliorées - ce qui diminue a_c . Elever σ_F est important. Mais les matériaux régis par l'expression (1) conservent l'inconvénient de ne tolérer aucun dépassement du seuil critique: toute croissance des microfissures au-delà de a_c est catastrophique. Les céramiques de seconde génération cherchent à introduire des mécanismes dissipatifs, pour que la résistance à la progression d'une fissure augmente quand la fissure progresse. Les métaux savent exploiter ces effets; mais la différence est que les céramiques ne bénéficient pas de nombreuses dislocations mobiles. Il faut



Aperçu de l'état de surface de la face inférieure d'un placage de pin de Douglas, cheminement d'une fissure. CR = canal résinifère, RL = rayon ligneux. (© M. Thibaut, UA 1214 CNRS - Montpellier).

► faire appel à des mécanismes d'interfaces, associés à des phases dispersées (précipités et fibres) : c'est la logique des composites. L'augmentation de ténacité est liée à des bifurcations de la fissure, à des microfragmentations du matériau, à des déchaussements de fibres, voire au gonflement de précipités dû à des transformations de phases. K_{IC} devient sensible à la microstructure, aux contraintes résiduelles, et à la « solidité » des interfaces.

L'expression (1) n'est plus valide. Il sera nécessaire de choisir entre augmenter la ténacité ou augmenter la charge à la rupture. Un exemple est celui des alliages de zircons (ZrO_2 + un autre oxyde), où le renforcement vient du gonflement des précipités qui basculent d'un état structural à un autre. A renforcement croissant, σ_f culmine avant K_{IC} : pour les basses valeurs de K_{IC} , σ_f est contrôlée par la longueur de α_2 ; pour les fortes valeurs de K_{IC} , σ_f est contrôlée par le déclenchement de la transformation de phase. Les zircons-yttrium ont ainsi des charges à la rupture qui dépassent 2 000 mégapascal, mais des ténacités moitié de celles de zircons-magnésium, dont les valeurs de σ_f n'excèdent pas 1 000 MPa. Lames de couteaux dans le premiers cas, outils de mines dans le second. La température est un paramètre encore plus important qu'il ne l'était pour les matériaux de première génération, du fait d'une sen-



L'introduction d'une faible quantité de « whiskers » de carbure de silicium dans l'alumine permet de renforcer notablement la ténacité et la résistance à la fatigue statique de ce matériau. La figure montre des fragments de fibres extraites (en A) et les cavités laissées par l'extraction des fibres (en B). (© Desmarquest-Pechiney).

sibilité différente de la matrice, des renforts et des interfaces. Les meilleures performances à température ambiante n'impliquent pas les meilleures caractéristiques à chaud. Une avancée est attendue de l'addition de fibres très courtes (« whiskers ») de carbure de silicium. Mais la science des matériaux

se confirme être l'art du compromis : c'est pas à pas qu'il faut progresser !

Philippe Boch, professeur, Laboratoire de céramiques nouvelles (UA 320 CNRS), Ecole nationale supérieure de céramique industrielle, 47, avenue Albert Thomas, 67060 Limoges Cedex.

Géomatériaux pour grands ouvrages

La complexité des propriétés mécaniques des matériaux utilisés dans les grands ouvrages d'art exige l'emploi de méthodes numériques très élaborées, mobilisant de gros ordinateurs.

Félix Darve

Les traces matérielles que laissent à l'histoire les grandes civilisations sont souvent constituées d'ouvrages de génie civil défiant le temps. Buildings américains, îles artifi-

cielles japonaises et, plus près de nous, arche de la Défense ou tunnel sous la Manche, caractériseront pour les siècles à venir nos capacités de bâtisseurs. Non seulement les géomatériaux (c'est-à-dire les sols, les bétons et les roches) subissent actuellement une profonde mutation, mais surtout les méthodes de conception et de calcul des ouvrages ont été entièrement bouleversées.

Les géomatériaux regroupant les matériaux du génie civil, sauf les métaux, ont en commun des propriétés mécaniques particulièrement complexes. La plus grande partie des déformations de ces matériaux ne sont pas annulées lorsqu'on enlève la charge appliquée : la théorie de l'élasticité ne s'applique donc que fort mal à la description de leur comportement mécanique. Les variations de volume peuvent être également importantes lorsqu'on les déforme : ayant creusé un trou dans le sable d'une plage, il faudrait exercer de très importants efforts de tassements pour remettre dans la cavité l'ensemble du volume de sable excavé.

La rupture des géomatériaux se produit le plus souvent par localisation des déformations le long d'une ou plusieurs bandes de cisaillement, ce phénomène brutal explique les glissements de terrain qui peuvent être ainsi de nature catastrophique. Enfin, les géomatériaux sont généralement polyphasiques, c'est-à-dire composés de phases de natures différentes (solide, fluide et gaz) et la quantité d'eau présente influence de manière déterminante le comportement de l'ensemble : sur la plage, des châteaux de sable pourront être construits sur les quelques mètres de sable humide – et non sur la dune sèche ni sous l'eau – du fait de la cohésion fournie au sable par les forces de tension superficielle activées sur les nombreuses surfaces de séparation eau-air au sein du sable non saturé. C'est, par contre, la saturation du sable qui produit le phénomène spectaculaire de sa liquéfaction sous des chargements cycliques appliqués, que ces sollicitations répétées soient dues à un tremblement de terre ou... à la personne égarée sur des sables mouvants.



La loi de comportement qui devra décrire ces propriétés mécaniques du géomatériau sera nécessairement complexe : elle ne pourra pas être uniquement élastique, ni parfaitement plastique, ni même élasto-plastique dans le sens classique du terme. En effet, si pour beaucoup de matériaux on peut associer un tenseur de comportement élastique aux décharges et un autre tenseur élasto-plastique aux charges, pour les géomatériaux le passage de la charge à la décharge se fait de manière graduée et progressive. On aboutit ainsi à la classe des lois de comportement que nous avons qualifiées « d'incrémentalement non-linéaires », parce que la relation tensorielle entre la contrainte incrémentale et la déformation incrémentale est totalement non-linéaire (et non plus seulement bi-linéaire comme en élasto-plasticité classique).

Ces lois, complexes pour être réalistes, ne peuvent plus être utilisées dans un calcul analytique des ouvrages. Elles nécessitent l'emploi de méthodes numériques appropriées (telle la méthode des éléments finis) et l'utilisation de gros ordinateurs, parfois les plus gros existant actuellement.

Aujourd'hui, tous les grands ouvrages (ouvrages d'art, barrages, centrales nucléaires, plates-formes offshore, ...) sont calculés par cette méthode qui permet, par des études paramétriques rendues ainsi aisées, une aide à la conception devenue irremplaçable, la méthode fournissant les champs de contraintes et de déformations en tout point de l'ouvrage moyennant l'introduction d'une loi de comportement réaliste et bien calibrée.

L'apparition de la nouvelle génération d'ordinateurs parallèles permettra d'aborder le calcul d'ouvrages sous sollicitations extrêmes telles que séismes, vents, tempêtes, explosions, etc.

■ Félix Darve, professeur à l'Institut national polytechnique de Grenoble, responsable du Groupement de recherches coordonnées Rhéologie des géomatériaux (GRECO 90) CNRS, Institut de mécanique de Grenoble, Domaine universitaire, BP 95, 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex.

Barrage en terre et enrochements de Grand Maison (170 mètres de hauteur, 140 millions de m³ de volume de retenue) calculé par la méthode des éléments finis. (© EDF-SODEL photo M. Urigaud).

Des bétons sur mesure

On a compris récemment le rôle joué par certains additifs sur la structure et le comportement mécanique du béton. On accède ainsi à une véritable ingénierie de ce matériau.

■ **Paul Acker**

Matériau de construction par excellence, le béton s'obtient avec les matières les plus courantes : en cuisant sable et argile, on obtient du ciment ; en y ajoutant des cailloux et de l'eau, on fait du béton. Il est donc à la fois très bon marché et très souple d'emploi. Aujourd'hui on peut aussi, pour un coût modéré, faire varier certaines de ses caractéristiques dans des proportions spectaculaires.

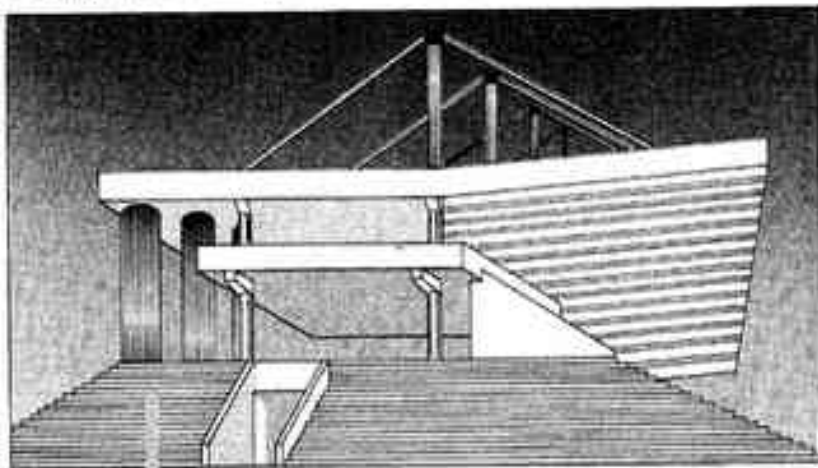
Depuis longtemps on sait qu'en ajoutant au béton quelque ingrédient – minéral ou organique, fibre, poudre ou liquide – on peut largement augmenter certaines de ses propriétés physiques ou mécaniques. Mais le surcoût, soit de l'additif, soit de sa mise en œuvre, en limitait jusqu'à présent les applications. Des progrès récents dans la compréhension du rôle joué par ces additifs au niveau de sa structure et de son comportement mécanique permettent maintenant de les mieux choisir (par exemple parmi les sous-produits de l'industrie) et de les utiliser de manière optimale, ce qui nécessite de revoir toute la composition du mélange. Citons, notamment, le développement d'un modèle linéaire de compacité des

mélanges granulaires qui débouchera bientôt sur une méthode de composition globale associant l'optimum de maniabilité du béton frais à l'optimum de résistance du béton durci : avec un peu de fumée de silice, par exemple, on peut tripler la résistance à la compression. Citons encore l'analyse du comportement à la rupture et du

processus de localisation des fissures qui l'accompagne : on peut ainsi prévoir pour quel type de sollicitation les fibres métalliques contribuent effectivement à la résistance de la structure.

Pouvoir ainsi, pour un usage donné, dire à la fois le type de béton qu'il faut choisir et la manière de l'obtenir, c'est accéder à une véritable ingénierie du matériau.

■ **Paul Acker**, membre du conseil scientifique du Groupement de recherches coordonnées Rhéologie des géomatériaux (GRECO 90 CNRS), chef de la division Matériaux et structures pour ouvrages d'art au Laboratoire central des ponts et chaussées, 58, boulevard Lefebvre, 75732 Paris Cedex 13.



Il y a dix ans, cette structure aurait probablement été construite en acier. Les caractéristiques améliorées du béton à hautes performances, associées aux propriétés classiques du béton (durabilité, facilité d'entretien) permettent ici une réalisation légère, architecturale.



Construction d'un ouvrage en terre armée.

La terre armée

En truffant la terre d'éléments appropriés, on la rapproche des matériaux composites industriels. Aujourd'hui, les mécaniciens des sols élaborent des modèles qui permettront, demain, le calcul et le dimensionnement d'ouvrages ou de structures en sols renforcés.

■ **Patrick de Buhan**

Bien que le principe en soit connu depuis fort longtemps, l'utilisation à grande échelle, dans la construction géotechnique, des techni-

gues de renforcement des sols ne date que des années soixante avec l'invention de la « terre armée ». Depuis, ces techniques n'ont cessé de se développer et de se diversifier, constituant aujourd'hui une branche à part entière de la mécanique des sols, à la fois lieu d'innovation technologique permanente et champ d'investigation privilégié pour de nombreuses recherches théoriques et expérimentales.

Au-delà de cette diversité apparente, les procédés de renforcement des sols par inclusions se caractérisent par l'introduction dans le sol naturel d'éléments de structures (armatures ou clous métalliques, nappes géotextiles,

colonnes ou micropieux) destinés à améliorer le comportement mécanique d'ensemble d'un ouvrage, et notamment à accroître ses capacités de résistance en vue d'en assurer la tenue sous l'action de sollicitations auxquelles il est soumis. La mécanique des sols renforcés vise donc à prendre en compte le caractère fortement composite de ces matériaux afin d'en mieux comprendre les mécanismes de comportement à l'échelle locale, et d'en analyser les conséquences sur la stabilité des ouvrages. C'est dans ce contexte qu'a été développée entre autres, ces dernières années, une approche originale consistant à modéliser ces matériaux comme

des milieux homogènes à l'échelle macroscopique mais auxquels l'existence d'orientations privilégiées confère une anisotropie évidente. Des rapprochements tout à fait intéressants avec les matériaux composites de l'industrie sont actuellement tentés dans le cadre d'une telle théorie de l'homogénéisation. Dans les deux cas, l'objectif est de parvenir à l'élaboration de méthodes de calcul et de dimensionnement d'ouvrages ou de structures.

Patrick de Buhan, chef du département « sciences mécaniques » à l'École nationale des ponts et chaussées, Laboratoire de mécanique des solides (UA 317 CNRS), Ecole polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex.

Iceberg contre plate-forme offshore

Exploiter le gaz ou le pétrole du sous-sol arctique, c'est s'exposer à de mauvaises rencontres. Or on ignore encore beaucoup de choses sur les interactions glace-navire ou glace-plate-forme.

Paul Duval

Les ressources énergétiques et minérales de l'Arctique sont importantes : on estime que cinquante pour cent des réserves mondiales de gaz sont contenues dans des gisements situés au nord du cercle polaire. Leur exploitation constitue un enjeu important pour les entreprises industrielles françaises de la construction navale et de plates-formes offshore.

Or la glace de mer et les icebergs constituent des dangers encore mal appréciés par les constructeurs. Ainsi, en avril 1986, une plate-forme de forage installée à 70 km de la côte canadienne en mer de Beaufort a dû être évacuée à la suite de chocs successifs exercés par une plaque de glace de taille moyenne (2 km x 1 km). Les vibrations étaient suffisamment sévères pour induire une fatigue excessive du caisson et entraîner la perte de stabilité de la plate-forme. Cet événement est tout à fait symptomatique du manque de données dont disposent les constructeurs sur les interactions glace-structure.

C'est dans ce contexte que le Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement de Grenoble a mis en place un programme de recherche sur la modélisation des interactions

glace-structure. Une telle modélisation nécessite l'établissement d'un modèle d'endommagement pour décrire la formation de glace broyée et la formation d'une loi de comportement décrivant, en régime stationnaire, la pénétration d'une structure dans un massif de glace. Les études expérimentales indispensables sont menées aussi bien en laboratoire que sur le terrain (banquise arctique et Terre Adélie).

Paul Duval, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de glaciologie et de géophysique de l'environnement (LP 5151 du CNRS), BP 96, 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex.



Sous l'effet des courants océaniques et du vent, la banquise se brise : les plaques de glace se chevauchent pour former ces amas de glace pouvant atteindre plus de 10 m d'épaisseur. Ces « crêtes de pression » (pressure ridges) sont des barrières souvent infranchissables pour les bateaux brise-glace.

Les petits-enfants d'Eiffel

L'approche de la géométrie des structures et du comportement des matériaux a été bouleversée par la simulation numérique. Ses limites ne sont pas tant la capacité des ordinateurs que l'étendue des compétences exigées des nouveaux mécaniciens.



— Denis Aubry,
Philippe Destuynder

La mécanique des structures a réellement démarré avec la construction de la fameuse Tour Eiffel dont le centenaire coïncide précisément avec l'année de la mécanique en France. Bien que moins connus du grand public, le viaduc de Garabit ou le toit flottant de l'observatoire de Nice ont également consacré l'utilisation de l'acier dans les réalisations de l'ingénieur mécanicien. A la fin du siècle dernier, la mécanique était considérée comme une partie des mathématiques et, si les travaux de Lagrange puis de Navier avaient permis de formuler de façon satisfaisante les grands principes de la mécanique classique, son utilisation par des ingénieurs pour réaliser des ouvrages n'avait pas encore de concrétisation.

C'est peut-être aux talents d'ingénieur, mais aussi d'entrepreneur, de Gustave Eiffel que l'on doit ce transfert de technologie. En fait on est surpris d'apprendre que les considérations techniques d'Eiffel reposent davantage sur son sens de la mécanique que sur des calculs précis. Pourtant Castigliano avait présenté, dès 1875, une contribution très importante pour l'avenir des structures en proposant une méthode de détermination des efforts dans un treillis de poutres hyperstatique. Malheureusement, peu de structures se prêtaient à une résolution effective et la complexité des calculs auxquels conduisait la méthode de Castigliano en limitait considérablement l'application.

Plus récemment, une équipe d'une dizaine d'ingénieurs travaillant pen-

Sunshine skyway, Florida, Etats-Unis
(© Figg and Muller Inc.).

dant une année fut nécessaire pour calculer le fuselage arrière de l'Alouette 2. Différents algorithmes furent mis au point mais ceux-ci prirent toute leur efficacité avec le développement des ordinateurs. C'est ainsi qu'aujourd'hui, un étudiant en première année d'école d'ingénieur peut résoudre, en quelques minutes sur un ordinateur personnel, des problèmes analogues à ceux de l'Alouette 2. Ces structures en treillis encore largement utilisées, ne serait-ce que comme structure de renfort ou ossature en génie civil, ont fait l'objet de nombreuses recherches. Electricité de France, grand consommateur de pylônes ainsi conçus pour le transport de l'électricité à haute tension, a cherché à optimiser la masse d'acier nécessaire à leur fabrication. Quelques kilogrammes gagnés sur un pylône représentent, à l'échelle du réseau français, une économie considérable !

L'apogée de la résistance des matériaux

Cependant, la mécanique des structures a pris sa véritable dimension avec la compréhension et l'utilisation des modèles de plaques de coques et de poutres dans le dimensionnement des objets mécaniques ainsi qu'avec la prise en compte de lois de comportement réalistes. Limitée à l'élasticité jusque vers les années 50, la simulation de phénomènes de comportements non linéaires comme la plasticité, le fluage ou l'endommagement, s'est progressivement développée, donnant naissance à la mécanique des matériaux. Les premiers résultats utilisables par les ingénieurs furent recensés dans des manuels qui ont constitué les livres de chevet de bon nombre de mécaniciens. Ce fut l'apogée de la résistance des matériaux (R.d.M) dont Timoshenko fut le porte-parole.

Mais cette première évolution de la mécanique des structures n'était qu'un préliminaire à la véritable révolution qu'apporta l'apparition des calculateurs électroniques. La complexité et la multiplicité des phénomènes physiques nécessaires à un dimensionnement efficace ont très rapidement nécessité une présentation unitaire et cohérente de la mécanique moderne. C'est sans doute grâce aux travaux de l'Ecole américaine que cette « mise en ordre » a pu être obtenue. On retiendra des noms illustres comme celui de Truesdell qui a systématisé l'utilisation de la thermodynamique dans les milieux continus. Il faut aussi souligner les travaux de Hill, ceux de Prager et de Drücker qui ont proposé une approche rationnelle de la plasticité.



La Tour Eiffel au cours de sa construction (© SNT-Éclair, photo Chevaillon).

Grâce d'une part, à cette théorie unitaire de la mécanique et d'autre part, aux progrès considérables qu'avait connus l'analyse numérique matricielle, des logiciels généraux de calcul des structures apparurent basés sur l'emploi de la célèbre méthode des éléments finis. Il est difficile d'en trouver l'origine (il est souvent fait référence aux travaux de Clough et Tocher). Les travaux du professeur Argyris de l'université de Stuttgart et ceux du professeur Zienkiewicz de l'université de Swansea font en tout cas autorité. Aujourd'hui on recense aisément une centaine de logiciels (appelés code de calcul des structures) permettant de traiter les problèmes les plus divers pour des géométries de structures et des comportements de matériaux très généraux (prise en compte de la thermique, de la viscosité, de la plasticité et d'effets dynamiques).

Les succès de la simulation numérique

Les phénomènes qui peuvent être représentés sont très variés : ils vont du simple comportement élastique aux processus de perforation avec ablation (impact de missiles) en passant par les problèmes de stabilité statique ou dynamique. De plus en plus, les codes de calcul sont multiphasiques et permettent de traiter des problèmes couplés où interviennent, par exemple, un fluide ou un gaz et une structure. C'est ainsi qu'une compréhension de l'effet POGO dans les réservoirs de fusées a pu être maîtrisée (mise en résonance du carburant et du réservoir sous l'effet des vibrations induites par les moteurs). Les codes de calcul modernes permettent aussi de simuler les écoulements gazeux ou fluides, par exemple, autour des coques de navires, ce qui

► permet de définir les chargements appliqués aux structures étudiées (écoulements aérodynamiques autour d'un avion, d'une voiture ou d'un train à grande vitesse).

L'époque de la simulation numéri-

que qui connaît un essor sans précédent dans les sciences de l'ingénieur et en particulier en mécanique des structures se heurte à deux barrières. L'une est technologique mais recule régulièrement de par les progrès de l'électro-

nique et les nouvelles architectures informatiques : c'est la puissance des calculateurs arithmétiques. L'autre, aujourd'hui encore mal analysée, est liée à la formation des ingénieurs et scientifiques qui doivent, grâce à des simulations complexes, prendre des décisions sur la conception et la réalisation des pièces et des projets étudiés. Le volume des résultats de calcul fournis par un ordinateur ou une expérimentation nécessite d'une part l'utilisation d'outils graphiques performants permettant d'évaluer très rapidement les phénomènes en présence et, d'autre part, de porter un jugement tant sur le bien-fondé (ou non) de la modélisation physique que sur la validité des algorithmes de résolution utilisés.

L'intelligence artificielle indispensable

Cette faculté d'évaluation requiert une quadruple compétence qui constituera le profil de l'ingénieur mécanicien de demain : une compétence en mécanique des matériaux pour le choix des lois de comportement ; une compétence mécanique et géométrique pour la représentation des différents éléments de structure ; une compétence en informatique pour maîtriser le bon déroulement des calculs ; une compétence mathématique notamment en analyse fonctionnelle et numérique pour juger a priori la nature des solutions recherchées et deviner les bons schémas numériques de résolution.

La conception assistée par ordinateur en mécanique repose sur l'interaction de ces disciplines mais la vitesse d'évolution des connaissances ne permettra pas de former des scientifiques ayant la possibilité de décider seuls des choix offerts par les modèles.

Dans l'avenir il sera nécessaire d'avoir recours à des bases de connaissances de référence qui s'enrichiront au fur et à mesure des expériences. Leur consultation par l'homme devenant trop fastidieuse, l'intelligence artificielle sera un passage obligatoire. C'est la rencontre de deux grands courants de l'informatique scientifique, le calcul arithmétique et le raisonnement simulé sur ordinateur.



La Tour hertzienne de Romainville (© MEL/G. Grossier).

■ Denis Aubey, professeur à l'École centrale des arts et manufactures, Laboratoire de mécanique des sols et structures (UA 850 CNRS).

■ Philippe Dextuynder, professeur à l'École centrale des arts et manufactures, Laboratoire de mécanique des sols et structures (UA 850 CNRS), Ecole centrale, Grande voie des vignes, 92290 Châtouay-Malakoff.

Ponts, barrages et plates-formes

Les matériaux ont évolué, la géométrie des ouvrages s'est modifiée, les efforts appliqués se sont faits plus sévères : le génie civil voit croître ses besoins de recherche en mécanique des structures.

■ Bernard Halphen

Les diverses structures du génie civil, barrages, plates-formes en mer, murs de soutènement, gros-œuvre du bâtiment, ont pour objet principal de supporter des charges sans ruptures ni déformations excessives. Aussi la mécanique est-elle omniprésente et prépondérante dans leur conception, et les évolutions du génie civil sont en partie liées aux progrès de cette science.

Un peu d'histoire

L'exemple des ponts va nous montrer comment, en parallèle avec la maîtrise de nouveaux matériaux et de nouvelles technologies, la mécanique a contribué à l'évolution des structures.

Jusqu'à la fin du XVIII^e siècle, les projets de ponts en maçonnerie ne pouvaient s'appuyer que sur les expériences heureuses ou malheureuses antérieures. Ensuite, les méthodes d'analyse mécanique de la stabilité des voûtes, telles que celles établies en 1823 par Lamé et Clapeyron, ont permis d'augmenter la portée de ce type d'ouvrage et d'optimiser la forme des arches.

Si l'apparition de ponts métalliques dans le premier tiers du XIX^e siècle est liée à la naissance de l'industrie sidérurgique, la construction dès cette époque de ponts à poutres droites triangulées n'a été possible que parce qu'on savait calculer les efforts de flexion induits dans une poutre horizontale par l'application d'un effort vertical.

L'apparition des produits sidérurgiques plats et du béton a conduit depuis le début de ce siècle à une grande diversité dans la géométrie des ouvrages. Les données technologiques et économiques, mais aussi le recours constant à l'analyse mécanique, permettent aujourd'hui d'optimiser la conception des ponts au vu de la brèche à franchir.

Des usages actuels de la mécanique

La géométrie particulière des ponts permet de leur appliquer ce qu'il est convenu d'appeler la résistance des matériaux, c'est-à-dire la mécanique

des solides ayant une dimension prépondérante. Cependant, les méthodes ainsi introduites ne prennent pas en compte l'effet local d'un chargement. Comme un grand nombre de ponts, métalliques ou en béton précontraint, ont une section creuse, faite d'éléments de faible épaisseur, l'analyse de ces éléments sous charge locale fait appel à la théorie des plaques en ce qui concerne leur flexion et à la mécanique des solides tridimensionnels pour leur poinçonnement. Ces charges locales sont dues au trafic ou aux ancrages des câbles dans le cas des ponts en béton précontraint ou des ponts à haubans.

Par ailleurs, la résistance des matériaux classique suppose que la section d'une poutre est homogène. Or, il existe maintenant différentes formes d'ouvrages mixtes où cohabitent le béton et l'acier. L'analyse mécanique permet de déterminer les efforts induits à la liaison entre les matériaux et

de se prémunir contre leur désolidarisation.

Développements pour l'avenir

Les besoins de recherches en mécanique des structures du génie civil concernent souvent la mise au point d'une méthode de calcul adaptée à des actions extérieures particulières.

Par exemple, les projets de construction au voisinage des pôles impliquent de savoir représenter et prendre en compte les efforts exercés sur les structures immergées par la banquise, les chocs de la glace, l'érosion des matériaux due à la circulation d'eau chargée de glace.

Les problèmes d'interaction fluide-structure constituent également une préoccupation pour l'avenir. Ainsi l'étude du comportement au vent d'ouvrages souples, tels que les ponts à haubans, s'effectue actuellement sur modèles réduits en soufflerie. Il est certain que quelques progrès théoriques dans ce domaine seraient d'un grand secours pour le projecteur.

■ Bernard Halphen, chef du service de mécanique, Laboratoire central des ponts et chaussées, directeur-adjoint de la Jeune équipe CNRS « Laboratoire de modélisation des matériaux et des structures du génie civil », La Courrière, 93167 Noisy-le-Grand Cedex.



Carriçon en béton : île artificielle pour forage pétrolier en mer de Beaufort (Cliché Canadian Petroleum Association).

La mécanique des vibrations et les lanceurs de satellites

Les vibrations, ennemies des lanceurs de satellites, ont posé des problèmes complexes qu'une longue confrontation à des essais et des modèles théoriques a permis de résoudre.

— Henri J.-P. Morand

Avertissement : aucune ressemblance de ce texte avec la réalité n'est fortuite...

Transporter dans l'espace...

« Vous souhaitez proposer à vos clients un nouveau service de localisation et de télécommunication par satellite... Vous envisagez de créer une nouvelle chaîne de télévision par satellite... Vous désirez renouveler votre système d'observation de la terre...

Alors, cette annonce vous intéresse : nous vous proposons des lancements à tarif réduit sur orbite de transfert : périégée 200 kilomètres, apogée 36 000 kilomètres, avec des remises importantes pour des lancements groupés de deux ou plus de deux satellites : départ chaque mois à partir de la base de Kourou, réservation un an environ avant le vol ; se présenter avec la charge utile deux mois avant la date de lancement muni du dossier de qualification... Pour de plus amples informations n'hésitez pas à demander le manuel d'utilisation de nos lanceurs opérationnels à notre service commercial. Nous vous signalons que notre service production est prêt à étudier toute demande de transport personnalisée compatible avec la capacité d'emport de nos lanceurs et le cas échéant, à envisager avec vous les développements spécifiques qui permettront de répondre à vos besoins présents et futurs »...

Cela n'est plus de la fiction : nous sommes déjà entrés dans l'ère du transport spatial depuis la création, en 1980, de la société Arianespace, qui produit, commercialise et lance Ariane. Dans la prochaine décennie, d'autres sociétés internationales — américaines, japonaises, chinoises, ou russes — proposeront peut-être leurs services de transport spatial.

Prévoir les vibrations...

Pour mettre au point un lanceur de satellites compétitif, il faut maîtriser les charges mécaniques auxquelles ses

structures risquent d'être soumises en vol.

On pense immédiatement aux charges dues à l'accélération du lanceur pendant la phase propulsée, mais ce ne sont pas les seules. A ce facteur de charge « incontournable », viennent s'ajouter les charges vibratoires provoquées par la traversée des turbulences atmosphériques, les régimes transitoires de poussée des moteurs, etc.

En plus de ces réponses vibratoires « normales » peuvent apparaître en vol des oscillations divergentes très dangereuses...

Où puisent-elles leur énergie ?

La propulsion est la première cause suspectée. La puissance qu'elle met en jeu est en effet énorme, comparable à celle qui est délivrée par une centrale nucléaire ; on conçoit aisément, dans ces conditions, qu'une fraction infime de cette énergie, transformée en énergie vibratoire, suffise pour mettre en péril l'intégrité de la fusée. C'est ce qui se produit au cours du phénomène « POGO » dont la signature est caractéristique : chaque point du lanceur se met à osciller, de haut en bas, à une fréquence précise, avec une amplitude qui peut croître rapidement (ce phénomène tire son nom d'une bande dessinée américaine dont le personnage principal se déplace par bonds successifs au moyen d'une échasse à ressort).

Les études POGO ont donc pour but d'évaluer ce risque et de définir les remèdes appropriés : c'est d'ailleurs pour régler ce problème sur la fusée Diamant, que des recherches approfondies sur les problèmes d'interaction fluide-structure ont été entreprises, à l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA), sous l'égide du Centre national d'études spatiales (CNES).

La résolution de ce problème fait appel aux méthodes numériques les plus modernes, principalement la méthode des éléments finis, utilisée pour décrire finement l'interaction vibratoire des structures et des ergols : la structure, les fluides, sont divisés en petits élé-

ments de forme géométrique simple, par exemple des cubes, des parallélépipèdes..., puis on cherche à déterminer la valeur des diverses grandeurs physiques inconnues (déplacement des points matériels par rapport à leur position d'équilibre, écart de pression en un point donné du fluide...) en un nombre limité de points constituant les sommets des éléments. De cette manière, on se ramène à un nombre fini d'inconnues : les valeurs des grandeurs physiques en chaque nœud du maillage, nombre qu'il est facile d'ajuster en jouant sur la finesse du maillage.

L'écoulement aérodynamique autour du lanceur constitue également une réserve d'énergie qui peut dans certains cas se communiquer aux oscillations de flexion : c'est le risque de flottement (« flutter » en anglais) semblable à celui rencontré sur les avions et qui est capable d'en provoquer la rupture en vol. Pour régler ce problème, on utilise le modèle mathématique des vibrations du lanceur combiné avec des résultats d'essais aérodynamiques.

Le vol habité...

L'ordinateur de bord vérifie le fonctionnement des moteurs cryogéniques. OK ! Il commande dans la foulée l'allumage des « boosters » à poudre. En une fraction de seconde, la pression dans ces propulseurs atteint une cinquantaine d'atmosphères ; l'enveloppe s'étire brusquement provoquant une forte secousse nettement ressentie par les astronautes au milieu du bruit assourdissant des moteurs. Un court instant la cabine semble vaciller sous l'effet de l'onde de souffle, comme prévu.

Décollage ! Le vaisseau spatial accélère son ascension. En une dizaine de secondes le bruit a nettement diminué, mais des trépidations dues aux fluctuations de poussée des propulseurs à poudre ébranlent la cabine, produisant même, de temps en temps, des effets de résonance désagréables. On approche du régime transsonique : le bruit (provoqué cette fois par l'écoulement aérodynamique autour de la cabine) se remet à croître. Soudain, une série de secousses transversales, nul doute que le lanceur traverse une zone de turbulences intenses. Le pilote automatique est sûrement très sollicité, comme le confirme le braquage des tuyères. Le bruit décroît à nouveau, en revanche l'accélération ne cesse d'augmenter, à cause de l'allègement du lanceur, atteignant la limite du supportable ! Un instant plus tard elle redevient normale ; la cabine est chahutée un court instant par la séparation des propulseurs à poudre dont la mission est maintenant terminée.



Le vol est devenu silencieux...

Les astronautes scrutent attentivement les indications des accéléromètres ; on approche en effet de la fin de propulsion de l'étage cryogénique dans la phase du vol où les calculs prévoient un risque de vibrations POGO. Ce phénomène s'est produit au cours du vol automatique précédent, toutefois avec une amplitude nettement en-deçà du seuil dangereux pour les structures. Depuis, on a procédé à un ajustement des modèles qui permettent maintenant d'expliquer complètement les phénomènes observés ; un nouveau réglage des systèmes correcteurs POGO a été effectué. Normalement, le phénomène ne devrait donc pas se reproduire... Cette prévision est bientôt confirmée ! Aucune oscillation n'est détectée pendant cette phase critique.

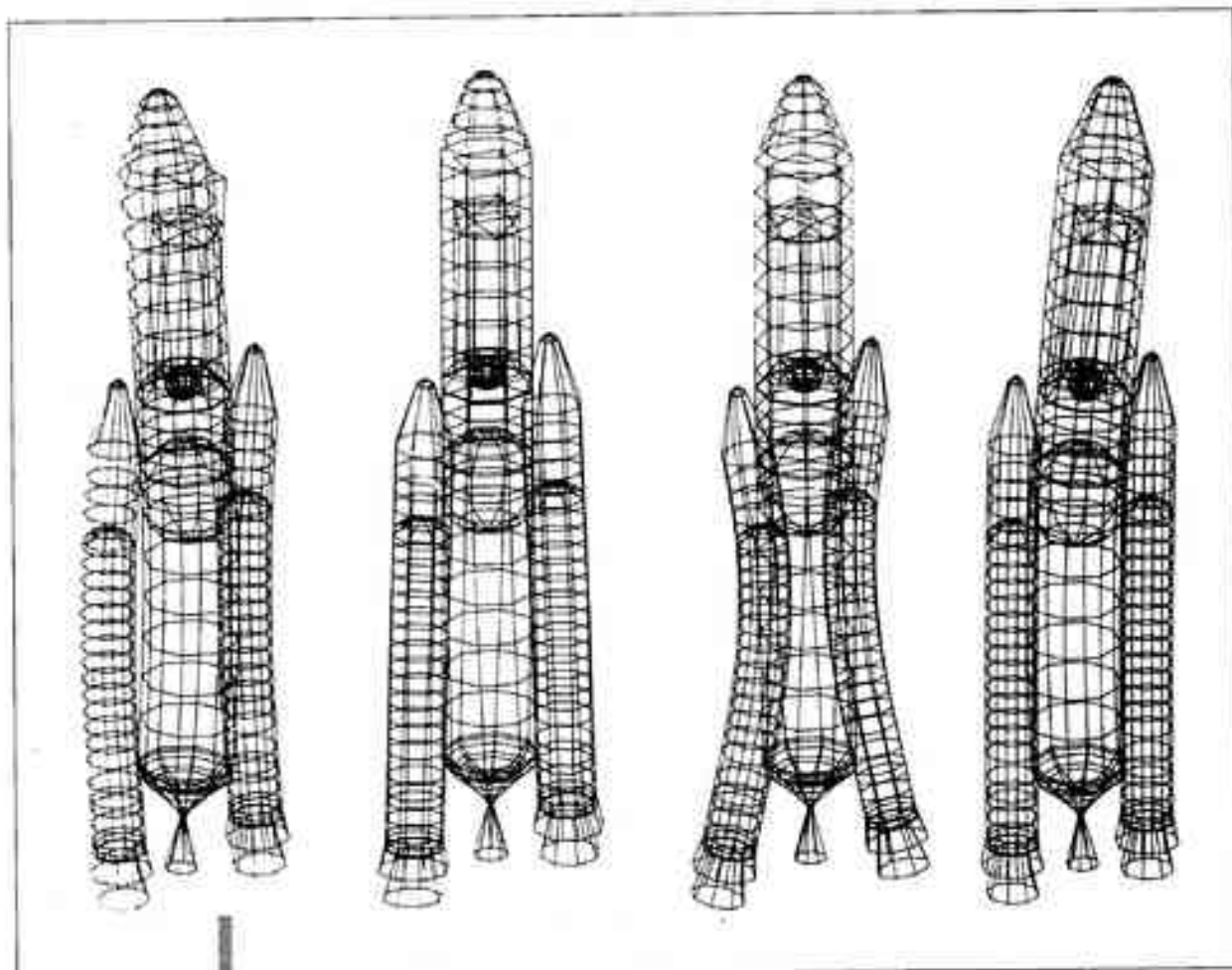
C'est la fin de propulsion de l'étage cryogénique, sanctionnée par un dernier soubresaut, avant la séparation de l'étage...

Les mesures en vol...

Tous ces événements sont suivis attentivement au sol, depuis le centre de contrôle. Les résultats des mesures effectuées au cours du vol, transmises par la télémétrie, seront rapidement accessibles sur les ordinateurs. Pour les spécialistes des vibrations une phase exaltante va commencer : confronter leurs prévisions avec la réalité, c'est-à-dire les sorties de listing ou les tracés d'ordinateur avec les véritables palpitations du lanceur ! Si des différences notables apparaissent, elles devront être expliquées et les modèles devront être corrigés si nécessaire.

Bien entendu, on n'a pas attendu les vols pour confronter les modèles à la réalité ! Des essais en vraie grandeur d'étages entiers ont eu lieu plusieurs années auparavant. Les codes de calcul ont servi à leur prévision, à leur mise au point, puis, dans la foulée, à leur exploitation, qui a d'ailleurs conduit à l'ajustement du modèle mathématique de quelques structures. Très tôt, un modèle mathématique du lanceur complet a été élaboré pour chaque instant du vol, afin d'évaluer les charges mécaniques auxquelles le lanceur sera soumis en vol. Les résultats obtenus ont servi au dimensionnement des

Vue d'artiste du lancement d'Ariane 4. (© ESA-Dessin Orso Martinoli)



Vibrations du lanceur Ariane 5 (© CNES).

► structures. En fin de compte, c'est avec un modèle confronté préalablement à un grand nombre de résultats d'essais que la prévision détaillée de ce vol a été effectuée, ce qui explique la sérénité des responsables du projet et des astronautes...

Le confort des passagers...

Bientôt, ces modèles « validés en vol » seront utilisés pour prévoir l'environnement vibratoire des charges utiles pour chaque mission. La sévérité des charges vibratoires constitue un élément important pour les passagers. En effet, les structures du satellite peuvent être allégées si ces charges le permettent. Un gain de masse autorise l'emport d'une quantité d'ergols supplémentaire, ce qui augmente la durée de vie du satellite, ainsi que les bénéfices d'exploitation !

La mécanique des vibrations demain...

L'étude des vibrations ne constitue bien entendu qu'un aspect du rôle de la mécanique dans les activités spatiales, ici en étroite relation avec l'analyse numérique, l'informatique et les techniques expérimentales.

Aujourd'hui, notamment grâce à des résultats de recherche récents, on sait prévoir l'environnement vibratoire, aux basses fréquences, de structures élastiques couplées à des fluides. L'utilisation massive de propulseurs solides (viscoélastiques) pour les nouvelles versions d'Ariane soulève de nouveaux problèmes de simulation numérique. Demain, on devra être capable de prévoir, avec une précision accrue, les réponses vibratoires induites par des excitations acoustiques ainsi que la propagation des chocs...

A ces fréquences élevées, la mécanique des vibrations « classique » devient caduque : elle doit faire place à l'analyse statistique énergétique. On s'intéresse alors aux différentes formes d'énergie vibratoire (définies en moyenne, au voisinage d'un point géométrique et dans une bande de fréquences donnée) et à leur diffusion dans les structures élastiques et les fluides. Les recherches dans ce domaine sont prometteuses. Puisse alors ce vibrant appel susciter des vocations : « méthode statistique énergétique aimerait rencontrer esprit physicien théoricien, intéressé par la mécanique, afin de bâtir ensemble, un code de calcul de réponse vibratoire des structures aux fréquences élevées »...

■ Henri J.-P. Morand, chef du département « dynamique lanceur », CNES, Rond-Point de l'Espace, 91022 Evry-Corbeil.

Mécanique des biens de consommation

De la conception au dimensionnement, les méthodes de calcul les plus avancées de la mécanique des structures ont leur place dans l'élaboration d'un nouveau produit de consommation.

Jean-Marc Boissenot

Pour les pièces mécaniques courantes, l'analyse du comportement n'est pas toujours très poussée, surtout s'il s'agit d'un métier ancien. La pièce a été façonnée une première fois, essayée, puis façonnée à nouveau, jusqu'à ce qu'elle réponde correctement à la fonction qui lui est affectée. C'est finalement l'expérience qui arrête le dimensionnement correct. Par contre, la recherche de nouvelles performances provoque le recours à des méthodes modernes d'investigation, de conception et de dimensionnement qui conduisent à l'élaboration de nouvelles solutions.

C'est souvent l'utilisateur qui est à l'origine d'une évolution technologique. Il en va ainsi dans le domaine sportif (citons la raquette de tennis ou le ski), mais la mécanique des structures tient aussi sa place dans le domaine de la grande consommation (qu'on pense à la canette métallique avec son mode d'ouverture autonome réalisé à l'aide d'une entaille qui cède sous la simple pression du doigt) comme dans les équipements mécaniques traditionnels (tels les engins de levage).

Autant d'exemples qui nécessitent des études souvent complexes, mettant en œuvre des méthodes de calcul et de dimensionnement les plus modernes. Tout nouveau marché nécessite ainsi qu'on soit en mesure de concevoir rapidement un produit fiable, de qualité, répondant aux besoins du consommateur et de l'utilisateur.

Les techniques de dimensionnement

Pour concevoir et dimensionner ces produits, les ingénieurs et techniciens des bureaux d'études ont à leur disposition trois grandes familles de méthodes : expérimentales, analytiques de calcul, et numériques de calcul.

Pour la plupart, les méthodes expérimentales sont conçues et conduites au sein même des entreprises. Il s'agit surtout d'études de maquettes avant l'éla-

boration du produit. Il existe une méthode de laboratoire qui permet d'effectuer des investigations dans des cas où des méthodes de calculs sont encore impuissantes : la photoélasticité, facile à mettre en œuvre sans investissements importants. Elle est particulièrement intéressante dans les cas de formes de pièces difficiles à décrire analytiquement ou encore dans les cas de méconnaissance des conditions aux limites (problèmes de contact).

Pour leur part, les méthodes analytiques de calcul englobent, en particulier, la résistance des matériaux et conduisent à des ensembles de règles (par exemple la norme AFNOR E 52-110 pour le calcul des appareils de levage) établies pour le dimensionnement d'une même famille d'équipements.

Quant aux méthodes numériques de calcul, elles sont apparues avec l'informatique. Elles ont été longtemps réservées à quelques spécialistes, mais les micro-ordinateurs et les stations de tra-

vail en ont, en quelque sorte, banalisé l'utilisation. On distingue principalement deux méthodes. La méthode des éléments finis (voir l'article « Des outils pour l'ingénieur », réservée il y a dix ans à peine à quelques domaines technologiquement pointus, s'est démocratisée et voit son application s'étendre à toutes les activités industrielles liées à la fabrication de composants mécaniques.

La seconde méthode numérique, celle des équations intégrales de frontière, s'applique à tout phénomène régi par des équations aux dérivées partielles linéaires à coefficients constants à l'intérieur d'un domaine et par des conditions aux limites prescrites aux frontières du domaine.

Ces techniques servant avant tout à effectuer des analyses de contraintes, et permettant de simuler le comportement de pièces mécaniques en service, étaient mises en œuvre après la phase de dimensionnement. Aujourd'hui, les méthodes numériques sont utilisées dès la phase de prédimensionnement. 10 à 15 % des bureaux d'études font appel à elles. Il est vraisemblable que, d'ici la fin du siècle, 80 % d'entre eux les utiliseront couramment.

Bilan et perspectives

Les phénomènes remarquables maîtrisés à la fin des années 80 restent, en mécanique des structures, issus des développements effectués dans le cadre des programmes nucléaire et aérospatial. Parmi les retombées au niveau des

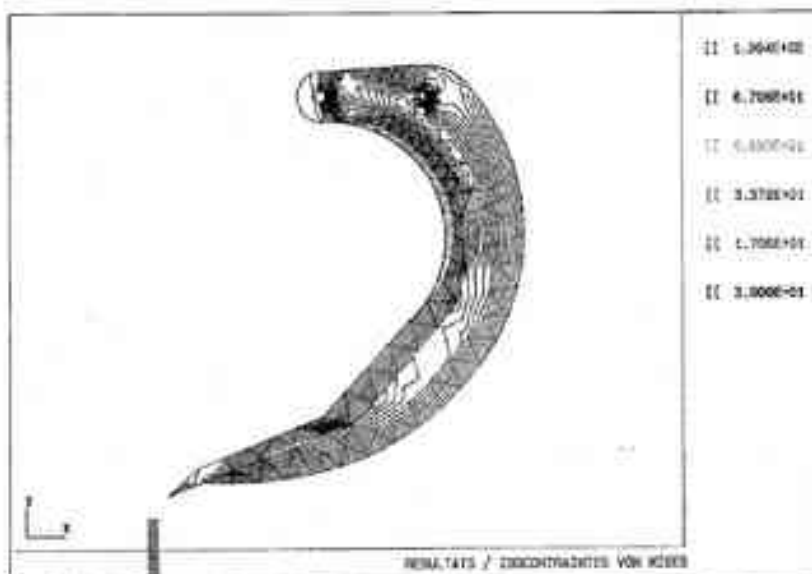


Fig. 1 - Le mécanisme agricole fait aujourd'hui appel aux méthodes des « éléments finis ». Calcul d'un chisel, sorte de proc de labour ; représentation de la répartition des tensions (contraintes de Von Mises) dans la pièce mécanique. (11/03/1988 - Castor PC - CETIM).

► composants mécaniques d'utilisation courante, on peut citer les méthodes d'aide à l'analyse des défaillances. C'est le cas pour l'évaluation de la durée de vie d'une pièce mécanique sous sollicitations cycliques, de l'analyse des fissures, ou encore de l'apparition de déformations permanentes. On peut également citer une retombée toute récente : l'optimisation de forme qui permet, à partir d'une analyse de contraintes, de définir la forme optimale d'une pièce mécanique.

Les progrès attendus dans les dix ou vingt ans à venir sont de deux ordres. Le premier, lié aux développements des méthodes de calcul, répond à des besoins nouveaux, comme, par exemple, l'analyse des structures en matériaux composites, ou le dimensionnement automatique des machines travaillant en environnement vibratoire. Le second concerne les progiciels de dimensionnement intégrés, outils permettant à l'utilisateur d'effectuer un enchaînement de tâches de la conception aux spécifications de réalisation, en passant par le prédimensionnement, l'analyse, le dimensionnement, pour aboutir aux plans d'exécution.

■ Jean-Marc Boissenot, responsable du Département « calcul », Centre technique des industries mécaniques (CETIM), 52, avenue Félix Lemaître, 60014 Senlis.

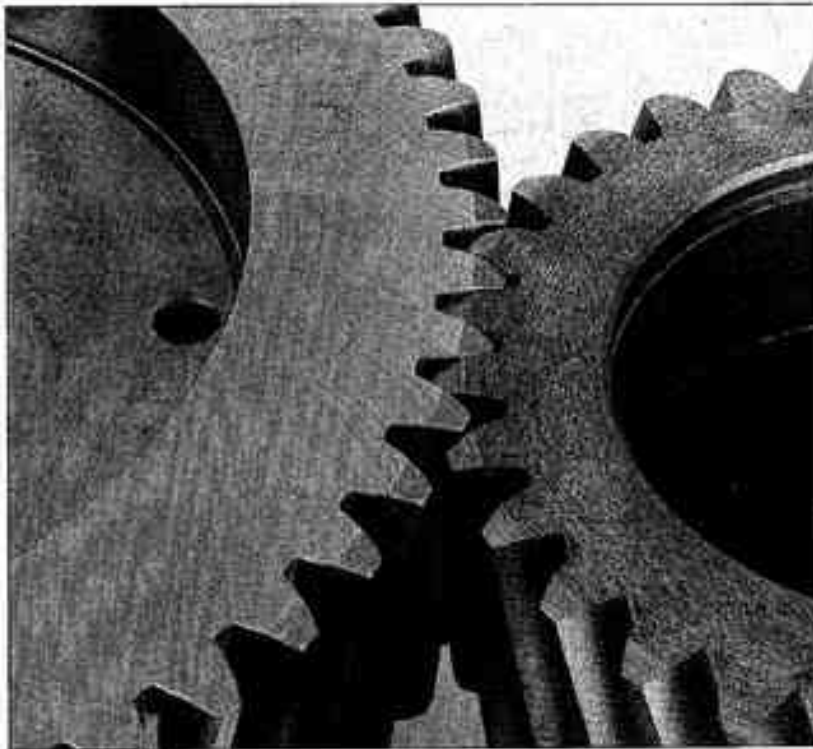


Fig. 2 - Les engrenages jouent un rôle assez symbolique dans le monde de la mécanique car ils intègrent à eux seuls un grand nombre de métiers. Leur dimensionnement n'est pas chose aisée et nécessite un savoir-faire important au-delà des règles utilisées par la profession. (© CETIM).

Structures des installations nucléaires

Simuler tous les cas de fonctionnement des composants structuraux d'une centrale est indispensable pour dégager la notion de coefficient de sécurité et prévoir le type de dommage en cas d'incident.

■ Alain Hoffmann,
Roland Roche, Philippe Jamet

La mécanique des structures est une science relativement jeune dont le développement s'est fait parallèlement à celui des grands ordinateurs. Dans le cas des installations nucléaires, elle est fortement marquée par les contraintes qui pèsent sur cette industrie, la plus connue étant la crainte des conséquences d'un accident

éventuel. D'autres contraintes sont de nature économique : les installations nucléaires représentent de lourds investissements, le loyer de l'argent étant élevé, la part du capital est la plus importante du coût du produit (énergie électrique par exemple). Aussi il est indispensable de les dimensionner au mieux pour assurer une disponibilité élevée (il faut qu'elles marchent) et une vie longue. Aujourd'hui l'une des raisons du haut degré de disponibilité du parc français est certainement due à un dimensionnement sûr et précis.

Aperçu sur les méthodes employées

Ces contraintes conduisent les ingénieurs à vérifier la bonne tenue des composants structuraux pour le cas de fonctionnements normaux, incidentels ou accidentels (y compris les événements hautement improbables) et également à estimer les marges de sûreté. Aussi a-t-on recours au calcul sur ordinateur pour simuler le comportement des structures. Cette simulation a en général un double but : elle permet de dégager la notion de coefficient de sécurité et de préciser le type de dommages subis. Pratiquement tous les composants dans leurs différents cas de fonctionnement sont calculés à l'aide de programmes installés sur de très gros ordinateurs.

Les méthodes de calcul - essentiellement la méthode des éléments finis (voir l'article « Des outils pour l'ingénieur ») - se sont développées à partir de la fin des années 60. En France, deux grands systèmes de calcul des structures ont été créés à cette époque

et sont aujourd'hui largement utilisés non seulement à l'intérieur de l'Hexagone mais dans différents pays du monde. Il s'agit du système Systus développé par Framatome et du système Castem développé par le Département des études mécaniques et thermiques du Commissariat à l'énergie atomique.

Castem permet le calcul linéaire et non linéaire des structures très complexes. Il prend en compte, en statique et en dynamique, des phénomènes tels que : la plasticité des métaux, la propagation des fissures, la rupture des matériaux de génie civil, les chocs, le flambage et de façon générale les instabilités géométriques. Il est alors possible de simuler des situations complexes : l'effet de séismes sur les bâtiments et équipements, la chute d'avions, les conséquences d'explosions d'hydrocarbures au voisinage des îlots nucléaires...

Disposer de méthodes sûres

Ces méthodes doivent être validées par des essais qui apportent la confiance et la sécurité nécessaires, et qui demandent des moyens adaptés et un savoir-faire particulier. Par exem-

ple, la taille des structures principales de Super Phénix (le diamètre de la cuve principale est de 20 m) a conduit à fabriquer et à essayer des maquettes représentatives à échelle réduite. Il s'agit là d'une pratique courante et essentielle de cette industrie. Le calcul de ces maquettes comparé et parfois ajusté aux résultats des essais permet de valider la méthode qui est appliquée au calcul des structures réelles. Pour l'essentiel, c'est ce dernier qui constitue le dossier de dimensionnement qui sera soumis aux autorités de sûreté.

Parallèlement à cet aspect, l'expérience industrielle acquise est intégrée dans des règlements nationaux ou internationaux très stricts qui précisent les différents aspects du dimensionnement des structures (codes ASME aux États-Unis ou RCC en France, en continuelle amélioration).

Aspects internationaux

Cette pratique du dimensionnement n'est pas typiquement française. La même approche existe dans les grands pays industriels et pour l'essentiel elle doit beaucoup aux pays anglo-saxons. En Europe, les principaux pays de la

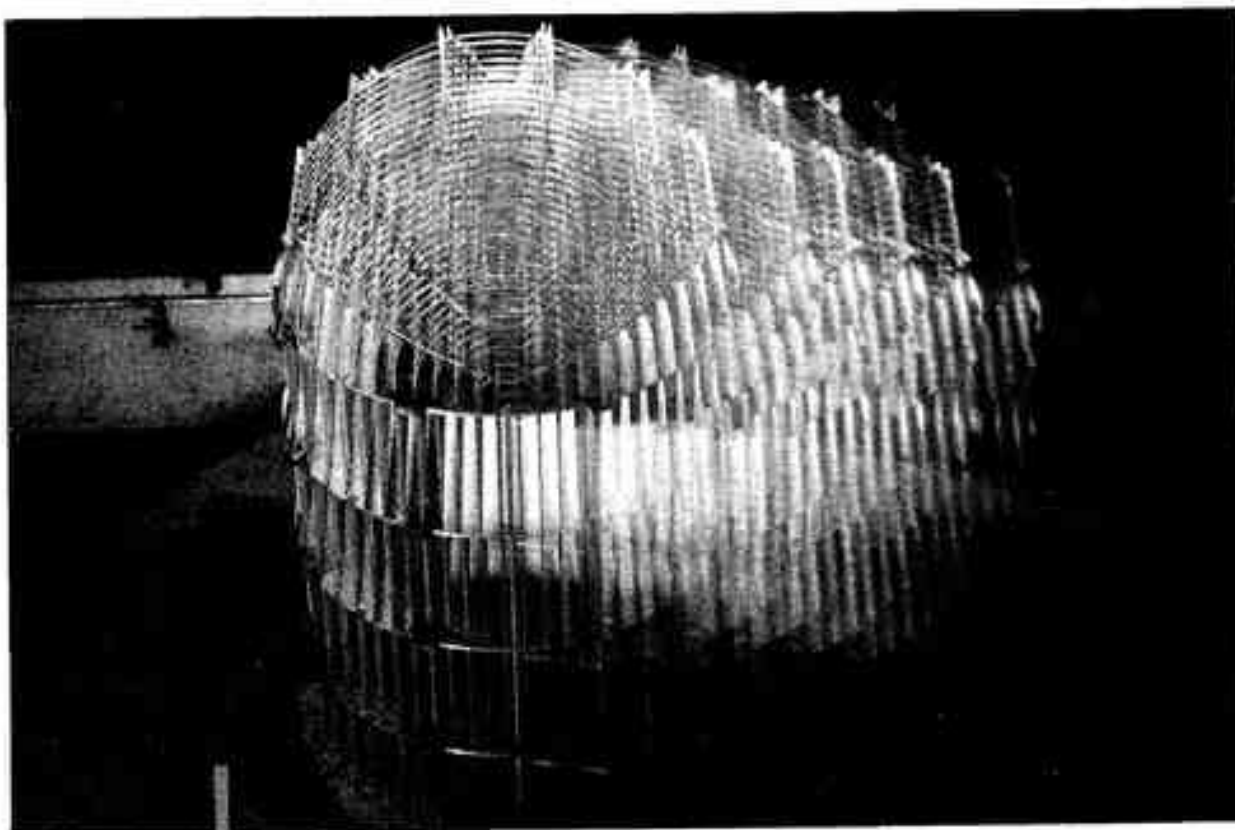
Communauté européenne se sont unis pour mettre en commun leurs efforts de recherche dans le domaine des températures élevées afin d'améliorer l'ensemble de nos connaissances et d'établir des règles et des méthodes communes pour les décennies à venir.

En France comme dans d'autres pays, des moyens considérables sont consacrés à améliorer les méthodes de prédiction pour un dimensionnement le mieux adapté possible. Citons l'exemple récent de l'International Piping Integrity Research Group, regroupant dix pays dans une recherche sur le comportement des structures en particulier des tuyauteries, en cas de séismes.

■ Alain Hoffmann, chef du Département des études mécaniques et thermiques au Commissariat à l'énergie atomique (CEA).

■ Roland Roche, adjoint au chef du Département des études mécaniques et thermiques au CEA.

■ Philippe Janet, chef du Service d'études de mécanique et thermique des structures au CEA, Centre d'études nucléaires, Saclay - 91191 Gif-sur-Yvette Cedex.



Comportement d'un générateur de vapeur de réacteur à eau sous pression, soumis à un tremblement de terre. L'essai est effectué sur table vibrante et, parallèlement, des calculs ont été menés afin de simuler les mouvements observés. (Photo CEA DENT).

L'automobile : concevoir sa structure

Si l'invention en automobile a toujours été étroitement liée à la mécanique, elle n'a concerné que depuis peu la structure de carrosserie du véhicule, par tradition œuvre de carrossier plus que d'ingénieur.

— Pierre Guellec

Pendant une vingtaine d'années, l'essor de l'électronique, de l'informatique et de l'analyse numérique a fait progresser les méthodes d'étude de nombreux secteurs industriels (aéronautique, génie civil ou nucléaire, par exemple). Durant cette période, les bureaux d'études de structure automobile accordèrent généralement à la géométrie une importance dominante : ils imaginèrent une forme de conception assistée par ordinateur fondée sur la génération de surfaces paramétrées à l'aide de polynômes. Malgré tout son intérêt, ce n'était qu'une aide au pur dessin sur le plan de la conception des structures ; la résistance des matériaux était totalement absente de ce processus de conception auquel un peu d'informatique donnait une apparence scientifique. Le problème de la qualité mécanique des pièces dessinées demeurait entier.

Avant de décrire les méthodes qui ont été mises en place pour le résoudre, il convient d'en préciser les principaux aspects.

Nature mécanique de la structure de carrosserie

La liberté de conception d'une structure automobile est limitée de manière impérative par de nombreuses contraintes, parmi lesquelles le coût et l'aspect sont prépondérants. D'autre part, le principe de fabrication par l'assemblage discontinu par soudure par points de pièces de tôle emboutie se prête mal à la réalisation de haute précision et de grande qualité du point de vue mécanique. Cependant, à l'intérieur de ce cadre peu favorable, la structure de carrosserie doit assurer des fonctions mécaniques essentielles pour le véhicule, que l'on peut classer en quatre catégories : une rigidité suffisante pour assurer le fonctionnement normal en roulage (tenue de route, attaches d'organes divers, entrées d'ou-

vrants...) ; la tenue mécanique en fatigue ; le comportement vibratoire et acoustique, lié au confort des occupants (trépidation de siège, de plancher, de direction et de planche de bord ; bruits générés par les panneaux ou transmis par voie aérienne) ; le comportement en choc, qui intervient principalement en sécurité passive à vitesse élevée, mais aussi sur les coûts de réparation à vitesse plus faible.

Développement des moyens d'étude des structures

L'adaptation des méthodes d'étude des structures déjà largement utilisées dans d'autres secteurs s'est faite très rapidement par l'intégration du calcul prévisionnel et des techniques de simulation expérimentale en laboratoire, tout en posant quelques sérieux problèmes d'assimilation par des bureaux d'études à caractère traditionnel.

La modélisation par le calcul

Si l'on exclut quelques balbutiements antérieurs, l'analyse par le calcul des structures de carrosserie automobile en France fut introduite peu avant 1980, lors de l'étude de la Citroën BX. Elle mit en évidence le potentiel exceptionnel de cette méthode dans ce type d'application et le progrès qu'elle pourrait apporter au bureau d'études. Celui-ci procédait jusqu'alors soit par re-conduction de solutions passées ou inspirées par la concurrence, soit par innovation sans vérification pendant toute la phase de dessin et de réalisation du prototype, dans l'attente du

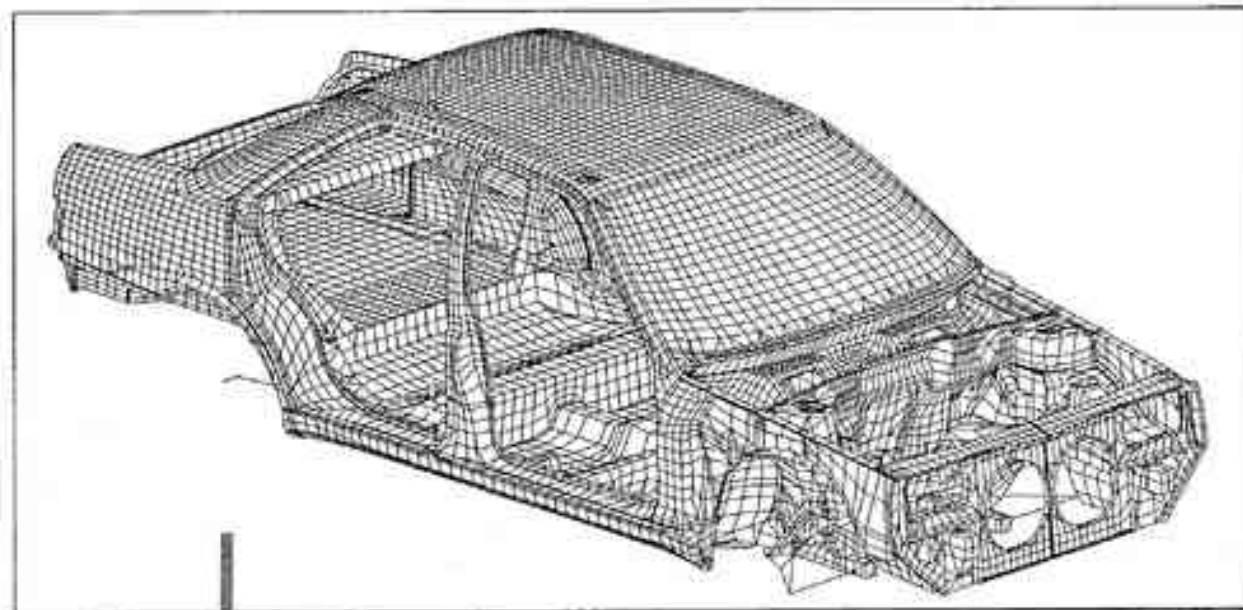


Fig. 1 - Maillage de la structure 405. (PSA)

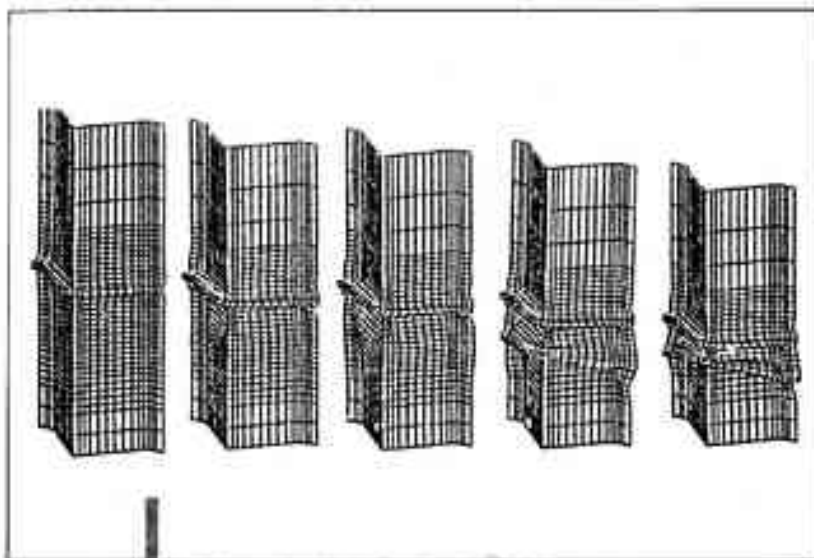


Fig. 2 - Simulation numérique de l'écrasement d'une éprouvette sous un choc (étude de faisabilité J.R.C.), (© PSA).

verdict de l'essai de roulage ou de choc sur obstacle.

L'application de la modélisation prévisionnelle à l'automobile s'est développée suivant plusieurs axes :

- l'utilisation en bureau d'études, dans le cadre d'une conception assistée par ordinateur orientée vers l'analyse mécanique des concepts qui imposa des développements spécifiques : l'analyse des sollicitations par simulation du déplacement du véhicule complet à l'aide de la modélisation d'assemblages de corps solides, le maillage et l'exploitation graphique des résultats de calcul (figure 1), le calcul efficace de très gros systèmes issus de maillages de coques ;
- la recherche de méthodes nouvelles, destinées à permettre la simulation de phénomènes physiques complexes : l'emboutissage des tôles minces, l'interaction air-structure dans la compréhension de l'acoustique de l'habitacle, l'analyse des chocs à grande vitesse contre un obstacle fixe (figure 2),

La simulation en laboratoire

Parallèlement, les techniques de simulation expérimentale ont connu un important développement, tant en acoustique qu'en fatigue. Dans ce dernier cas, elles permettent actuellement de reproduire en laboratoire avec une erreur inférieure à 5 % la réponse du véhicule mesurée en fonctionnement réel. Elles requièrent un matériel hydraulique puissant et une électronique sophistiquée montés sur une infrastructure très lourde (figure 3).

L'usage de la simulation en laboratoire suppose l'existence d'un proto-

type complet et représentatif du véhicule définitif. On lui assigne pour objectifs de réduire la durée des essais d'endurance, de valider concrètement l'étude prévisionnelle et d'optimiser le produit dans les conditions favorables du laboratoire en substitution de celles de la route ou de la piste.

Prospective

L'effort récent a porté sur l'amélioration de la qualité de conception d'un produit dont les principes n'ont pas fondamentalement changé depuis l'invention de la structure monocoque.

L'effort à venir portera plus vraisemblablement sur la modification des concepts du produit lui-même. Le choix de nouveaux matériaux occupera peut-être une place importante, même si l'on ne distingue pas encore aujourd'hui l'apport positif indiscutable du remplacement de l'acier par des matériaux de synthèse. Par contre, la structure de carrosserie devra évoluer dans le sens d'un meilleur confort et d'une sécurité supérieure.

Dans ces deux domaines, on peut attendre un progrès important du couplage de l'analyse mécanique en cours de fonctionnement et de l'exploitation instantanée par électronique et informatique de ses données pour définir une intervention active, par un moyen hydraulique par exemple, sur tel ou tel organe mécanique. On peut citer, entre autres applications de ce type, le système de freinage anti-bloquant, la régulation du roulis, de l'amortissement, la protection de l'occupant par pré-tension des ceintures, le contrôle du bruit dans l'habitacle...

Confort et sécurité sont deux aspects fortement liés à la mécanique de la structure du véhicule, auxquels l'utilisateur est de plus en plus sensible. Plus que la performance mécanique pure, à l'exception de la fiabilité des organes, ils caractériseront de manière essentielle la qualité des futurs véhicules, et seront par conséquent les centres d'intérêt privilégiés des mécaniciens de structure automobile.

■ Pierre Guélee, Peugeot S.A., Direction technique, 18, rue des Fauvelles, 92250 La Garenne-Colombes.

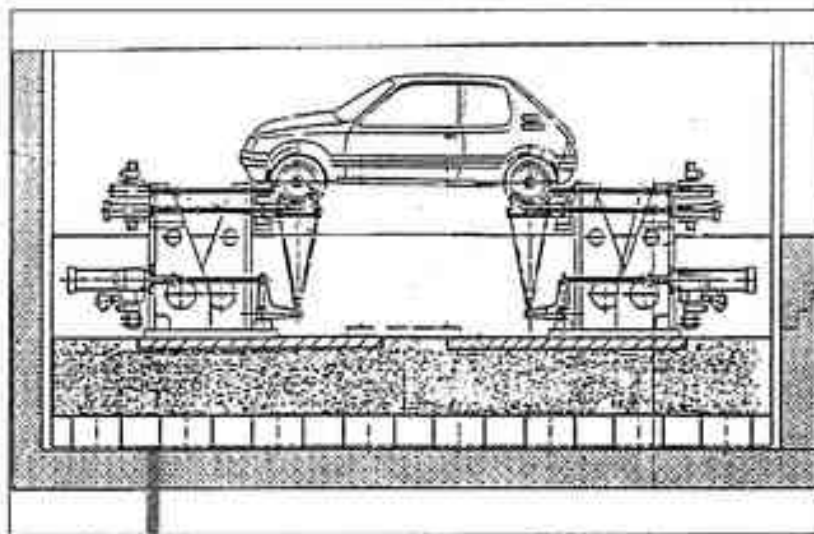


Fig. 3 - Schéma d'ensemble d'un simulateur d'endurance, (© PSA).

Mécanique aléatoire des structures

La mécanique aléatoire permet, par exemple, de modéliser et ainsi de prévoir les réponses d'un avion soumis à la turbulence atmosphérique.

— Christian Soize,
Fabrice Poirion

La prévision par modèle des réponses d'un avion soumis à la turbulence atmosphérique dans la couche limite de l'atmosphère est un bon exemple de la place de la mécanique aléatoire dans la mécanique. Une telle étude entre dans le cadre classique de l'étude d'un système mécanique (l'avion) excité par une force extérieure (la turbulence). Cependant les difficultés apparaissent au niveau de la

modélisation, c'est-à-dire lors de l'écriture des équations qui décrivent d'une part, le mouvement de l'avion et d'autre part, le phénomène physique de la turbulence.

Modélisation de l'avion

Un avion souple est un système mécanique très complexe à modéliser car il faut tenir compte des différentes parties de la structure : fuselage, voilure, empennages, etc. Dans le cadre de l'élasticité linéaire en absence d'écoulement, le système mécanique conservatif associé possède une infinité dénombrable de modes propres. En pratique, on ne conserve que quelques dizaines de modes, ceux dont les fréquences propres sont dans la bande d'énergie significative de l'excitation. La détermination de ces modes se fait soit par des mesures de vibration au sol, où l'avion, muni de capteurs, est excité à différentes fréquences, soit par des modèles numériques, le plus souvent par la méthode des éléments finis.

Modélisation de l'excitation

La turbulence atmosphérique verticale est un phénomène aléatoire en ce sens que la fluctuation des vitesses verticales en un point fixé de l'espace, notée $W(t)$, ne peut pas être décrite par

une seule fonction du temps $t \rightarrow W(t)$. On doit considérer une famille $t \rightarrow W(t, \alpha)$ de fonctions, α représentant l'aléa, cette famille définissant un processus stochastique. La turbulence verticale est alors décrite par des grandeurs statistiques telles que sa fonction moyenne, sa fonction d'autocorrélation, la répartition pour t fixé de la variable aléatoire $\alpha \rightarrow W(t, \alpha)$...

Il s'agit ensuite de caractériser mathématiquement ce processus : de manière classique et pour certaines conditions, la composante verticale de la turbulence peut être modélisée par un processus gaussien stationnaire en temps et centré. L'hypothèse de stationnarité signifie que les grandeurs statistiques sont indépendantes de l'origine du temps. En outre, elle implique que ce processus gaussien est entièrement caractérisé par sa mesure spectrale de puissance qui donne la répartition de l'énergie en fonction de la fréquence.

— Christian Soize, chef de la Division aéroélasticité, Direction des structures, ONERA.

— Fabrice Poirion, ingénieur de recherche à l'ONERA, 29, avenue de la Division Leduc, 92320 Châtillon Cedex.

Des outils pour l'ingénieur

La méthode des éléments finis et la conception assistée par ordinateur ont apporté la révolution dans le travail des ingénieurs mécaniciens.

— Thierry Nevers

Les équations de la mécanique des milieux continus sont des équations aux dérivées partielles dont les solutions exactes sont en général inaccessibles. Avant l'arrivée des ordinateurs, la gamme des problèmes de structure abordés par les ingénieurs était pratiquement restreinte au domaine des poutres et des barres élastiques (les viaducs et la tour d'Eiffel sont célèbres...). Les problèmes bidimensionnels ou tridimensionnels étaient hors de portée des moyens de calcul d'alors.

L'apparition des calculateurs rapides et le développement des techniques de calcul scientifique ont bouleversé le champ d'investigation de l'ingénieur, lui ouvrant le domaine des phéno-

mènes non linéaires, des modèles à plusieurs échelles, etc. La méthode des éléments finis, apparue dans les années 50, est une technique efficace et très générale pour résoudre de façon approchée les équations aux dérivées partielles sous-jacentes aux modèles de la mécanique.

Elle consiste à caractériser une structure par un nombre fini d'inconnues (valeurs des champs de déplacement, de température, etc.), en un nombre fini de points appelés nœuds.

Pour cela, la pièce à étudier est découpée en un ensemble de petits volumes élémentaires – appelés éléments finis – de forme simple, qui servent de support aux nœuds.

L'écriture des différentes équations de la mécanique conduit alors à un système matriciel portant sur les inconnues.

Continuant de se développer, cette méthode est déjà très répandue dans les milieux industriels. Elle permet de modéliser des structures aux formes complexes et aux comportements de plus en plus proches de la réalité physique. Des calculs à plusieurs dizaines de milliers de degrés de liberté se font couramment. Sur certains ordinateurs (vectoriels et parallèles), le cap du million de degrés de liberté a été franchi pour des temps de calcul de quelques heures «cpu».

La maîtrise de ces techniques devient vitale pour les bureaux d'études. A travers les modèles mécaniques, elles permettent d'extrapoler les résultats expérimentaux, nécessairement limités, à des sollicitations et des géométries complexes dont l'étude expérimentale serait trop longue et d'un coût exorbitant.

Cependant, concevoir «à la main» le maillage par éléments finis d'une voiture ou d'un avion est une tâche suffisamment complexe pour très rapidement submerger l'ingénieur. Par ailleurs, il faut interpréter les résultats obtenus, en tirer des conclusions et éventuellement apporter des modifica-

nous à la géométrie, changer le matériau utilisé... et refaire un nouveau calcul.

Devant la masse d'informations à traiter rapidement, l'ingénieur a désormais besoin de l'ordinateur pour l'aider à préparer les calculs et à les interpréter. La Conception Assistée par Ordinateur (CAO) est l'ensemble des outils (essentiellement graphiques) dévolus à cette tâche.

Le dessin des pièces à étudier et la génération des maillages d'éléments finis sont maintenant pris en charge par des « pré-processeurs ». L'ingénieur dialogue avec l'ordinateur par l'intermédiaire d'un crayon optique ou d'une « souris », compose avec des objets graphiques élémentaires pour générer le dessin de la structure étudiée. Les logiciels de CAO, désormais très conviviaux, assurent un confort de travail et une très grande souplesse d'utilisation. Les liasses de plans ont pratiquement disparu des bureaux d'études, remplacées par les disquettes et bandes magnétiques.

L'analyse des résultats de calcul passe maintenant par la visualisation graphique. Les « post-processeurs » traitent les données brutes fournies par le code de calcul et présentent à l'ingénieur un menu d'opérations possibles pour mettre en valeur tel aspect de la solution : champ d'isovaleurs, projection, zoom, etc. Pour toutes ces opérations, la couleur est devenue un outil indispensable pour obtenir le maxi-

mum d'informations sous une forme intelligible.

Au cours de son activité quotidienne, l'ingénieur a besoin de l'ordinateur pour générer les données, effectuer les calculs et les interpréter avec, éventuellement, plusieurs itérations sur ces trois étapes. Naguère, son terminal informatique relié (en temps partagé) à un gros ordinateur central, il se heurtait souvent à des temps de réponse de la machine incompatibles avec son plan de travail.

De nombreux bureaux d'études s'orientent vers une décentralisation des moyens informatiques associée à une spécialisation. L'ingénieur dispose d'un mini-ordinateur doté de moyens graphiques évolués et rapides, d'une unité de calcul et d'un disque dur. Cette station de travail lui permet d'utiliser efficacement les « pré- et post-processeurs » de la CAO. En réseau avec les stations de travail, se trouve un ordinateur rapide dédié au calcul scientifique, sur lequel tournent les codes d'éléments finis. Toutes ces unités communiquent entre elles permettant à l'utilisateur de fuir des allers et retours incessants entre la phase de calcul et les phases de préparation-interprétation.

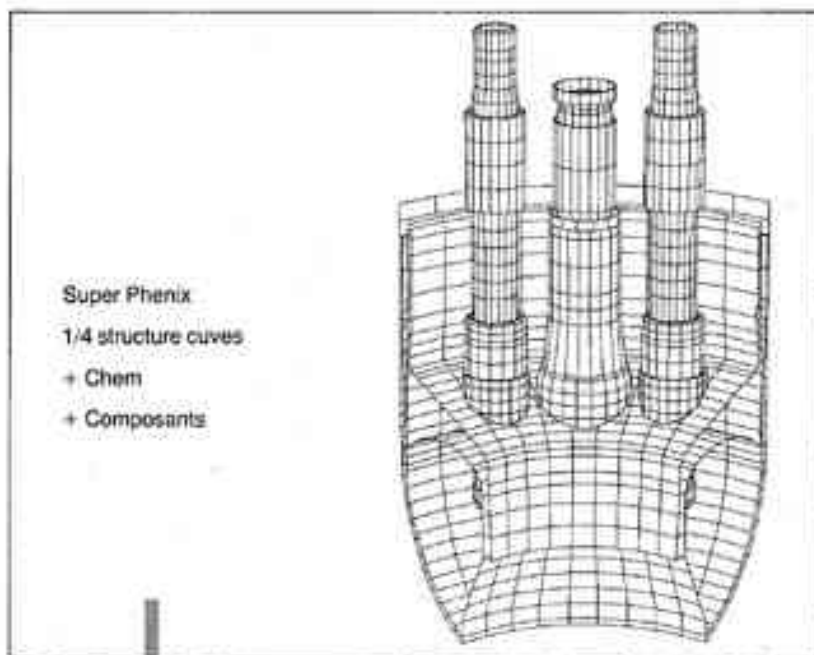
Thierry Nevers, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de mécanique des sols, structures et matériaux (UA 850 CNRS), Ecole centrale de Paris, grande voie des Vignes, 92290 Châtigny-Malabry.

Flambage des structures minces

Le flambage est un des principaux modes de ruine des structures minces. Les progrès du calcul scientifique ont beaucoup amélioré la prévision de cette instabilité.

Michel Potier-Ferry

Le flambage est un élément important du dimensionnement des structures du Génie civil, de l'Aéronautique ou du Génie nucléaire. C'est un phénomène d'instabilité qui apparaît dans les structures de faible épaisseur. Par exemple, la cuve du réacteur de Creys-Malville est une co-



Super Phenix
1/4 structure curvée
+ Chem
+ Composants

Maillage des structures internes d'un réacteur à neutrons rapides en vue de son étude par la méthode des éléments finis. (© CEA-DEMT).

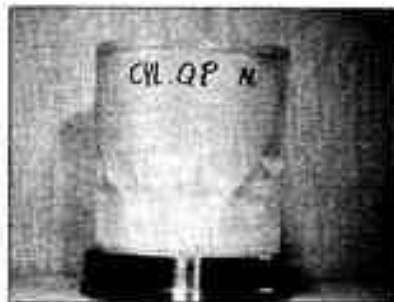


Fig. 1 - a) Coque cylindrique après flambage : compression axiale. (© M. Julien, Institut national des sciences appliquées, Lyon). b) Simulation numérique du flambage d'une coque cylindrique sous compression axiale. (© CEA-DEMT).

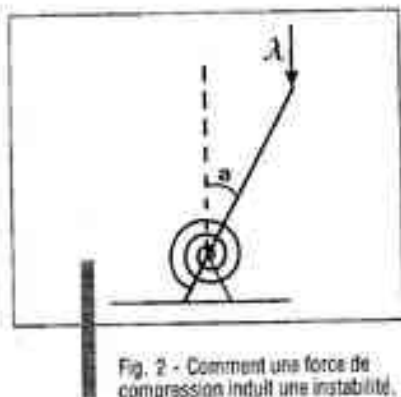


Fig. 2 - Comment une force de compression induit une instabilité.

que cylindrique ayant un diamètre et une hauteur de 15 mètres et une épaisseur d'environ 1,5 centimètre. Pour de tels cylindres, l'instabilité apparaît brutalement (claquage) et, selon le chargement et la géométrie, on observe des modes de flambage de formes très variées (figure 1).

Pour comprendre le mécanisme du flambage, considérons le système représenté à la figure 2: une barre rigide articulée est soumise à une force de compression λ et elle est retenue par un ressort de torsion de rigidité K . La force de compression induit un couple déstabilisant:

$$M_L \sin \alpha \approx \lambda L \alpha$$

qui s'oppose au couple de rappel élastique $K\alpha$. L'instabilité apparaît lorsque le couple déstabilisant devient supérieur au couple élastique, ce qui définit la force critique de flambage:

$$\lambda_c = K/L$$

Nous venons de faire une analyse de stabilité linéaire. Reprenons l'étude sans l'approximation $\sin \alpha \approx \alpha$ et en postulant une loi de rappel élastique non linéaire pour le ressort. On obtient alors une équation de la forme:

$$(\lambda - \lambda_c) \alpha = C_1 \alpha^3 + C_2 \alpha^5 + \dots$$

En plus de la solution verticale $\alpha=0$, il existe une autre branche de solution $\lambda(\alpha)$.

Ces deux branches de solutions se coupent au point $(\alpha, \lambda) = (0, \lambda_c)$. C'est

ce qu'on appelle une bifurcation (figure 3). Si l'analyse linéaire conduit à la charge de flambage, l'analyse non linéaire permet de connaître la résistance de la structure au-delà de la charge critique. Pour une barre ou une plaque comprimée, l'équilibre reste possible au-delà de la charge critique, comme à la figure 3a. Pour une coque cylindrique, la courbe déplacement-force ressemble à celle de la figure 3b. La ruine de la structure apparaît dès la charge critique et même souvent bien plus tôt.

Ces notions de force critique et de bifurcation restent valables pour des structures complexes. La prévision du flambage requiert alors un calcul sur ordinateur. L'analyse linéaire permet aussi de connaître le mode de flambage, c'est-à-dire la forme de la déformée de la structure (voir figure 1). Numériquement, ce mode est représenté par un vecteur V de grande dimension qui est solution d'un problème aux valeurs propres de la forme

$$(K_e - \lambda_e K_0 + K_a) V = 0$$

où K_e , K_0 , K_a sont trois matrices. Les deux premières représentent la raideur élastique (l'équivalent du ressort) et l'effet déstabilisant de la compression (l'équivalent du couple $M_L \alpha$), la troisième représente l'effet du déplacement avant flambage (inexistant dans le modèle simple).

Ces calculs de charge critique sont faciles avec la plupart des grands codes d'éléments finis. En revanche, les calculs non linéaires sont encore coûteux pour les structures complexes, surtout si la structure a atteint le seuil de plasticité avant la charge de flambage. De plus, la prévision du flambage plastique sur ordinateur n'est pas très fiable, probablement parce que le comportement des matériaux n'est pas encore assez bien modélisé.

Michel Ponsier-Ferry, professeur à l'université de Metz, Laboratoire de physique et mécanique des matériaux (UA 1215 CNRS), Ile du Sauley, 54045 Metz Cedex.

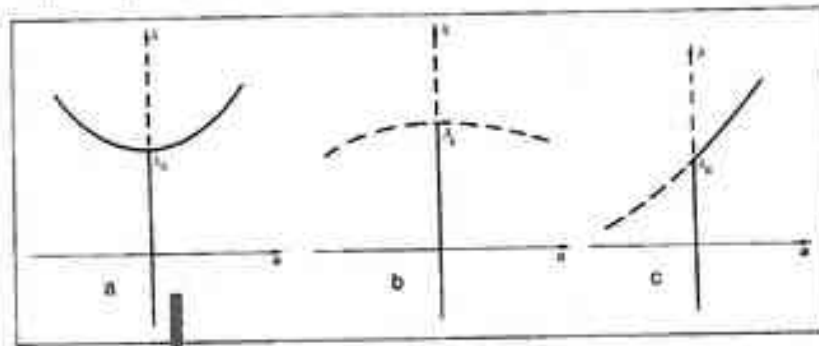


Fig. 3 - Courbes représentant la force de compression en fonction de l'angle.

Thermographie des matériaux sous contrainte

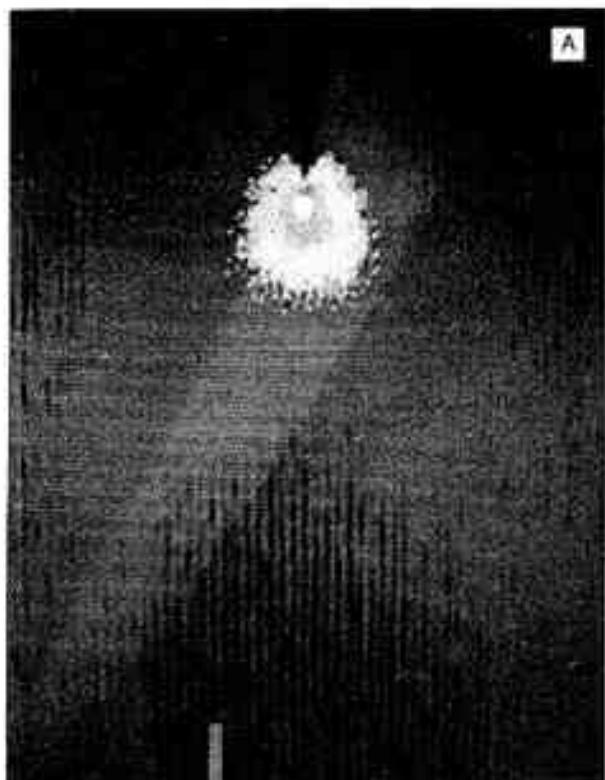
Soumis à une déformation brutale, un matériau présente des variations locales de température dont la répartition et l'évolution permettent une véritable auscultation du milieu.

Minh Phong Luong,
Quoc Son Nguyen

Il est bien connu que la déformation d'un milieu continu (un fluide ou un solide) est accompagnée d'effets thermiques, c'est le couplage thermomécanique. Si les variations de température dans un solide sous sollicitations mécaniques ne sont pas comparables à celles observées lors d'une expérience de détente d'un gaz par exemple, elles sont suffisamment importantes pour être détectables par des techniques de mesure modernes.

Ce texte présente quelques applications de la technique de mesure par thermographie infrarouge à l'étude des irréversibilités qui accompagnent le processus de déformation dans les matériaux solides usuels.

La thermographie infrarouge utilise en temps réel un système électronique sophistiqué pour conditionner les signaux captés par un détecteur infrarouge à effet photonique et les afficher sur un écran de télévision. C'est une technique sans contact et continue, les mesures ne perturbent pas les phénomènes et les objets observés. Cette méthode d'auscultation est basée sur l'observation dans une fenêtre de transparence atmosphérique d'une répartition de température à la surface de l'échantillon. La quantité d'énergie émise par rayonnement infrarouge invisible dépend de la température de l'échantillon et de son état de surface ou émissivité. Plus la température est élevée, plus l'énergie émise est importante. Les différences d'énergie rayonnée correspondent à des différences de températures car $w = \epsilon T^4$ où ϵ est une constante, T la température et w l'émissivité. Cette technique est utilisée dans de nombreux domaines, en médecine pour la détection des tu-



Propagation d'une fissure dans une plaque de métal sous chargement monotone (plaque d'acier de dimension 150 x 150 mm, épaisseur 1 mm). L'éprouvette fissurée est soumise à une traction à déplacement imposé, de façon à obtenir une propagation ductile stable tout au long de l'essai. On a observé deux phases dans la déformation et la rupture de la plaque. D'abord, la fissure immobile (A) : la déformation plastique est diffuse dans l'éprouvette, la zone chaude rappelle la forme de la zone plastique en contrainte plane avec deux lobes caractéristiques traduisant les effets des bords. Ensuite, la fissure en propagation (B) : les zones plastiques s'agrandissent régulièrement, les isothermes donnent avec précision les amplitudes de l'énergie dissipée et une meilleure compréhension des champs mécaniques en rupture ductile. (Clichés LMS, Ecole polytechnique, par Bui H.D., Ehrlicher A. et Nguyen Q.S.).

meurs, en aérospatiale pour les observations par satellites, etc.

Le couplage thermomécanique est décrit par les équations de la thermodynamique des milieux continus. Elle consiste à admettre la validité du principe de l'état local : un milieu continu peut être considéré comme une adjonction de sous-systèmes homogènes infinitésimaux en évolution lente pour que l'équilibre thermodynamique soit réalisé pour chaque sous-système. On peut donc associer à chaque sous-système une température, une énergie interne, une entropie. D'une façon plus précise, en chaque point matériel d'un milieu continu, on peut introduire une densité massique d'énergie interne et d'entropie, fonctions des variables d'état décrivant l'état mécanique et physique du matériau en ce point. Ces quantités permettent de définir l'énergie et l'entropie d'un volume matériel quelconque et d'énoncer les deux principes de la thermodynamique d'une manière classique comme en thermodynamique.

Les variables d'état sont obtenues ou suggérées par des observations expérimentales.

La carte de température à un instant donné et son évolution avec le temps nous permettent d'accéder aux termes de source. Plusieurs cas particuliers sont intéressants à ce titre :

- Cas d'une montée en charge rapide : la transformation est alors pratiquement adiabatique.

Par exemple, la traction brutale d'une barre d'acier entraîne un refroidissement si la déformation est faible pour être purement élastique (comme dans l'expérience de détente d'un gaz). Mais si la déformation est importante, la puissance dissipée, due principalement aux déformations plastiques, représente le terme prédominant et entraîne un échauffement.

L'observation du champ de température due au couplage permet dans ce cas d'explorer expérimentalement les déformations irréversibles.

- Cas d'un chargement cyclique rapi-

de : souvent le travail des irréversibilités n'est pas suffisamment fort pour contribuer à une variation de température observable. L'excitation mécanique doit avoir une durée et une intensité suffisantes pour donner lieu à une carte de température intéressante sur la surface d'observation. L'idée d'imposer une sollicitation vibratoire rapide sur l'éprouvette afin d'augmenter l'énergie dissipée définit la technique de vibrothermographie.

On impose dans ce cas un mouvement de vibration forcée périodique. La réponse mécanique et thermique, supposée périodique, conduit à une élévation de température pratiquement stationnaire.

■ Minh Phong Luong, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de mécanique des solides (UA 317 CNRS).

■ Quoc Son Nguyen, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de mécanique des solides (UA 317 CNRS), Ecole polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex.

La mécanique de la rupture

Pout-on prévoir comment et jusqu'où une fissure, apparue dans un matériau, va se propager ? Si le modèle de rupture élastique est assez bien maîtrisé, il n'est applicable que dans certaines conditions.

Jean-Jacques Marigo

L'objet de la mécanique de la rupture est de décrire et de modéliser l'évolution de défauts macroscopiques dans un solide, tels les fissures, les trous ou les délaminages, jusqu'à la séparation du solide en deux ou plusieurs morceaux. Dans cette définition, il n'est question que de propagation de défauts préexistants mais pas de création de défauts, ces phénomènes d'initiation étant du ressort de la mécanique de l'endommagement.

Considérons la propagation de fissures. On constate expérimentalement que les mécanismes qui la régissent et les lois qui la gouvernent dépendent à la fois du type de matériau constituant la structure solide et du type de chargement. On distingue ainsi la rupture fragile, la rupture ductile et la rupture par fatigue.

La rupture fragile ou rupture élastique

C'est la plus étudiée, la mieux modé-

lisée et donc naturellement la plus utilisée. Considérons par exemple un tuyau dans lequel circule un fluide à la pression p et qui comporte une fissure circumférentielle partant de la paroi interne et de profondeur l_0 . L'objet de la mécanique de la rupture est alors de répondre aux deux questions suivantes : lors de la mise du tuyau sous la pression p , la fissure va-t-elle se propager, sa profondeur l_0 va-t-elle augmenter ? Si non, tant mieux, mais si oui, jusqu'où ? Traversera-t-elle toute l'épaisseur du tuyau, provoquant la rupture de celui-ci, ou bien s'arrêtera-t-elle avant ?

On ne peut évidemment répondre à ces questions qu'après l'introduction d'un critère de propagation de la fissure. En rupture fragile, ce critère est un critère énergétique. Sa formulation nécessite quelques préliminaires.

Envisageons le cas où le tuyau est sous la pression souhaitée p , mais où la fissure s'est propagée jusqu'à une profondeur l , et introduisons l'énergie potentielle correspondante du tuyau : $\Phi = \Phi(l)$, définie comme la somme de son énergie de déformation et du po-

tentiel des efforts de pression. On la définit en supposant que le tuyau se comporte élastiquement, hypothèse qui caractérise le modèle de rupture fragile. Son calcul effectif se fait généralement par ordinateur. Un exemple d'un tel calcul est illustré par la figure qui représente la norme des contraintes au voisinage de la fissure lorsque la profondeur de celle-ci est égale à la demi-épaisseur du tuyau.

A partir de cette énergie, on définit le taux de restitution d'énergie

$$G(l) = - \frac{d\Phi}{dl}(l),$$

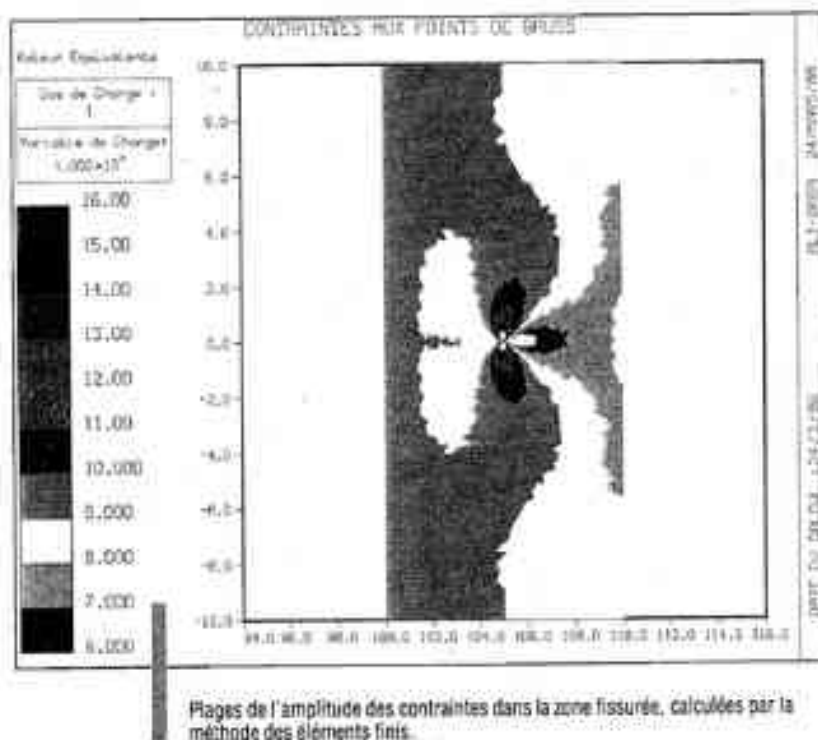
qui s'interprète comme la diminution d'énergie potentielle du tuyau lors d'une augmentation unitaire de sa surface fissurée à pression constante.

Le critère régissant la propagation de la fissure qui est adopté en rupture fragile est le critère ci-dessous introduit par A.A. Griffith en 1920 : lors de la mise du fluide sous la pression p , la profondeur initiale l_0 de la fissure n'évoluera pas si $G(l_0)$ est inférieur ou égal à une valeur critique G_c caractéristique du matériau. Sinon, si $G(l_0)$ est supérieur à G_c , alors la profondeur l de la fissure augmentera aussi longtemps que $G(l)$ reste supérieur à G_c .

Muni de ce critère de propagation, on peut alors répondre aux deux questions posées ci-dessus. Lors de la mise sous pression p , la profondeur de fissuration croîtra à partir de l_0 si et seulement si p est plus grand qu'une pression critique, notée $p_c(l_0)$, qui dépend de la profondeur de fissuration et qui se calcule facilement en fonction de G_c et de $G(l_0)$.

Si p est supérieure à $p_c(l_0)$, deux cas sont à envisager : s'il n'existe pas de profondeur de fissuration l supérieure à l_0 telle que $p = p_c(l)$, alors la fissure se propagera jusqu'à rupture du tuyau. Sinon, elle se propagera jusqu'à la plus petite profondeur de fissuration l_f supérieure à l_0 vérifiant $p = p_c(l_f)$.

Il ressort de l'analyse précédente que tout le problème se réduit au calcul de la fonction $l \rightarrow G(l)$ donnant l'assouplissement du tuyau dû à la propagation de la fissure. Ce calcul nécessite l'utilisation d'un ordinateur, il doit être mené avec le plus grand soin et requiert le développement de méthodes numériques appropriées essentiellement pour deux raisons : en revenant à la définition de $G(l)$, on s'aperçoit qu'il consiste en la dérivée d'une intégrale par rapport à un domaine variable ; les déformations et les contraintes tendent vers l'infini lorsqu'on se rapproche du fond de fissure.



Les autres types de rupture

La rupture fragile est un modèle idéalisé de la rupture réelle, car on suppose que le matériau se comporte toujours élastiquement ce qui n'est pas réaliste puisqu'alors les contraintes tendent vers l'infini en fond de fissure. Malgré tout, ce modèle donne des résultats satisfaisants dans les situations où la zone inélastique reste confinée en pointe de fissure, ce qui dépend à la fois du type de matériau et du type de chargement. On l'adopte par exemple pour des structures en verre, en béton

ou en acier, à température ordinaire, soumises à des chargements monotones ou de courte durée.

Sinon il faut changer de modèle. Par exemple l'acier à haute température (vers 500 °C) a un comportement viscoplastique important. On parle alors de rupture ductile. Sa modélisation passe par une étude fine des phénomènes en pointe de fissure. De nombreux travaux de recherche portent actuellement sur cela, mais un gros effort reste encore à faire.

De même lorsque les structures sont soumises à des chargements cycliques,

elles peuvent casser même pour des niveaux de chargement largement inférieurs au niveau critique prévu par le modèle fragile. On parle alors de rupture par fatigue. Ici encore, le phénomène pour être totalement maîtrisé nécessite une meilleure connaissance des mécanismes locaux en pointe de fissure.

■ Jean-Jacques Marigo, EDD*, direction des études et recherches, 1, avenue du Général de Gaulle, 92141 Clamart Cedex

Contrôle actif en mécanique des structures

Agissant sur la cause ou agissant sur l'effet, les contrôles actifs ont fait de tels progrès que l'on ne doute guère qu'ils se répandent dans de nombreux domaines de la mécanique des structures.

■ Roger Destuynder

Le principe de l'utilisation des contrôles actifs se développe très rapidement dans un grand nombre de domaines (aéroélasticité des avions, mécanique des systèmes, aéroélasticité, élastoacoustique).

Ces rapides progrès sont dus à l'usage de micro-ordinateurs très rapides et au développement d'organes de contrôle servovalve, servocommandes de plus en plus rapides permettant des contrôles dynamiques en temps quasi-réel : des vitesses de contrôle en rotation de 400° par seconde sont maintenant usuelles.

Il faut distinguer dans la grande famille des contrôles actifs deux catégories :

a) les contrôles en boucle ouverte qui se rapportent en général à des phénomènes à relativement basses fréquences dans lesquels on peut identifier le terme d'erreur avant qu'il n'agisse. On agit sur la cause.

b) les contrôles en boucle fermée, qui doivent agir très rapidement en prenant en charge un terme de réponse de la structure considérée. Dans ce cas, on agit sur l'effet.

La combinaison des deux types de contrôle peut exister dans certaines conditions : par exemple, le contrôle

actif de rafales sur un avion pour lequel on sépare les mouvements de l'avion rigide (mécanique du vol à basses fréquences) des mouvements résultant des vibrations des modes propres de la structure.

Exemple d'un contrôle actif « intelligent » travaillant en boucle ouverte : il concerne un train d'atterrissage d'avion. Le problème est de réduire les efforts encaissés par le train d'atterrissage lors du passage sur des trous ou des bosses de la piste au moment du décollage ou de l'atterrissage.

Il s'agit d'une part de détecter à l'avance les obstacles positifs (bosses) ou négatifs (creux) que les roues vont éventuellement rencontrer.

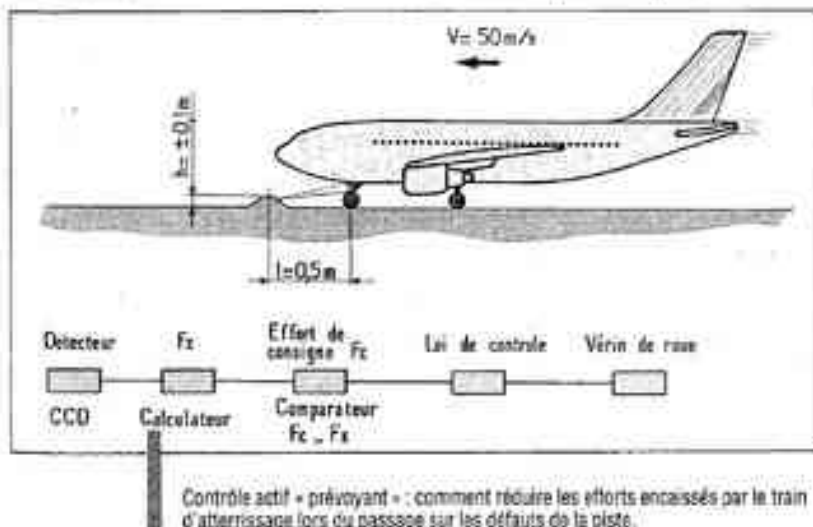
Dans le cas d'un contrôle actif non prévisionnel, l'atterrisseur connaît l'obstacle par l'effet qu'il produit sur les roues et doit donc réagir très brutalement. L'idée d'un contrôle prévisionnel est de détecter à l'avance l'obstacle et d'assurer par une loi progressive un contrôle de forces sur le vérin de la roue (voir figure).

Le contrôle de la présence d'un obstacle se fait à partir d'un émetteur à faisceau laser et d'un récepteur CCD (coupled charge device) qui capte le rayon réfléchi. La déviation du faisceau réfléchi caractérise la hauteur de l'obstacle.

Ce signal agit sur la servo-valve du vérin après passage dans un calculateur et comparaison avec la force de consigne du vérin. Cette différence fournira l'effort approprié pour contrer la réaction du train lors du passage sur l'obstacle.

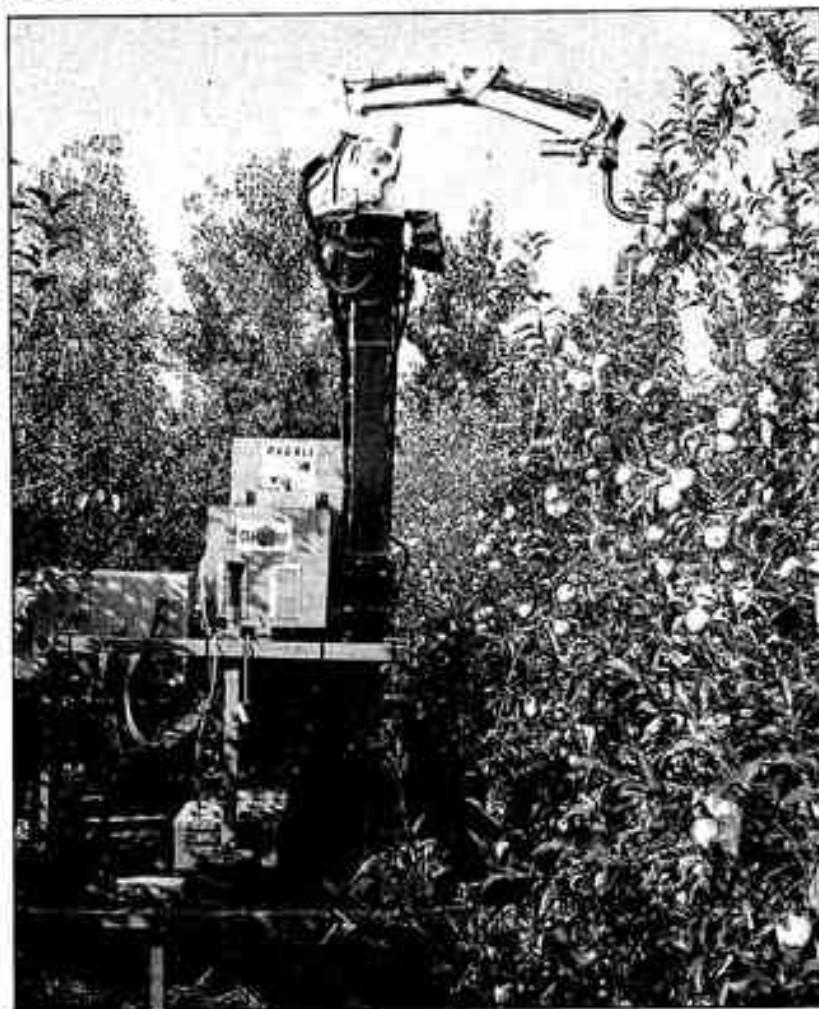
Ce système fonctionne en boucle ouverte, ce qui autorise des gains importants sans risque d'instabilité dans la boucle de contrôle.

■ Roger Destuynder, chef de la division « essais de maquettes en soufflerie », direction « résistance et structures », ONERA, 29, avenue de la Division Leclerc, 92320 Châtillon Cedex.



Mécanismes, contacts et tribologie

Machines capables d'interpréter et de raisonner, même de manière sommaire, les robots remplacent ou prolongent l'effort de l'homme. Là comme ailleurs, la tribologie, science des frottements et de l'usure, joue un rôle fondamental.



MAGAL (1986) : prototype de robot de récolte de fruits conçu et mis au point par le CEMAGREF, le LAMM, l'IRIAM et l'entreprise Pellenc et Motte. Le LAMM, Laboratoire d'automatique et de microélectronique de Montpellier (UA CNRS 371), a plus particulièrement participé à la conception du bras et de sa motorisation.

— Jean Frêne,
Jean-Claude Guinot

Les mécanismes sont des outils inventés par l'homme pour accroître sa force ou effectuer des tâches qu'il ne pourrait pas réaliser par lui-même. Ce sont des assemblages de corps indéformables ou déformables, associés par des liaisons mettant en jeu des mouvements relatifs entre corps contigus, et transmettant des efforts le long des chaînes cinématiques. Ces ensembles de solides obéissent aux lois de la mécanique classique pour décrire les propriétés des mouvements. Un des aspects cruciaux de ces assemblages réside dans la maîtrise des phénomènes existant dans les contacts : c'est l'objet de la tribologie. Outre les apports des techniques numériques et des systèmes informatiques associés pour la résolution de modèles décrivant le fonctionnement de ces mécanismes, les développements de la microélectronique conduisent aujourd'hui à doter ces ensembles de moyens interactifs capables d'interpréter certaines des évolutions du système et d'adapter son fonctionnement à l'environnement.

Des mécanismes aux robots

Depuis les premiers outils, des mécanismes et des machines furent inventés. Le système bielle-manivelle date du XV^e siècle, de même que les systèmes d'horlogerie. Les théories représentant les déplacements finis de solides datent seulement du début du XIX^e siècle.

Mais, en dotant les machines de capacités d'interprétation et de raisonnement, aussi rudimentaires soient-ils, on ébauche un nouvel outil capable d'auto-adapter ses fonctions : le robot. Il est nécessaire d'équiper la machine de

capteurs sensibles aux informations pertinentes et de modes de raisonnement, l'ensemble constituant une « machine intelligente ». Celle-ci doit être pensée par son concepteur en intégrant et en optimisant tous ses niveaux fonctionnels. L'un d'entre eux concerne la mécanique : maîtrise des déplacements, grands ou infinitésimaux, des vitesses, des accélérations, des efforts, des déformations, des jeux, des frottements... dans la suite des corps constituant la machine. La difficulté essentielle réside dans la contrainte de temps puisque le système doit répondre en dynamique et en « temps réel » et qu'il est actif.

Les modèles mécaniques permettent de connaître et d'analyser les mouvements de chacun des corps constituant le robot, dès lors que les chaînes cinématiques et les liaisons sont données. Mais le problème non résolu à ce jour est le problème inverse : définir le système de corps et leurs liaisons en se donnant certaines des conditions du mouvement. Ce problème général est connu sous le nom de synthèse des mécanismes.

La préhension et la locomotion

Les mouvements généraux des corps formant le robot répondent aux équations générales de la dynamique. Les moteurs permettant d'animer la structure ont eux-mêmes leur propre modèle, souvent non linéaire. Les coefficients de ces systèmes d'équations dépendent de la géométrie. Par exemple, les coefficients d'inertie peuvent varier d'un facteur 100, selon l'attitude du robot. Cette indication montre la difficulté de mettre en œuvre une véritable commande dynamique et on estime aujourd'hui qu'il faut gagner un facteur de 100 sur les temps de calculs en ligne pour la promouvoir. L'analyse simultanée des propriétés cinématiques et statiques des assemblages a permis d'établir un modèle puissant des outils de préhension - la main - du robot. La mise en évidence d'un critère minimal de stabilité de la prise définit la combinaison de tous les types de préhenseurs possibles, et conduit à énoncer les conditions pour saisir et manipuler, par le préhenseur, les objets. Des capteurs contrôlent ces mouvements simultanément aux efforts mis en jeu. Ces informations sont nécessaires pour réaliser des assemblages non élémentaires, ceux pour lesquels des structures de mains passivement déformables sont inopérantes. Une extension de ces modèles à la locomotion des robots mobiles est faite en considérant les éléments de motricité du véhi-

cule comme préhenseur particulier du terrain. Mais il faut noter que les technologies à promouvoir sont liées aux principes de navigation de la machine.

D'un point de vue industriel, on sait réaliser la plupart des tâches de manipulation d'objets rigides, qu'elles se fassent en boucle ouverte ou en utilisant des capteurs de reconnaissance de positions et de formes. Un problème encore ouvert, objet d'études et de développements actuels, réside dans la réalisation de cellules flexibles d'assemblages, pouvant s'adapter automatiquement aux variations de flux et de gammes de produits.

La lubrification, une nécessité économique

La tribologie regroupe tout ce qui touche à la lubrification, au frottement et à l'usure. Elle a pour but de faire fonctionner les liaisons ou les mécanismes qui existent dans toutes les machines. Elle cherche à diminuer le frottement et l'usure qui sont des sources principales de gaspillage d'énergie. En 1987, il a été estimé par l'ASME que 11 % de la consommation énergétique des Etats-Unis pouvait être économisée par la recherche et le développement dans le domaine de la tribologie. En France, le groupe VAMAS évalue à 2 % du Produit national brut les pertes dues à l'usure.

Sur le plan industriel, la tribologie regroupe trois grands secteurs :

- la lubrification basse pression (0,1 à 100 mégapascal) qui comprend les patins, les butées, les joints d'étanchéité... ce sont les contacts surfaciques ;
- la lubrification haute pression (jusqu'à 2 500 mégapascal) qui comprend les engrenages, les roulements... ce sont les contacts hertziens ;
- le frottement non lubrifié ou frottement sec.

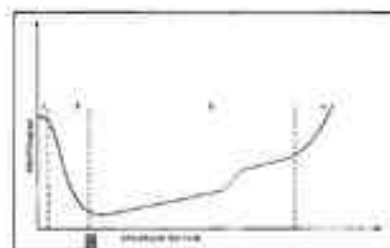
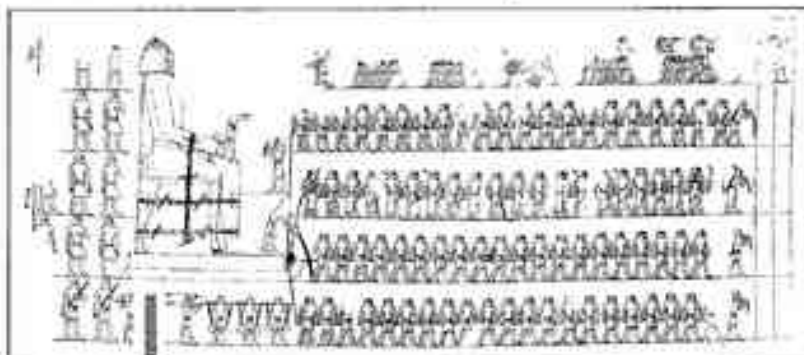


Fig. 1 - Courbe de Stribeck : cette courbe permet de préciser les différents types de lubrification qui peuvent exister dans un contact lubrifié.

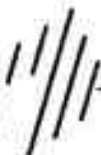
Du point de vue phénoménologique, il est admis aujourd'hui qu'un contact ne peut assurer ses fonctions que s'il existe un film intercalaire ou troisième corps qui sépare les matériaux en présence.

Dans les systèmes lubrifiés, il est commode de présenter les différents types de lubrification à partir de la courbe du frottement en fonction de l'épaisseur minimale du film (figure 1). Cette courbe met en évidence 3 ou 4 zones qui correspondent chacune à un type de lubrification. La zone 1 correspond à la lubrification limite pour les contacts surfaciques, et extrême pression pour les contacts hertziens. A faible pression, la séparation des surfaces est assurée par des molécules d'huile adsorbées et pour les contacts plus chargés, par des films formés par réaction chimique entre les matériaux et les additifs « extrême pression » contenus dans l'huile.

Dans la zone 2, l'effet hydrodynamique prend progressivement de l'importance et tend à séparer les surfaces qui restent encore en contact sur une partie de leurs aspérités, c'est la lubrification mixte. Dans la zone 3, un film de lubrifiant sépare totalement les surfaces. ▶



Scène d'une tombe d'El-Bercheh, à Karnak, figurant le transport d'un colosse fixé à un traineau. Un manoeuvre arrose le sol devant les patins. L'eau de lubrification est apportée par des hommes qui portent deux jarres suspendues à une balancette posée sur leurs épaules. (D'après El-Bercheh, Egypt Exploration Fund). (© Les Bâtisseurs de Karnak - Presses du CNRS)



► Pour les contacts surfaciques, cette zone correspond à la lubrification hydrodynamique; pour les contacts hertzien, les pressions élevées existant dans le contact déforment élastiquement les surfaces et modifient le comportement du lubrifiant, c'est la lubrification élastohydrodynamique. La zone 4 qui n'existe que pour les contacts surfaciques lubrifiés par des fluides peu visqueux correspond à la

lubrification hydrodynamique non laminaire.

Dans le domaine du frottement sec, le film intercalaire qui assure la séparation des surfaces peut provenir d'un revêtement initial ou être constitué de débris d'usure qui assurent la séparation entre les deux solides formant le contact. Le comportement rhéologique de ce film est encore très mal connu et fait l'objet de nombreuses recherches.

■ Jean Frère, professeur à l'université de Poitiers, responsable du Laboratoire de mécanique des solides (UA 861 CNRS), UER de sciences fondamentales et appliquées, 40, avenue du Recteur Pineau, 86022 Poitiers Cedex.

■ Jean-Claude Guinot, professeur à l'université de Paris VI, responsable du Laboratoire de robotique de Paris (URA 727 CNRS), université Pierre et Marie Curie, Ecole nationale supérieure des arts et métiers, tour 66, 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05.

La préhension du robot

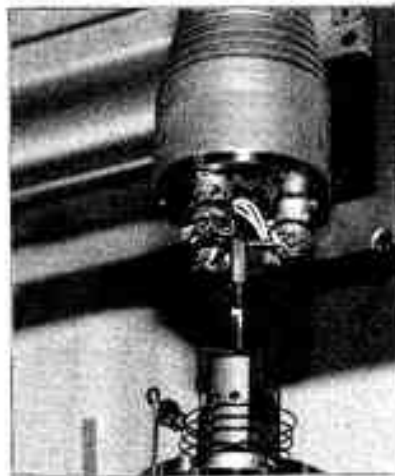
Le robot de troisième génération doit savoir saisir intelligemment une pièce pour effectuer sa tâche : choisir les points de contact, contrôler leurs glissements éventuels et serrer la prise sans abîmer l'objet.

■ Jean-Paul Lallemand

Un préhenseur doit répondre à un cahier des charges définissant un grand nombre de paramètres liés à la nature et à la géométrie des pièces à manipuler et à la tâche à réaliser : par exemple, simple prise et dépose sur un tapis roulant ou insertion à quelques microns de jeu. Le préhenseur devra-t-il avoir plusieurs doigts, les mouvements des doigts doivent-ils être couplés ou indépendants, le contact doigt-objet sera-t-il plan ou ponctuel, faudra-t-il une instrumentation et laquelle, devra-t-on prévoir des dispositifs tels que ventouses à vide ou magnétiques... ? Autant de questions qui trouvent leurs réponses dans l'analyse globale du problème.

Ainsi certains préhenseurs seront de conception simple, d'autres plus complexe. Il y a cependant quelques caractéristiques communes quelle que soit la complexité. On cherchera à obtenir un dispositif le plus léger possible et un encombrement réduit pour des questions d'accessibilité. Les calculs mécaniques devront être très soignés pour bien dimensionner le préhenseur. Celui-ci est en effet un organe soumis à des efforts relativement importants par rapport au poids de l'objet transporté. Pour définir correctement les dimensions et les matériaux du préhenseur, il faut faire l'analyse des forces de contact en relation avec les efforts développés par les articulations de ser-

rage et les sollicitations extérieures, celles-ci provenant des interactions avec l'environnement ou des effets d'inertie dans un transfert à grande vitesse. Le calcul des forces de contact n'est pas toujours simple, compte tenu du fait que l'ensemble objet-préhenseur constitue le plus souvent un assemblage hyperstatique. Il faut, pour résoudre le problème, prendre en compte la déformabilité du préhenseur (éventuellement celle de l'objet) qui dépend de ses dimensions, lesquelles ne sont pas encore totalement connues à cette étape du calcul : d'où la nécessité de procédures itératives. Il faut aussi se poser le problème de la stabilité de la prise et étudier les possibilités de glissement aux contacts, puis également considérer que les forces normales de contact ne peuvent agir que dans un seul sens. Finalement, ce genre de problème se ramène au plan mathématique, à la résolution de systèmes non linéaires sous contraintes d'inégalités.



Préhenseur instrumenté en capteurs d'efforts 6 composantes : sensibilité tactile $0,5 \cdot 10^{-4}$ N. Associé à un robot 6 axes, il réalise sous contrôle des efforts, des insertions et des vissages à 3 microns de jeu. © Laboratoire de mécanique des solides (UA 861 CNRS).

Il est particulièrement important, pour certaines applications, de donner de l'intelligence au préhenseur en le dotant d'instrumentation de sens tactile, celle-ci pouvant être complétée, pour la phase de localisation de l'objet avant la prise, par des détecteurs de proximité ou une caméra offrant la possibilité d'une stratégie de prise optimale. Des prototypes intégrant tout ou partie de cette instrumentation ont été réalisés, mais pour la préhension proprement dite, c'est le sens tactile qui est le plus important. Les capteurs tactiles peuvent être de type « peau artificielle » exploitant la variation de résistance électrique, d'inductance ou de capacité sous l'effet de la pression de contact. Ils sont généralement disposés en matrice et des travaux récents portent sur la miniaturisation visant à atteindre une résolution spatiale importante proche de celle de la peau humaine. Ces capteurs permettent la détection du toucher, mais pas encore l'évaluation de l'ensemble des forces d'interaction objet-préhenseur. D'autres types de capteurs répondant à ce double objectif ont été mis en œuvre et ont permis des progrès sensibles dans la réalisation de certaines tâches d'assemblage précis où les forces agissant sur l'objet doivent être contrôlées en permanence. Ces capteurs sont constitués par les doigts eux-mêmes équipés de jauges d'extensométrie. Dès lors, l'implantation de ces jauges exige une forme adéquate des doigts et des calculs précis afin de localiser de façon pertinente l'ensemble des jauges.

Les recherches actuelles portent sur la modularité et l'interchangeabilité des préhenseurs dans le cadre de l'enjeu des cellules flexibles d'assemblage. La maîtrise du maillon préhension dans l'ensemble des processus robotisés flexibles est en effet une condition nécessaire à leur réussite industrielle.

■ Jean-Paul Lallemand, professeur à l'université de Poitiers, Laboratoire de mécanique des solides (UA 861 CNRS), université de Poitiers, UER sciences fondamentales et appliquées, 40, avenue du Recteur Pineau, 86022 Poitiers Cedex.

Mouvements fins pour assemblages de précision

Un système d'assemblage robotisé flexible peut se concevoir sous forme d'une « main gauche » effectuant de petits mouvements précis et d'une « main droite » capable de grands mouvements plus approximatifs.

Philippe Bidaud

La génération de mouvements fins constitue un des problèmes clés de la robotique, notamment pour la maîtrise d'opérations d'assemblage à fortes contraintes dimensionnelles. Ce type d'applications suppose en effet une précision de positionnement relatif des objets manipulés bien souvent incompatible avec la précision absolue des manipulateurs industriels actuels.

On cherche alors à modifier les erreurs relatives dans le suivi de trajectoires en exploitant, sous forme active ou passive, les efforts développés au(x) contact(s) entre les pièces à assembler pour réaliser des mouvements dits « compliants ».

Ces mouvements compliants peuvent être engendrés par le simple fait de la déformation libre d'une partie ou de l'ensemble de la structure de manipulation, ou peuvent être stimulés en réaction à une information d'effort.

La première technique impose la maîtrise *a priori* de la géométrie ins-

tantanée de la structure déformable, afin que les déplacements induits soient de même direction mais de sens opposé aux efforts développés. La seconde, plus flexible, nécessite d'intégrer une instrumentation permettant l'identification du torseur des efforts d'interactions. Ces informations peuvent être alors utilisées pour commander en temps réel les déplacements relatifs des pièces en contact.

Les premières structures de commande réalisant le contrôle simultané des forces et déplacements dans l'espace de tâche furent construites autour d'un asservissement de position. Le contrôle des forces est alors implicitement obtenu par l'intermédiaire d'une fonction linéaire définie entre les efforts mesurés et les déplacements commandés. Des méthodes plus récentes prennent en compte de manière explicite, par une formulation unifiée, les contraintes de forces et de déplacements. Ce nouveau type d'architecture, dite hybride, fournit à chaque ac-

tionneur un signal de commande résultant de la contribution instantanée d'une consigne de force et d'une consigne de position.

L'utilisation de la structure mécanique d'un manipulateur, pour la génération de mouvements fins, par retour d'efforts, rencontre un certain nombre de difficultés dues notamment au fait que les commutations de modes d'asservissements et les frottements secs dans les articulations sont sources d'instabilités.

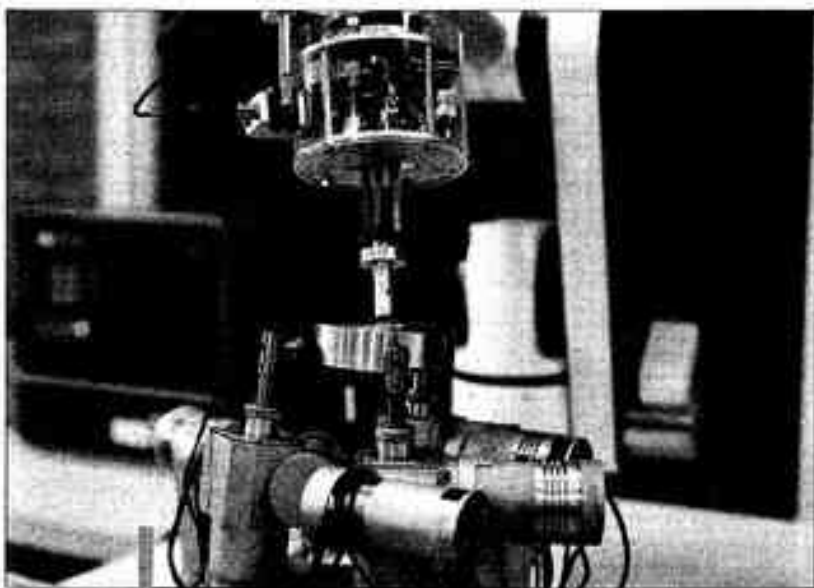
Par ailleurs, le support physique d'interfaçage des capteurs avec le contrôleur du système robot doit être compatible avec une exploitation temps réel des mesures, et donc permettre un rebouclage, à fréquence élevée, de ces informations sur la commande des actionneurs du manipulateur sans saturer les voies de communication.

Une autre approche consiste à placer, en parallèle du manipulateur principal, un micro-manipulateur capable de produire, sous contrôle d'efforts, des mouvements de faibles amplitudes avec une grande résolution. Cet organe spécialisé peut être interposé entre le dernier segment du manipulateur et le préhenseur, ou peut être intégré directement à l'organe de préhension. On parlera alors d'un préhenseur-manipulateur. Notons que dans l'un et l'autre des cas, le micro-manipulateur peut être utilisé comme une « main gauche active » coopérant avec la « main droite » du manipulateur.

D'une manière générale, la conception de ces organes compliants actifs doit répondre à plusieurs besoins : manipulation fine des objets, contrôle des efforts extérieurs et, de plus, si on intègre à ces organes la fonction de préhension, stabilité de la prise, compatibilité des déplacements des points coïncidants de contact durant la manipulation et contrôle des efforts intérieurs de serrage.

Obtenir une grande résolution dans les déplacements de l'objet en conservant une structure mécanique, légère et compacte, nécessite une architecture de chaîne cinématique complexe.

Ces technologies et techniques nouvelles génèrent des besoins en matière de planification automatique en ligne des mouvements fins et de langages adaptés à la spécification d'actions coordonnées des opérateurs matériels et sensoriels.



Assemblage à deux mains utilisant un préhenseur-manipulateur pour produire les mouvements fins correctifs.

Philippe Bidaud, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de robotique de Paris (URA 727 CNRS), Centre de robotique intégré d'Île-de-France (CRIF), 4, place Jussieu, Tour 66, 75252 Paris Cedex 05.

Les mécanismes articulés en robotique

Pour déplacer un objet d'un point fixe à un autre suivant une trajectoire définie, il est toujours possible d'imaginer des mécanismes à un seul moteur.

— Marc Dahan, Patrice Minotti

L'avantage des tels mécanismes réside dans la simplicité de leur commande et leur robustesse. Leur architecture (barres rigides et roulements) leur confère la stabilité, la précision et la rapidité nécessaires à une utilisation industrielle à grande cadence.

Un manipulateur spatial à un degré de liberté

Le mécanisme qui sert de base à la structure est un assemblage de quatre barres deux à deux égales, liées entre elles par des axes de rotation, et formant un quadrilatère non plan. La méthode de calcul liant les déplacements imposés de l'objet manipulé et les grandeurs géométriques du mécanisme est programmée en conception assistée par ordinateur (CAO) et permet de définir le manipulateur. C'est ce procédé de CAO qui donne la flexibilité de conception de manipulateurs bon marché. C'est ce qui a été fait pour une entreprise bisonnne, le manipulateur devant saisir des fonds de boîtiers de montres à la sortie d'un bol vibrant et les placer selon la bonne orientation

sur le tour d'usinage pour le façonnage du chapeau d'étanchéité.

Sur le même principe, un manipulateur de palettisation a été réalisé à partir d'une chaîne articulée plane à cinq barres avec deux moteurs.

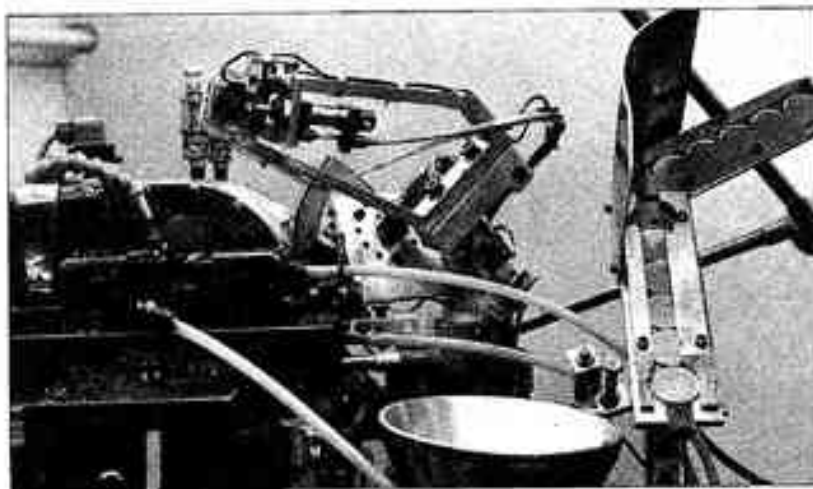
Des mécanismes d'équilibrage

Pour des raisons de fonctionnement et, surtout, de sécurité, un robot manipulateur doit être capable de porter son propre poids ainsi que celui de la charge manipulée.

Des études récentes ont permis de développer des modules d'équilibrage statique quelle que soit la position du robot relativement à la pesanteur. Ils associent des ressorts linéaires à des mécanismes plans. Ces modules, susceptibles de remplacer avantageusement les dispositifs actuels, s'intègrent aisément aux structures à chaînes ouvertes, mais aussi fermées.

— Marc Dahan, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de mécanique appliquée.

— Patrice Minotti, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de mécanique appliquée (UA 4 CNRS), université de Franche-Comté, Institut de productique, route de Gray, 25030 Besançon Cedex.



Mécanisme à un seul moteur permettant de prendre les boîtiers de montres — à droite sur la photo — et de les mettre en position sur le tour — partie gauche de la photo.

Robots déformables

Là où les effets d'inertie sont importants, là où une très bonne répétabilité est indispensable, on ne peut plus se contenter de décrire les mécanismes comme s'ils étaient formés d'éléments indéformables.

— André Barraco, Bernard Cuny

Récemment encore, les ingénieurs disposaient de peu de moyens pouvant les aider à prévoir et décrire le comportement dynamique des mécanismes complexes qu'ils avaient à concevoir. Les hypothèses les plus sévères étaient nécessaires : réduction d'un mécanisme de n degrés de liberté à n mécanismes d'un seul degré de liberté ; liaisons parfaites et non dissipatives, corps indéformables ; étaient les trois hypothèses généralement admises.

Les deux premières hypothèses ont pu être récemment abandonnées et des hypothèses plus larges adoptées, grâce au développement de l'étude des systèmes multicorps et à l'apparition sur le marché des codes automatiques de simulation de comportement dynamique. La troisième hypothèse, concernant l'indéformabilité des corps, est généralement admise, car l'abandonner signifie un accroissement important de la difficulté de mise en équations du phénomène. Cependant, supposer les éléments déformables permet de mieux décrire le comportement réel et devient parfois nécessaire pour certaines applications. Pour les manipulateurs spatiaux les vitesses sont faibles mais ils transportent de très lourdes charges (gros satellites) et les effets d'inertie provoquent d'importantes flèches dues à la déformation propre des éléments. Pour les manipulateurs travaillant à très grande vitesse et pour lesquels une très bonne répétabilité est exigée, non seulement la déformation des liaisons, mais également la déformation des membres eux-mêmes doivent être prises en compte. Notons également que le calcul des efforts, dans chaque liaison, devient possible quelle que soit la complexité du mécanisme, pourvu que l'on suppose les éléments déformables.

Ces raisons nous ont conduits à développer l'étude des modèles dynamiques de mécanismes et de robots for-

més d'éléments rigides et déformables.

En mécanique générale des solides indéformables, nous écrivons les principes généraux à un instant t , dans la configuration actuelle, dont la géométrie est connue, avec des champs de vitesse et d'accélération dont la répartition est connue. Ceci n'est évidemment plus possible pour les solides déformables.

Pour ces raisons les mécaniciens ont introduit « la représentation de Lagrange », qui transforme le domaine inconnu en un domaine connu, en général le domaine initial.

Certains auteurs ont montré que le problème formulé de cette façon n'avait de solution simple que si l'on réussissait une linéarisation autour de la configuration de référence; c'est l'hypothèse classique des petites perturbations (HPP). La réalité du comportement des mécanismes exclut cette possibilité de linéarisation car la transformation entre la configuration actuelle et la configuration de référence ne peut être linéarisée. D'où l'idée apparue autour des années 1975, de concevoir une linéarisation autour d'une configuration de référence arbitraire, dont le mouvement propre est indépendant du mouvement réel. Cette méthode a été appelée *description lagrangienne actualisée*. Il existe de nombreuses possibili-

tés d'associer, à la configuration de l'instant t , une configuration de référence dont le mouvement est connu. De ceci découle la multiplicité des approches des différents auteurs.

Citons les choix les plus fréquemment rencontrés :

- la configuration de référence est une configuration réellement occupée à un instant antérieur, en particulier elle peut être la dernière connue;

- la configuration de référence est une configuration déduite de la configuration initiale par une transformation en corps solide indéformable.

Lorsque les déformations du milieu sont infiniment petites, on peut considérer que la position du milieu à un instant t est peu différente de celle que l'on obtiendrait si l'on faisait l'étude du mouvement en solide indéformable. Parmi toutes les possibilités de choix de référence, se trouve évidemment celle qui correspond à l'étude en solide indéformable et c'est celle qui est choisie dans ce cadre d'étude. Nous rejoignons ainsi l'approche habituelle de l'étude des déformations des solides en mouvement : détermination du mouvement compte tenu de l'hypothèse d'indéformabilité, détermination des efforts et des accélérations; puis, à partir de ces quantités connues, calcul des déformations et des déplacements. Mais la géo-

métrie du milieu n'est pas « corrigée », ou « mise à jour ». Cette approche se justifie tant que les pièces sont suffisamment rigides. Les problèmes de dynamique et de calcul des déformations ont été découplés et résolus séparément.

Lorsque les déformations du milieu restent petites mais que leur influence sur le comportement dynamique est non négligeable, la référence ne peut être qu'un état déformé à un instant antérieur. Les équations sont alors complexes et traduisent un couplage entre les paramètres cinématiques qui décrivent pour les uns un déplacement en corps rigide, pour les autres un déplacement dû à la déformation elle-même.

Enfin, les équations représentant le système global doivent être complétées pour tenir compte du comportement électromécanique des actionneurs et des lois de commande des asservissements.

■ André Barraço, professeur d'université, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers.

■ Bernard Cuny, professeur agrégé de mécanique, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers, 151, boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris.

La robotique nucléaire

En introduisant l'ordinateur, les mécaniciens ont profondément modifié la relation maître-esclave qui caractérisait les téléopérateurs classiques de sources radioactives.

■ Gérard Fraize

Après la découverte des dangers de l'irradiation, toutes les ressources des mécaniciens ont été employées pour déplacer à distance les sources radioactives, charger les conteneurs blindés dans lesquels on devait les placer, et les manipuler derrière des fenêtres en verre lourd.

C'est ainsi qu'à partir de 1947 jusqu'à la fin des années 60, l'équipe de Raymond Goertz à Argonne National Laboratory (Chicago), lança le développement de presque tous les télémanipulateurs aujourd'hui connus. En 1948 était réalisé le premier télémanipulateur mécanique, ancêtre de toute la famille des manipulateurs dits « maître-esclave ». Les mécanismes originaux qui ont été développés à cette

occasion permettent ainsi à la pince située du côté « esclave » de reproduire rigoureusement tous les mouvements imprimés à la poignée par la main de l'opérateur.

La commande de ce manipulateur est bilatérale; en effet, si l'on attachait la pince à la place de la poignée et réciproquement, le fonctionnement serait identique.

En 1954, un appareil similaire reproduisant les mouvements par asservissement électrique bilatéral était réalisé pendant que, dès 1948, des manipulateurs motorisés à commande unilatérale, comparables aux engins de levage, étaient également développés aux États-Unis.

Les travaux européens et français ont suivi une évolution parallèle, notamment en France sous l'impulsion de

Jean Vernit, et ont permis le développement, puis l'exploitation, de nombreux engins de télémanipulation encore en usage aujourd'hui.

Problèmes liés à la conception des téléopérateurs nucléaires

La première contrainte qui pèse sur la conception des téléopérateurs nucléaires est liée à l'environnement. Les rayonnements électromagnétiques perturbent gravement le fonctionnement des systèmes électroniques et informatiques. Par ailleurs, la maintenance des équipements, pendant ou après leur passage en milieu contaminé, doit être intégrée.

L'autre contrainte majeure est liée à la sûreté; l'ensemble des installations, procédures et matériels répondent à des critères de sûreté très stricts. L'intervention d'un téléopérateur ne doit pas dégrader l'état de sûreté de l'installation (par des collisions par exemple), de plus, on doit s'assurer que l'opération effectuée par le téléopérateur restitue un état sûr de l'installation.

Du point de vue fonctionnel, l'ensemble des opérations directement liées aux procédés mis en œuvre par

► L'installation (maintenance de combustibles dans un réacteur, opérations de retraitements) est réalisée à l'aide d'automatismes sophistiqués dédiés qui permettent d'assurer une reproductibilité compatible avec les exigences de sûreté. L'usage de robots ou de téléopérateurs concerne, en général, les opérations de maintenance ou d'intervention sur ces équipements automatiques lourds. La tâche du téléopérateur ne peut donc être décrite précisément a priori. De même, l'environnement d'intervention du téléopérateur n'est que partiellement structuré suite aux variations subies par l'installation, d'où l'usage de téléopérateurs pilotés à distance par un opérateur humain. Le surcoût ainsi créé est en général négligeable par rapport au coût des équipements concernés et au coût de leur immobilisation. L'opérateur humain apporte, si l'ensemble des données lui sont correctement fournies, son expertise et sa capacité de décision ou d'action en temps réel.

La téléopération assistée par ordinateur

Afin d'accroître les performances des systèmes de téléopération, le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) s'est intéressé, sous l'impulsion de Jean Vertut, dès la fin des années 70, à l'introduction de l'ordinateur dans la boucle de commande. Les premières expérimentations ont pu être menées dans le cadre du projet national ARA. On a pu ainsi montrer l'intérêt du concept de téléopération assistée



Robot mobile d'intervention CENTAURE en milieu radioactif. © CEA.

par ordinateur (TAO) où l'on partage, en temps réel, des commandes entre l'homme et l'automatisme : ceci introduit un concept nouveau intermédiaire entre la simple projection des facultés de l'opérateur dans le milieu hostile (téléprésence) et les concepts de commande supervisée dérivés des acquis de la robotique manufacturière (programmation hors ligne).

Dans les téléopérateurs classiques, une relation bijective est construite entre les composants respectifs des univers maître et esclave.

Dans une machine de TAO, cette relation est gérée par la médiation d'un ordinateur. En ce sens, la symétrie est cassée, donnant naissance à de nombreux modèles de couplage entre les ressources du maître et de l'esclave ; ces modèles sont appelés modes de commande. A ce niveau le plus élevé de contrôle, la marge étroite entre TAO et robotique justifie l'utilisation de systèmes de commande évoluée implantés sur une architecture informatique distribuée.

Afin d'optimiser la coopération homme-ordinateur, les modes de commande sont gérés au niveau superviseur. Ces considérations nous ont conduits à une machine TAO contrôlée par deux opérateurs : l'opérateur d'exécution ou « opérateur tâche » et l'opérateur de supervision ou « opérateur de gestion ». L'étude du niveau de coordination a été effectuée par le Centre d'automatique de Lille, à partir de recherches sur l'allocation optimale de tâches entre l'homme et l'ordinateur fondée sur les capacités relatives des deux partenaires mesurées par des systèmes espions.

Depuis la fin du projet ARA, l'effort du CEA en téléopération avancée s'est poursuivi dans plusieurs directions, et en particulier dans les projets de robots nucléaires.

■ Géraud Fraize, adjoint du chef de l'Unité de génie robotique avancé, Institut de protection et de sûreté nucléaire, Centre d'études nucléaires, 60-68, avenue du Général Leclerc, B.P. 6, 92265 Fontenay-aux-Roses Cedex.

Recherche en productique



Portique de soudure laser : robot à structure cartésienne, poignet trois axes (© Renault-Automation).

■ Jean-Pierre Cochet

Renault-Automation mène toute une série d'actions de développement en robotique dont nous donnons ci-après quelques orientations.

- Introduction au sein de la gamme des robots forte charge d'un dispositif de chargement automatique de pince pour le soudage par résistance, avec tous les problèmes que pose le procédé (coupe-connexion de fortes énergies...).

- Etudes de robots-portiques pour le sondage laser : l'énergie mise en œuvre est telle qu'il est nécessaire, partant de ce qu'on sait fuir en découpe, d'élargir le chemin optique et de refroidir le poignet.

- Réalisations expérimentales de motorisation par entraînement direct, supprimant les systèmes de réducteurs. L'adoption de cette technique a des incidences importantes sur la partie commande numérique du robot, en

particulier sur la commande dynamique, compte tenu des phénomènes inertiels.

- En vision artificielle, le principal développement porte sur le recalage des référentiels, conduisant à un positionnement précis entre pièce et robot : ceci permet d'exploiter convenablement la programmation hors-ligne des trajectoires qui suppose que les référentiels pièce et robot sont invariables.

Citons enfin le domaine des capteurs : outre les perfectionnements engagés pour les systèmes de guidage automatique des robots mobiles, des travaux sont menés sur les capteurs d'effort pour les opérations d'ébavurage et, dans le domaine de la soudure à l'arc, sur la détection et le suivi en temps réel du joint.

■ Jean-Pierre Cochet, délégué à la recherche et aux produits, Renault-Automation, B.P. 70, 78152 Le Chesnay Cedex.

Le frottement sec

Arrachées aux matériaux lors du frottement, des particules transforment le contact à deux corps en un contact à trois corps.

■ Maurice Godet

Contrairement à la lubrification, il n'existe pas aujourd'hui une théorie générale du frottement sec. Ces deux disciplines ont suivi des chemins indépendants et leur réunion sous le vocable *tribologie* n'a pas suffi pour les rapprocher, car la lubrification est dominée par les mécaniciens et le frottement sec par les physiciens. Toutefois, la situation évolue et il est utile de s'appuyer sur la lubrification hydrodynamique pour présenter certains aspects modernes du frottement sec.

Les conséquences de l'évolution rapide du frottement sec sont importantes sur les plans fondamental et appliqué. En effet, en un demi-siècle, cette discipline est passée de l'étude des massifs (ou des matériaux), par l'étude des surfaces, à l'étude des interfaces, qui rassemblent les avancées dont nous parlerons ici.

L'étude des massifs s'appuie sur des résultats expérimentaux et débouche sur des lois d'usure ou de frottement, présentées comme intrinsèques aux matériaux.

L'étude des surfaces a marqué l'entrée de concepts scientifiques et a donné au frottement sec ses premières lettres de noblesse. Son apport sur les interactions entre matériaux en contact est déterminant dans la compréhension des mécanismes d'usure et de frottement.

L'étude des interfaces repose sur le constat qu'une particule détachée d'un des deux massifs en contact est obligatoirement piégée pendant un temps et ceci pour des raisons purement géométriques. Elle séjourne un temps dans un espace confiné et transforme un contact à deux corps en un contact à trois corps.

Les conséquences du passage du contact de deux à trois corps sont considérables à plusieurs niveaux. Elles conduisent d'abord à une réflexion qui implique physiciens du volume, physiciens des surfaces et mécaniciens et, ensuite, elles incitent à reformuler certaines réponses anciennes et à formuler quelques questions nouvelles.

La tribologie des interfaces remet en cause les mécanismes que sont les usures par adhérence, par abrasion,

par fatigue, etc., et leur substitue l'enchaînement qui comprend le détachement des particules des massifs en contact (ou premiers corps), le piégeage et la vie propre de ces particules (ou troisièmes corps) dans le contact, et leur élimination du contact et des zones d'alimentation connexes. Une particule détachée des premiers corps n'est donc pas nécessairement une particule d'usure.

Le troisième corps protège les premiers corps, il écrante les forces adhésives même quand, écroui, il devient abrasif.

L'usure est un débit. Sa source est dans les premiers corps, son puits à l'extérieur de la zone d'alimentation du contact. Le taux d'usure peut donc être contrôlé à la source comme au puits. Dans un contact à forte rétention de troisième corps, ce taux sera gouverné par le puits; dans le cas contraire, il sera gouverné par la source. La rétention est gouvernée par l'adhérence entre premiers et troisièmes corps, par la cohésion des troisièmes corps, par la forme du contact et par son environnement vibratoire. On voit la distance qui sépare cette vue de celle, classique, qui veut que le taux d'usure soit contrôlé à la source. Le calcul de ce taux, dans un cas donné, est aujourd'hui sans solution.

On retrouve, adaptés, les paramètres anciens des mécanismes lubrifiés: la condition d'adhérence à la pa-

roi, la viscosité du lubrifiant, la forme et le comportement dynamique du contact.

Le champ de vitesse entre premiers corps et l'identification des mécanismes d'accommodation de vitesse n'ont guère été étudiés en frottement sec. Or, des études récentes montrent que si cette accommodation se fait par cisaillement en lubrification, trois mécanismes existent en frottement sec: le glissement à la paroi, le cisaillement du troisième corps et la rupture à l'intérieur de corps, et qu'il est possible, pendant le même essai, de passer plusieurs fois d'un mécanisme à l'autre, avec des conséquences très importantes aussi bien pour le frottement que pour l'usure.

La tribologie des interfaces présente donc une unité et une complexité qu'il faut assimiler avant d'entreprendre des études de frottement et d'usure. Le comportement d'un contact est gouverné par la présence de ce troisième corps qui matérialise l'interface. Une recherche fondamentale moderne s'articule donc autour de la notion de formation et de maintien du troisième corps.

■ Maurice Godet, professeur à l'Institut des sciences appliquées de Lyon, Laboratoire de mécanique des contacts (UA 856 CNRS), Institut national des sciences appliquées, bâtiment 113, 20, avenue Albert Einstein, 69621 Villeurbanne Cedex.



Troisième corps obtenu en cours d'essais de frottement alternatif entre éprouvettes d'acier.

Le projet Carmen

— Marc Butet

L'Aérospatiale Bourges développe actuellement, avec le soutien de la Direction des recherches, études et techniques (DRET), une cellule robotisée unique en son genre, pour l'assemblage de pièces mécaniques avec manipulation de produits visqueux et pyrotechniques.

Ce projet a pour ambition de démontrer la faisabilité technique et économique de l'assemblage robotisé de produits de haute précision, figés par contrainte industrielle (ex. : insertion de roulements de diamètre 3 millimètres, ajustement H7h6) pour des volumes de production relativement faibles (2 000 produits/mois).

Parmi les impératifs de base qui ont présidé au choix de l'environnement matériel, citons la nécessité d'assurer une flexibilité maximum, le maintien de la qualité et l'utilisation minimum de technologies spécifiques.

Pour ce faire, on exploite un système robot constitué, pour sa partie mécani-

que, d'un manipulateur rapide à morphologie SCARA, d'un poignet compliant actif capable d'effectuer des insertions avec des précisions de quelques microns et d'un préhenseur flexible conçu pour assurer la manipulation de l'ensemble des composants.

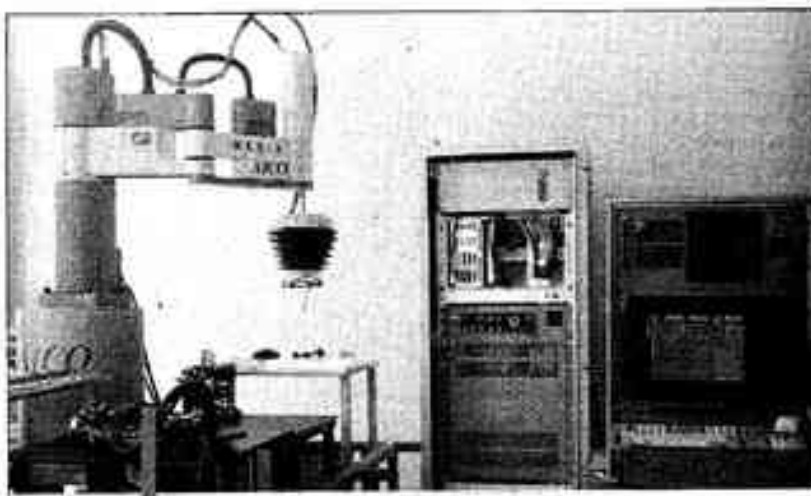
La distribution et le convoyage des composants élémentaires et des encours s'effectuent à l'aide d'un convoyeur à palettes en chaîne fermée.

L'ensemble du système robot et son environnement péri-robotique sont entièrement pilotés par une architecture informatique multi-processeurs sur fa-

quelle est implanté le système temps réel multi-tâches CESAR.

Les fonctionnalités tout à fait exceptionnelles de cet ensemble devraient permettre d'assurer une production flexible selon le concept « juste à temps » de trois sous-ensembles d'un missile avec la qualité exigée pour les produits Aérospatiale et permettant de minimiser les cycles d'assemblage.

— Marc Butet, chef de projets au service études de l'Aérospatiale, établissement de Bourges, 8, rue Le Brix, 18001 Bourges.



Vue de l'un des postes de la cellule robotisée CARMEN. (© ONERA-CERT).

L'adhérence

La séparation de deux solides en contact s'effectue par propagation d'une fissure qui chemine en rompant, les unes après les autres, les liaisons responsables de la force d'adhésion.

— Daniel Maugis,
Michel Barquins

Lorsque l'on approche deux solides l'un de l'autre, des forces d'attraction moléculaire se manifestent avant même que le contact soit établi. Ces forces, qui sont mesurables dès que la distance devient inférieure à quelques dixièmes de micromètre, augmentent jusqu'à la réalisation du contact et viennent s'ajouter aux efforts extérieurs, de la même manière que le champ magnétique accroît la pression d'appui d'un aimant posé

sur un substrat en fer doux.

Les forces d'attraction moléculaire ont une intensité qui dépend à la fois de la nature des liaisons — métalliques, ioniques, covalentes, hydrogène ou Van der Waals — assurant la cohésion des matériaux et de la présence d'éléments étrangers tels que couches d'oxydes et contaminants divers. Ces forces sont responsables de l'adhésion naturelle des solides, elles modifient le champ de contraintes dû aux efforts extérieurs et produisent, en général, des zones de contact plus larges que ne le prévoit la théorie de l'élasticité classique.

Le calcul ou la mesure de la force d'attraction (force d'adhésion) en fonction de la distance des solides que l'on rapproche ne permet pas d'en déduire la force nécessaire pour séparer les corps après contact. En effet, cette force (force d'adhérence) dépend d'un grand nombre de facteurs et de comportements. En premier lieu, la séparation ne s'effectue jamais d'un seul bloc, mais par propagation d'une fissure du bord vers l'intérieur des zones

de contact, jusqu'à ce que la rupture complète soit consommée. Cette fissure chemine plus ou moins rapidement en rompant successivement les liaisons rencontrées, suivant un mode similaire au fonctionnement d'une fermeture à glissière, de sorte que la force d'adhérence dépend de l'intensité des forces d'adhésion. De plus, la propagation de la fissure s'accompagne de déformations dissipatrices d'énergie, induisant une relation directe entre les effets rhéologiques et la force d'adhérence dont la valeur est fonction de la vitesse à laquelle on effectue la séparation. Ainsi, à chaque instant, la fissure adopte la célérité de propagation telle que l'énergie dissipée correspondante équilibre très exactement l'énergie élastique restituée du fait de la séparation.

La force d'adhérence dépend également de la forme des solides en contact, qui conditionne l'existence éventuelle de concentrations de contraintes, ainsi que de l'état géométrique des surfaces, la présence de rugosités sur des matériaux durs pouvant

faire disparaître l'adhérence, alors que l'adhésion n'est pas pour autant négligeable. Il arrive aussi que la liaison qui s'établit entre les deux solides soit suffisamment forte pour que le contact réalisé soit plus résistant que l'un des deux matériaux. On observe alors une rupture, dite cohésive, avec transfert d'un matériau sur l'autre. Dans les problèmes de collage, c'est ce type de rupture qui est recherché, par opposition à la rupture interfaciale, dite aussi adhésive, qui démontre, lorsqu'elle est observée, le mauvais pouvoir adhésif de la colle.

L'adhésion joue également un très grand rôle dans le frottement, bien qu'on ne sache pas précisément évaluer sa contribution dans l'énergie dissipée par frottement vis-à-vis du travail de déformation. À titre d'exemple, le frottement des matériaux métalliques en atmosphère raréfiée (ultra-vide) consomme une énergie considérable et conduit rapidement au grippage des éléments en contact, alors que dans l'air, et plus encore en présence de lubrifiant, le travail de frottement est modéré, bien que les propriétés mécaniques des matériaux soient inchangées. Pour ce qui concerne le frotte-



Frottement d'une bille de verre sur du caoutchouc: le déroulement des fils assure le mouvement relatif des deux solides, à la manière du mode de locomotion d'un escargot. (Cliché M. Barquins).

ment des matériaux caoutchoutiques, l'adhésion, quoique faible puisque n'entrent en jeu que des forces de Van der Waals, est responsable d'un mécanisme particulier de déformation qui se manifeste par la propagation de fils creux dans la zone de contact se décollant pour se recoller plus loin, assurant ainsi le déplacement relatif des solides (voir figure).

De nombreux efforts sont encore à faire pour comprendre ces phénomènes complexes d'adhérence et de frottement. Il semble que la mécanique de la rupture, par le couplage qu'elle permet entre les propriétés mécaniques et superficielles, soit un outil de choix pour atteindre ce but.

■ Daniel Maugis, directeur de recherche au CNRS, responsable de l'équipe de recherche de mécanique des surfaces (ER 259 CNRS).

■ Michel Barquins, directeur de recherche au CNRS, responsable de l'équipe de recherche de mécanique des surfaces (ER 259 CNRS), Laboratoire central des ponts et chaussées, Service de physique, 58, boulevard Lefebvre, 75732 Paris Cedex 15.

Contact lubrifié sous haute pression

Parfois, les pressions exercées sur les lubrifiants sont telles qu'elles modifient leur comportement et entraînent une déformation élastique des surfaces dans la zone de contact.

■ Gérard Dalmaz

La lubrification des contacts existant dans les mécanismes est élastohydrodynamique (EHD) lorsque les pressions dans les films de lubrifiants qui séparent les surfaces en mouvement sont suffisamment élevées pour entraîner des déformations élastiques des surfaces dans le voisinage des contacts. Dès 1950, il a été montré qu'il pouvait exister des pressions hydrodynamiques très élevées dans les films de lubrifiants, localisées dans des zones de contacts de faibles dimensions devant les rayons de courbures locaux des surfaces et susceptibles de séparer complètement les surfaces en contact.

Un contact EHD peut être schématisé par la figure 1 qui représente une section de la zone de contact dans les axes Oxz liés au centre O du contact. L'épaisseur du film de lubrifiant suivant la normale Oy est très petite devant les autres dimensions de l'écoulement dans le plan tangent suivant les

axes Ox et Oz .

Le fonctionnement d'un contact EHD repose sur:

- La lubrification hydrodynamique. Un champ de pression $p(x,z)$ et une portance w ne peuvent être créés que lorsque les surfaces du contact sont en mouvement, qu'il existe un convergent à l'entrée du contact et que le lubrifiant est visqueux.

- La déformation élastique $v(x,z)$ des surfaces de solides qui bordent le film de lubrifiant. Les pressions maximales sont typiquement de 1 GPa, les aires de contact de 0,1 mm² et les déformations de quelques μ m pour des solides en acier.

- L'augmentation de la viscosité μ des huiles lubrifiantes avec la pression caractérisée par le coefficient de piézo-viscosité α . Ainsi, à température constante, une huile de viscosité $\mu_0 = 0,1$ Pa.s à pression atmosphérique a une viscosité $\mu = 10^6$ Pa.s à la pression de 1 GPa.

En régime EHD, l'épaisseur du film dépend très peu des modules d'élastici-

té des matériaux constituant les solides en contact et de la charge normale w , mais beaucoup de la somme des vitesses des deux surfaces $U_1 + U_2$, de la viscosité μ_0 du lubrifiant à l'entrée du contact et du coefficient de piézo-viscosité α .

Un exemple d'épaisseur de film $h(x,z)$ obtenu en résolvant numériquement l'équation des films minces visqueux, ou équation de Reynolds, et l'équation des déformations élastiques des surfaces du contact est donné sur la figure 2.

La vérification expérimentale du bien-fondé des résultats théoriques a été effectuée sur un dispositif d'étude du contact EHD qui permet de mesu-

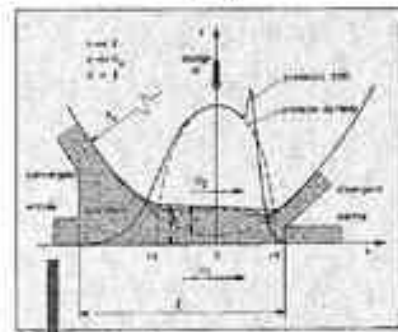


Fig. 1 - Schématisation du contact EHD.

► rer les épaisseurs de film comprises entre 0,1 et 1 μm par une méthode interférométrique (voir la figure 3).

Le lubrifiant qui est entraîné par les surfaces en mouvement vers le centre du contact est soumis à des variations de pressions de l'ordre de 1 GPa, de gradient de vitesse de l'ordre de 10^6 s^{-1} , et à des variations de températures pouvant atteindre 200 °C lorsque les vitesses de glissement sont importantes, pendant un temps très court de l'ordre de 10^{-6} s . Dans ces conditions, le comportement du lubrifiant n'est plus simplement visqueux. Cependant, cette hypothèse reste réaliste pour le calcul des épaisseurs de film et des pressions, car les phénomènes hydrodynamiques sont localisés dans le convergent, à l'entrée du contact. Par contre, les contraintes de cisaillement sur les parois et les forces de frottement dépendent essentiellement du comportement rhéologique en cisaillement du lubrifiant dans la zone de hautes pressions.

L'étude de la lubrification élastohydrodynamique qui correspond à un régime de fonctionnement compris entre la lubrification hydrodynamique et la lubrification limite a permis de mieux comprendre et d'améliorer le fonctionnement et la durée de vie de mécanismes tels que les engrenages et les roulements. Les développements de la lubrification élastohydrodynamique concernent : la rhéologie du lubrifiant, les effets thermiques, le régime transitoire, les rugosités des surfaces, l'alimentation des contacts en lubrifiant et la lubrification par des fluides diphasiques.

Gérard Dalmas, professeur à l'université Claude Bernard de Lyon, Laboratoire de mécanique des contacts (UA 856 CNRS), Institut national des sciences appliquées de Lyon, bâtiment 113, 20, avenue Albert Einstein, 69621 Villeurbanne Cedex.

Fig. 3 - La mesure de l'épaisseur du film lubrifiant qui sépare les deux surfaces en mouvement d'un contact a été réalisée par une méthode interférométrique. Les franges (« anneaux de Newton ») indiquent les courbes d'égale épaisseur lorsque, en régime permanent, l'état d'équilibre est obtenu. En lumière blanche, chaque couleur correspond à une épaisseur de film bien déterminée. La photographie montre la topographie d'un contact sphère-plan en régime élastohydrodynamique. L'épaisseur du film d'huile est de 0,33 μm (jaune) au centre du contact, et de 0,12 μm (blanc) sur les bords. La zone de séparation air-huile est également visible à la sortie du contact.

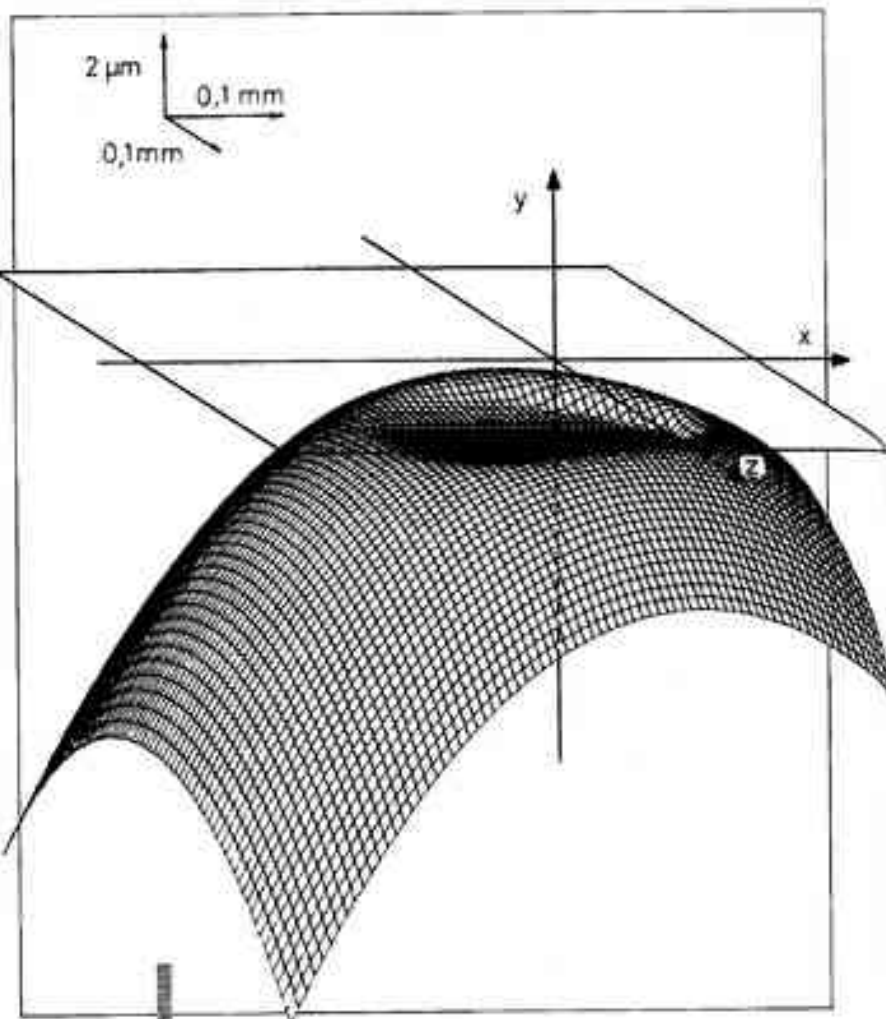
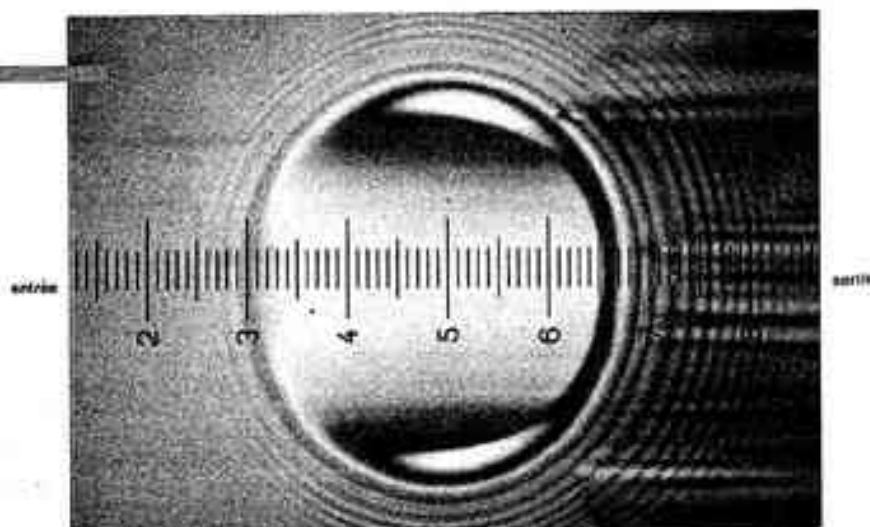


Fig. 2 - Épaisseur du film lubrifiant calculée dans un contact élastohydrodynamique ponctuel. Il s'agit du contact d'une sphère d'acier roulant, sous une charge, sur un plan d'acier.



Régimes limites et tribologie

Que se passe-t-il à la surface de deux solides cristallisés séparés par un film amorphe soumis à un effort de cisaillement ? Pour le savoir on modélise la situation à l'aide de lits de bulles de savon.

Jean-Marie Georges

En tribologie le chercheur est appelé à évaluer l'aire de contact entre les solides, et à analyser le comportement des interfaces entre les solides constituant les mécanismes. Les régimes limites correspondent à la manifestation des premières couches des surfaces solides. Il s'agit des couches

adsorbées ou des produits de réactions chimiques.

Sous l'action du frottement, les films superficiels sont malaxés et subissent une pression très forte. Dans des volumes très réduits dont l'épaisseur ne dépasse pas le dixième de micromètre, les colloïdes interfaciaux sont cisailés. Un matériau étant régi par les liaisons intermoléculaires ou atomiques et la structure, il est important de comprendre comment la microstructure influe sur la nature de l'écoulement et sur le cisaillement.

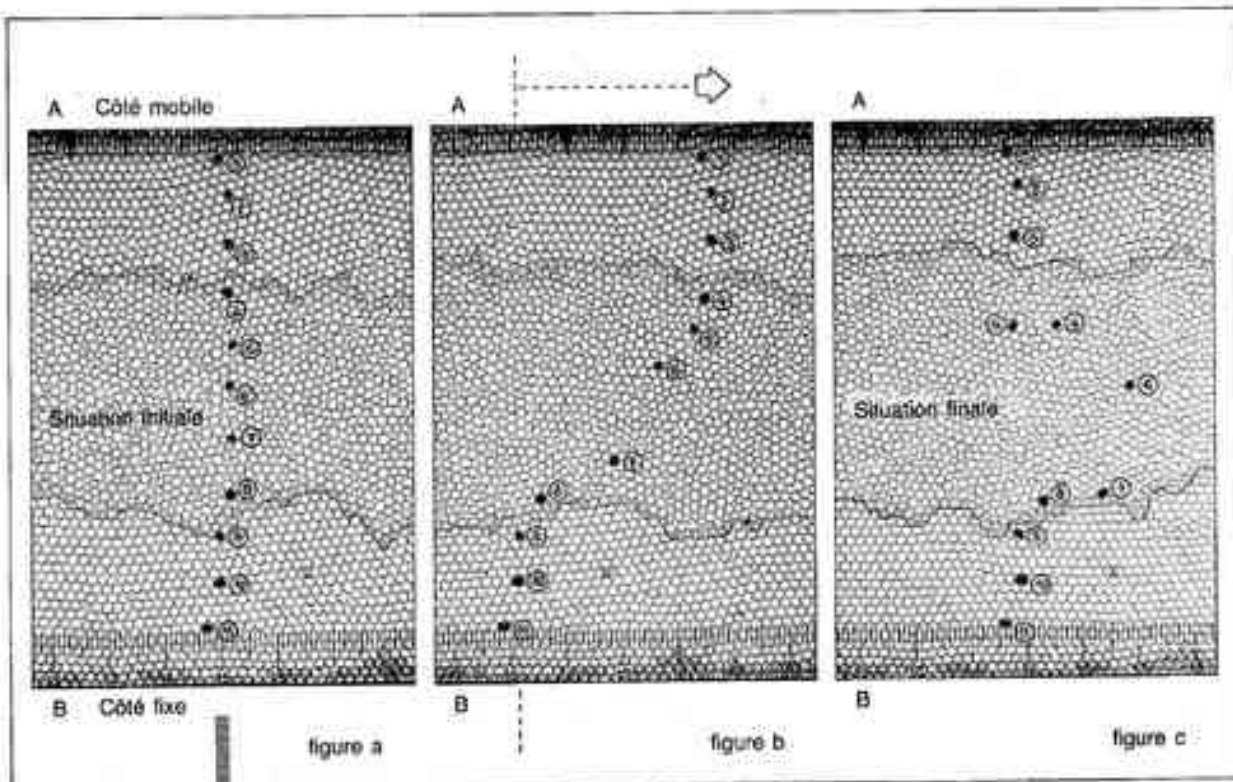
Les expériences de frottement sur les films limites nous ayant montré une amorphisation des couches superficielles, nous avons cherché à modéliser le comportement en grandes déformations d'un film cisailé.

Nous avons utilisé pour cela un lit bidimensionnel de bulles de savon mis à l'honneur par Sir L. Bragg. En effet, si à la surface d'une eau savonneuse on souffle des bulles d'air de même diamètre, on réalise un lit cristallisé. Le potentiel d'attraction et de répulsion entre les bulles, qui est dû à la tension superficielle et à la pression de l'air, gouverne le comportement physique du lit tel que le mouvement des disloca-

tions. Si l'on souffle deux types de bulles, on réalise une structure amorphe, si les diamètres sont convenablement choisis. Nous avons étudié le cisaillement d'un lit amorphe bordé par deux lits cristallins tel qu'il est représenté sur la figure. Des petites boules noires de latex permettent de visualiser grossièrement le champ de déplacement. On se rend aisément compte que, par suite des micromouvements dans le film amorphe, le cisaillement du lit conduit à une diffusion des espèces vers les bords. On a pu montrer que ce phénomène conduisait à une destruction bulle par bulle du lit cristallisé, ayant pour conséquence une amorphisation du lit.

Cet exemple montre combien l'analyse mécanique des phénomènes microscopiques présents dans les problèmes de tribologie doit être couplée avec une analyse physicochimique du matériau interfacial.

Jean-Marie Georges, professeur à l'École centrale de Lyon, responsable du Laboratoire de technologie des surfaces (UA 855 CNRS), bâtiment B 10, 76, avenue Guy de Collongue, B.P. 163, 69131 Ecully Cedex.



Expérience de simulation de frottement avec des bulles de savon : figure a, le lit cristallisé A se déplace parallèlement au lit B avec une vitesse constante (1 mm/s). On note que toute la déformation se produit dans le lit amorphe central, grâce à des déplacements relatifs de clusters de 5 à 6 bulles (figure b). La figure c correspond à 20 déplacements alternés.

Frottement et formage des métaux

Modéliser les conditions de contact entre l'outil et le produit n'est pas une mince affaire. Aux lois qui tentent de représenter le frottement, il faut ajouter ce qu'on sait sur la surface des matériaux en contact.

— François Delamare

Du frottement à l'interface outil-produit dépend en bonne partie la rentabilité des procédés. Qu'il faille le minimiser (tréfilage), le contrôler globalement (laminage) ou localement (forge), c'est de lui que dépend souvent la géométrie finale du produit et son état de surface.

A bien des égards, les conditions macroscopiques du contact outil-produit peuvent être qualifiées d'« outrancières » par rapport à celles qui règnent généralement dans les contacts. Et particulièrement dans le cas du formage des métaux, où l'on relève les particularités suivantes :

- un contact à très haute pression (jusqu'à 3,3 giga pascal (GPa) et à dissymétrie mécanique très marquée (élastique côté outil, et plastique, viscoplastique ou visco-élastique de l'autre). L'un des corps s'écoule le long de l'autre.
- des flux thermiques importants aux interfaces :

— des échauffements locaux de 200 °C sont courants, mais peuvent atteindre 1 000 °C (usinage).

— une dissymétrie thermique importante en formage à chaud (outil à 100 °C, produit à 1 000 °C).

• une géométrie complexe et souvent instationnaire (forge).

• un accroissement de l'aire de la surface du produit avec apparition de surface atomiquement propre dans le contact.

Du fait de la difficulté d'obtenir des données expérimentales sur ces contacts, on a largement recouru à leur modélisation.

Elle aussi présente un certain nombre d'originalités. La première est que le calcul des conditions de contact se fait pour celui des deux matériaux qui s'écoulent. Pour le formage des métaux, le calcul se fait donc à partir de la théorie de la plasticité. On sait que les méthodes de calcul numérique utilisant les éléments finis permettent de calculer pour des pièces tridimensionnelles, à chaque instant, la répartition des contraintes, des déformations et des vitesses de déformation en tout point des matériaux dotés d'une rhéologie complexe. Ces données constituent les « conditions de travail » de l'interface.

En fait, l'utilisation tribologique de ces codes pose le problème aigu de la nature de la loi de frottement qu'il convient d'y insérer. Du fait de la

complexité de la réalité (grand nombre de paramètres couplés par la température), celle-ci ne peut guère qu'être schématisée par une loi exprimant la mission de frottement en fonction d'une variable, contrainte normale (loi de Coulomb), contrainte d'écoulement du produit (loi de Tresca) ou vitesse de glissement (loi de Norton), ou d'une combinaison de celles-ci. Ces lois restant très schématiques, il est indispensable de déterminer des lois plus réalistes à partir des phénomènes physiques intervenant à l'échelle microscopique.

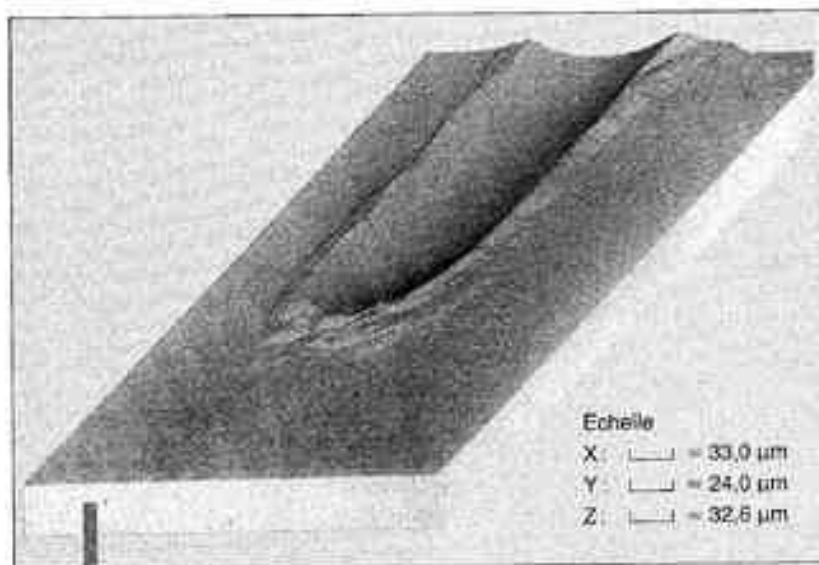
A cette échelle, il faut prendre en compte la nature de la surface des matériaux en contact et le « 3^e corps » (le lubrifiant). On retrouve ici les deux types classiques de lubrification, par film épais et film mince, mais avec certaines particularités.

En lubrification par film liquide épais s'installe un régime d'hydrodynamisme dit « plasto-hydrodynamisme » (PHD), dans lequel deux des trois corps du contact s'écoulent : le produit et le lubrifiant. Le calcul de l'épaisseur locale du film liquide se fait en couplant les modélisations des écoulements plastique et hydrodynamique. Mais on ne sait encore décrire que très imparfaitement la rhéologie des lubrifiants sous des pressions de l'ordre du GPa et des vitesses de cisaillement qui peuvent atteindre 10^3 s^{-1} . On est également dans l'incapacité de prendre en compte les phénomènes thermiques qui présentent de très forts gradients.

De plus, l'écoulement plastique du produit s'accompagne d'un plissement de sa surface — elle devient rugueuse et mate — qui tend à déstabiliser le régime de lubrification.

Dans le régime par film mince, on sait que se crée progressivement un troisième corps qui, peu à peu, adoucit les conditions du contact. Cela se fait par réaction chimique des additifs du lubrifiant sur les surfaces frottantes et les particules d'oxydes qui, sans cesse, s'échangent entre les surfaces frottantes (transfert). En formage, le renouvellement incessant du produit gêne grandement la formation de ce troisième corps et donne une importance toute particulière aux cinétiques des réactions tribo-chimiques et des transferts de matière. Il en résulte un accroissement des risques d'usure abrasive des outils. D'où le succès spectaculaire dans ce domaine des revêtements très durs pour outillages.

— François Delamare, maître de recherche à l'École des mines de Paris, Centre de mine en forme des matériaux (UA 852 CNRS), École des mines de Paris, Sophia-Antipolis, 06560 Vallbonne.



Microtopographie d'une tête de rayure. La théorie de la plasticité permet de modéliser la formation des micro-rayures, composante du frottement et fondement de l'abrasion.

Des lubrifiants non conventionnels

On est parfois contraint de remplacer des huiles lubrifiantes par des fluides très peu visqueux. Ces fluides non conventionnels posent, entre autres, des problèmes lors du passage aux grandes vitesses de rotation.

Daniel Nicolas,
Bernard Degueurce

On associe généralement lubrification hydrodynamique ou hydrostatique et huiles lubrifiantes. En pratique, il en est autrement car tout fluide peut servir de lubrifiant : l'ammoniaque liquide intervient comme lubrifiant dans l'industrie chimique, l'eau surchauffée dans les pompes primaires des réacteurs nucléaires à eau pressurisée, et le sodium liquide dans celles des surgénérateurs. Les turbopompes qui équipent les fusées Ariane, ou la navette spatiale, utilisent l'oxygène ou l'hydrogène liquide comme lubrifiant.

L'utilisation de fluides très peu visqueux comme lubrifiant pose des problèmes spécifiques liés à leur mauvais comportement en lubrification limite et à leur faible viscosité dynamique. Certains de ces effets ne peuvent pas être corrigés, comme on le fait pour les huiles lubrifiantes, par adjonction d'additifs. Il est nécessaire de choisir avec précaution le couple de matériaux afin d'éviter la destruction des surfaces par corrosion chimique ou usure brutale lors des contacts fortuits et au cours des phases de démarrage et d'arrêt.

Par ailleurs, l'utilisation d'un lubrifiant de faible viscosité entraîne des changements du régime d'écoulement : à basse vitesse le régime peut être lami-

naire, mais à grande vitesse il est souvent turbulent car les nombres de Reynolds caractéristiques sont très élevés.

Dans les paliers, le passage du régime laminaire au régime turbulent s'effectue de manière progressive par l'intermédiaire d'un régime de transition : les tourbillons de Taylor, qui se développent dès que le nombre de Taylor défini comme le produit du nombre de Reynolds par la racine carrée du jeu relatif :

$$Re = \frac{\omega RC}{\mu} \sqrt{\frac{C}{R}}$$



Visualisation de l'écoulement dans le film lubrifiant d'une butée hydrodynamique lubrifiée à l'eau : développement des tourbillons en régime non laminaire

$Re_{min} = 1\,000$ $Re_{max} = 2\,440$ $h_{min} = 0,5\text{ mm}$ $h_{max} = 0,65\text{ mm}$

atteint une valeur critique qui peut être approchée par la relation semi-empirique $T_c = 63,3 \epsilon^3 - 38 \epsilon + 41,2$ où ϵ est l'excentricité relative.

A ce jour, le calcul des performances des mécanismes à grande vitesse et lubrifiés par des fluides de faible viscosité se heurte à des difficultés de modélisation et de convergence numérique. En effet, la prise en compte des forces d'inertie dans le fluide en régime turbulent conduit à des problèmes non linéaires très difficiles à résoudre.

Daniel Nicolas, professeur à l'université de Poitiers, Laboratoire de mécanique des solides (UA 861 CNRS), 40, avenue du Recteur Pineau, 86022 Poitiers Cedex.

Bernard Degueurce, chef du groupe Tribologie et essais de compresseurs, Direction des études et recherches, service ensembles de production, département machines, Electricité de France (EDF), 6, quai Watier, 78401 Chatou Cedex.

Tribologie spatiale

Les conditions physiques extrêmes auxquelles est soumise la surface des matériaux utilisés dans les engins spatiaux impliquent, à leur égard, des solutions originales. Ainsi est née une véritable tribologie de l'espace.

Jean Blouet, René Gras,
Michel Armbruster

Les engins spatiaux : lanceurs, satellites, navettes comportent des composants tribologiques nombreux et variés soumis à des sollicitations sévères durant les phases principales d'une mission.

• Phase de qualification et réception : la tribologie spatiale débute à terre lors de la qualification et de la réception des mécanismes. Les conditions de charge, pour vérifier l'aptitude au vol, sont souvent plus sévères que celles rencontrées en orbite, consommant ainsi une partie de la vie disponible des films lubrifiants. Le transport et le

stockage peuvent aussi pénaliser les surfaces.

• Phase de lancement : elle implique tous les organes assurant la propulsion et le guidage du lanceur et concerne le comportement futur des équipements transportés. La tribologie intervient au niveau des organes d'alimentation des moteurs et de guidage du lanceur. Les points marquants de leur fonctionnement sont :

- une accélération et des vibrations importantes,
- une durée de vie limitée mais une grande fiabilité,
- des impératifs de puissance et de légèreté. (La turbopompe du moteur cryogénique du 3^e étage d'Ariane pré-

► sentée sur le cliché développe 380 kilowatts à 60 500 tours/minute pour une masse de 28 kilogrammes).

- un environnement sévère : ergols, gaz de combustion, vide,
- des températures excluant la présence de lubrifiants classiques. Les fluides cryogéniques ne possédant que de très faibles propriétés lubrifiantes, la caractérisation du comportement tribologique des matériaux dans ces conditions extrêmes s'est donc révélée indispensable pour les calculs prévisionnels.

- Phase orbitale : en phase orbitale, les mécanismes des satellites peuvent être monocoups (c'est le cas des mécanismes de déploiement d'antenne), ou bien avoir une longue durée de vie (plusieurs années) tels que ceux qui assurent à tout instant l'orientation des générateurs solaires.

L'environnement orbital se caractérise par :

- une basse pression et une composition fonction de l'altitude,
- des températures qui peuvent varier entre 173 et 453 K,
- un rayonnement électromagnétique principalement dû au soleil,
- un rayonnement particulaire,
- l'absence de pesanteur.

Les surfaces vont donc fonctionner dans un vide poussé. Les phénomènes de dégazage, désorption, évaporation,

condensation imposent des conditions supplémentaires dans le choix des matériaux tribologiques.

- Phase de rentrée dans l'atmosphère : les systèmes passent de l'ultravide à l'atmosphère terrestre. Les structures subissent des efforts dus à l'aérodynamique, aux effets de la pesanteur, aux décélérations et sont portées à des températures très élevées (400 à 1 000 degrés Celsius pour certaines articulations de gouverne).

Ces conditions exigent de la part des



Turbopompe LH/LQx du moteur HM, (3^e étage d'Ariane)
Mécanisme développé sous maîtrise d'œuvre de la Société européenne de propulsion. (C) SEP.

matériaux une bonne résistance à des contraintes et températures élevées ainsi qu'à la corrosion oxydante. Sachant que des mécanismes d'avarie sont régis par des mécanismes thermoactifs, il importe de trouver des matériaux dont les seuils d'activation se situent au-delà des plages de fonctionnement. Le recours aux métaux réfractaires, aux céramiques et aux lubrifiants solides s'avère nécessaire.

Le rôle primordial des organes tribologiques dans les systèmes spatiaux a été nettement et largement mis en évidence par l'expérience. Si des succès remarquables ont été obtenus à ce jour, il faut souligner que la tribologie spatiale n'est qu'à l'aube de son développement car les faiblesses exigées posent de nombreux défis scientifiques, techniques et industriels.

■ Jean Blouet, professeur à l'Institut supérieur des matériaux et de la construction mécanique (ISMCM), directeur du Laboratoire de tribologie.

■ René Gras, professeur à l'ISMCM, directeur adjoint du Laboratoire de tribologie ISMCM, Centre d'études supérieures des techniques industrielles (CESTI), 3, rue Ferdinand Hainaut, 93407 Saint-Ouen Cedex.

■ Michel Armbruster, ingénieur, président de la Société française de tribologie, direction centrale technique, Aérospatiale, 37, boulevard de Montmorency, 75016 Paris.

Suspension interactive

Le progrès représenté par un système de suspension-freinage hydraulique dans une voiture est le fruit d'études où se rencontrent les multiples aspects de la mécanique actuelle.

■ Jacques du Parquet

La direction assistée, le freinage sous pression et la suspension hydrodynamique des véhicules automobiles (solution commercialisée par Citroën en 1955 sur le modèle DS 19) constituent un exemple de mécanisme sophistiqué bien connu du grand public.

Le principe du circuit hydraulique est classique : la pompe transfère l'énergie aux organes de freinage, de direction et aux bras de suspension par l'intermédiaire d'un fluide sous pression qui sert aussi à lubrifier les pièces en mouvement et à les protéger contre la corrosion. Le développement du système a fait appel à de nombreuses disciplines, dont la tribologie.

La rapidité de réaction dépend de la rhéologie du fluide. Un produit spécial, le liquide hydraulique minéral (LHM), a été mis au point par TOTAL afin de répondre aux exigences de sécurité et de confort dans toutes les conditions climatiques (un point d'écoulement de moins 60 degrés et une température d'ébullition de plus de 235 degrés).

Ces recherches, menées conjointement avec le développement de matériaux élastomériques nouveaux ont permis de résoudre aussi les problèmes tribologiques de l'usure mécanique des pièces en frottement (en particulier la rotule en bronze de la pompe à pistons) et de leur protection contre la corro-

sion chimique. La fiabilité du mécanisme était à ce prix.

L'évolution actuelle est bien représentative de la nouvelle mécanique qui tend à intégrer les progrès de l'électronique afin d'augmenter le degré d'intelligence du système et sa maîtrise des forces d'inertie : système de freinage anti-blocage (ABS) ; durcissement de la direction avec la vitesse ; ampleur du braquage ; adaptation de la réponse de la suspension à l'amplitude et à la fréquence des perturbations ; correction de l'écroulement de l'avant au freinage, du cabrage à l'accélération brutale.

Ainsi, le progrès technologique résulte souvent aujourd'hui de la synergie entre la mécanique, les matériaux et la rhéologie. Mais la qualité d'un système, aussi évolué soit-il, dépend de sa fiabilité : c'est à ce point que l'intervention de la tribologie apporte une contribution essentielle.

■ Jacques du Parquet, département produits, essais mécaniques et tribologie, centre de recherches, Compagnie de raffinage et de distribution, TOTAL France, B.P. 27, 76700 Harfleur.

Actions, moyens et formations

Les pouvoirs publics et les instances européennes soutiennent un certain nombre d'actions qui concourent, entre autres, au développement scientifique des disciplines relevant de la mécanique, comme à la recherche technologique et à son transfert à l'industrie.

Ainsi, le ministère de l'Éducation nationale, de la Recherche et des Sports s'est engagé dans une série d'actions d'incitation et de soutien des programmes d'action pluriannuelle et des programmes EUREKA. Au niveau européen, un pas décisif a été franchi en 1986 instaurant une politique de recherche communautaire. L'intérêt pour des domaines comme celui des matériaux nouveaux ou de la tribologie y est affirmé. Né dans l'esprit d'industriels et d'universitaires, le projet européen ERCOFTAC (turbulence et combustion) voit déjà certains de ses centres pilotes devenir opérationnels.

Gage de réussite de ces multiples actions, la formation est également prise en compte. Dans l'enseignement supérieur, les écoles d'ingénieurs et les IUT forment la majeure partie des mécaniciens. Néanmoins les autres filières universitaires s'ouvrent de plus en plus rapidement à cette voie.

Pour combler notre retard en matière de formation des ingénieurs par la recherche, les pôles FIRTECH ont été mis en place, en 1984, sous l'autorité du ministère. Regroupant écoles d'ingénieurs, grands organismes de recherche et laboratoires universitaires, ces pôles étaient, l'an passé, au nombre de vingt-cinq dont quatre consacrés à la mécanique.



Simulation numérique, à l'ONERA, de l'écoulement dans le rotor d'un compresseur centrifuge (lignes isomach).
(ONERA)

Les programmes européens communautaires

Pour qui sait lire les programmes de recherche proposés par la Communauté européenne, les possibilités d'intervention, les ouvertures vers nos voisins, l'attrait des collaborations apparaissent très clairement.

— Daniel Paulmier

L'acte unique européen, signé au mois de février 1986, a marqué un pas décisif en matière de politique de recherche européenne en apportant un complément indispensable au traité instituant la Communauté économique européenne (1957) qui ne prévoyait pas explicitement de recherche commune.

Toutefois, la nécessité d'une coordination et de l'affirmation d'une recherche européenne avait été ressentie depuis longtemps. Un premier programme cadre avait été mis en place pour la période 1984-1987. Un second couvre maintenant la période 1988-1991. L'accent y est mis sur la compétitivité industrielle, l'Europe des chercheurs et la qualité de la vie. Toutes les actions communautaires de recherche sont définies en termes d'objectifs et éventuellement de stratégies : la mécanique, comme les autres disciplines dites verticales, n'y apparaît pas explicitement. Elle est cependant un des points d'ancrage de certains programmes de recherche comme ceux concernant, par exemple, les matériaux.

La plupart des actions communautaires sont tournées autant vers la recherche technologique et son transfert aux industries, que vers les aspects fondamentaux des disciplines en général et de la mécanique en particulier. Cependant, c'est dans un des trois sous-thèmes de l'action « les nouvelles technologies au service de la modernisation industrielle » que s'inscrit l'un des grands programmes de la recherche communautaire : BRITE, recherche de base sur les technologies industrielles pour l'Europe. Une large place a été faite à des domaines relevant de la mécanique du solide et surtout aux phénomènes de surface : accroissement des

durées de vie des systèmes industriels, usure et frottement, tribologie des systèmes mécaniques, engrenages hautement sollicités, etc. On y trouve également les techniques d'assemblage des matériaux nouveaux céramique/métal, la recherche de nouvelles méthodes d'essais non-destructifs, d'examen des matériaux classiques, normaux et composites... D'autres thèmes très multidisciplinaires tiennent dans BRITE une place de choix, comme les nouvelles technologies de production évolutive adaptables à des produits modulaires.

Il n'est pas question d'être exhaustif en survolant BRITE aussi rapidement, mais l'objet de cet exemple est de bien montrer que de tels appels d'offres s'adressent à un spectre très large de disciplines scientifiques et chacune peut y trouver matière à recherche. Un autre appel d'offres plus spécifique, mais au montant financier plus modeste, dit « matériaux avancés » ou EURAM, relevait de la même approche.

Bien avant les deux programmes-cadres de la Communauté, la CECA avait proposé des programmes de recherche concernant l'acier et la sidérurgie en vue « d'améliorer les performances des produits en service et d'élargir la gamme des utilisations de l'acier ». Relativement ignorés par les laboratoires français, ces programmes ont été repris depuis 1981 et il est clairement demandé que des progrès soient accomplis dans les connaissances scientifiques poussées des propriétés des aciers et de leur développement en liaison étroite avec les progrès réalisés dans la métallurgie mécanique. Là aussi, la réponse des laboratoires de mécanique est relativement modeste et un effort doit être fait.

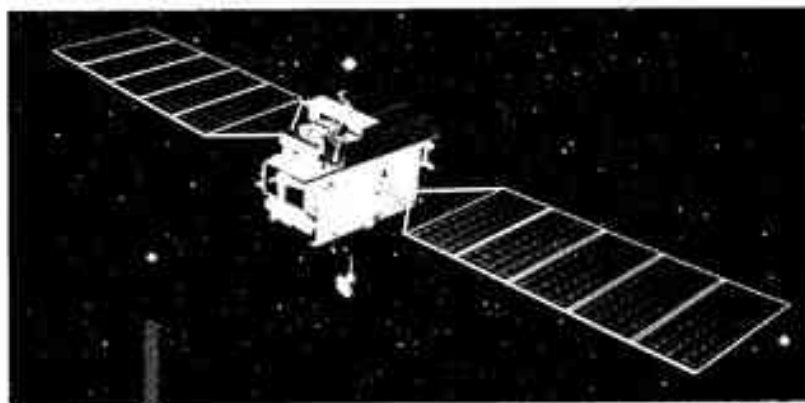
Les autres actions communautaires qui concernent entre autres les mécaniciens ont des objectifs généraux et nous

ne citerons que quelques exemples. Le plan de STIMULATION des coopérations et des échanges scientifiques et techniques européens a connu un véritable engouement. Le programme d'action en matière d'éducation et de formation dans le domaine des technologies (COMETT) et le programme SPRINT (innovation et transfert de technologie) ont un bon impact. Citons encore le succès du programme ERASMUS dont l'objet est la mobilité des étudiants en formation en Europe, et qui devrait participer à une meilleure connaissance mutuelle européenne.

Pour conclure, je rapprocherai l'attitude relativement timorée des universitaires et scientifiques français dans le domaine de la mécanique, comme dans d'autres d'ailleurs, vis-à-vis des programmes de recherche proposés par la Communauté européenne, du bien faible nombre de demandes de subventions pour participer aux congrès scientifiques internationaux qui se tiennent en Europe.

Les possibilités européennes de coopération interuniversitaire ou université-industrielle dans le domaine de la mécanique sont très vastes. La CEE a mis en place des programmes pour faciliter le développement de collaborations et rapprocher les partenaires : il est indispensable que la communauté mécanicienne française saisisse cette opportunité pour se fortifier et assurer sa contribution au potentiel de l'Europe du premier janvier 1993.

— Daniel Paulmier, professeur à l'Institut national polytechnique de Lorraine (INPL), responsable du Laboratoire d'études et de recherches en mécanique et énergétique des surfaces - ERMES - (UA 865 CNRS), INPL, 6, rue du Joli Car, 54000 Nancy, Conseiller pour les affaires internationales du Département des sciences physiques pour l'ingénieur du CNRS, 15, quai Anatole France, 75700 Paris.



Eureka (European retrievable carrier), plate-forme européenne récupérable, sera lancée à partir de 1991 pour des missions de six mois et récupérée par la navette spatiale européenne. Sa première mission sera consacrée principalement à la recherche en microgravité. (ESA)

Le projet ERCOFTAC

Jean Mathieu

Les tendances et les réalisations en matière de méthodes de prédiction qui s'amorcent et s'amplifient aux États-Unis ont inquiété toute une frange du monde industriel français à partir des années 83-84. Cette inquiétude a suscité un projet qui n'avait été longtemps que simple réflexion.

Aux alentours de 1985, le projet s'est cherché une assise européenne. ERCOFTAC (European Research Community on Flows Turbulence and Combustion), faute d'être une réalité, s'est mué en résolution, une résolution que concrétise une politique de centres pilotes. Préfiguration du réseau final, certains de ces centres, proposés en juin 1987, sont déjà opérationnels.

Mais quels sont plus précisément les objectifs scientifiques de ce projet ? ERCOFTAC se veut œuvrer dans le domaine de la turbulence et de la combustion. Si l'idée d'un « centre serveur » demeure, elle ne constitue pas — et de loin — l'essentiel du but visé. ERCOFTAC se veut aussi et surtout centre de réflexion. Ceci affiche nettement une politique scientifique qui n'en demeure pas moins orientée vers les applications. Plaçant suffisamment en amont les objectifs, le délicat problème de la concurrence industrielle se trouve minimisé, mais les programmes ne peuvent être définis que conjointement par les industriels et les universitaires.

C'est aussi une des missions du projet que de collecter les résultats expérimentaux pour les constituer en banque de données. Ces résultats, venus de tous les laboratoires travaillant dans le domaine de la turbulence et de la combustion, pourraient servir de base de réflexion et de contrôle aux programmes élaborés. Le développement des méthodes de prédiction ne va pas sans contrepartie. De ce point de vue, les centres pilotes se sont trouvés eux aussi investis de cette mission avec au départ une idée de spécialisation.

Jean Mathieu, Laboratoire de mécanique des fluides et d'acoustique (UA 263 CNRS), Ecole centrale de Lyon, 36, avenue Guy de Collongue, BP 163, 69131 Ecully.

Les calculateurs scientifiques et la mécanique

Pierre Leca,
François-Xavier Roux

La modélisation numérique fine des problèmes mécaniques complexes que veulent résoudre les ingénieurs, avec en particulier la prise en compte des comportements non linéaires et dynamiques des systèmes réels, nécessite des temps de calcul et des volumes de données de plus en plus importants. L'exemple typique est la modélisation numérique de la structure et de l'aérodynamique d'un avion complet.

L'évolution actuelle des calculateurs scientifiques permet d'envisager ces calculs à condition d'adapter les méthodes aux architectures des machines.

Evolution des machines de calcul scientifique dans les dernières années

Entre le début des années cinquante et le début des années quatre-vingts, la puissance des calculateurs scientifiques a augmenté en moyenne d'un facteur dix tous les cinq ans. On peut dire sommairement que la moitié du chemin parcouru l'a été grâce aux améliorations des composants, avec les introductions successives des transistors puis des circuits imprimés sur silicium à des niveaux d'intégration de plus en plus poussés. L'autre moitié est due aux progrès réalisés dans la conception de l'architecture des machines, c'est-à-dire en pratique à l'augmentation du parallélisme.

Qu'est-ce que le parallélisme en matière d'ordinateurs ?

Un ordinateur conventionnel se compose schématiquement d'une mémoire, dans laquelle sont rangées les données et les instructions des programmes à exécuter, d'une unité centrale qui lit successivement les instructions des programmes et effectue les opérations correspondantes sur les données, et enfin d'un système d'entrée/sortie sur écran, imprimante, lecteur de disques ou autres.

Sur les gros systèmes on travaille en temps partagé, c'est-à-dire que la machine traite simultanément plusieurs programmes provenant de plusieurs utilisateurs, chaque programme étant

découpé en tranches qui sont activées successivement, de façon à partager le temps d'exécution disponible.

Afin d'optimiser l'exploitation des machines, certaines unités fonctionnelles, en particulier les systèmes d'entrée/sortie, sont dupliquées et peuvent fonctionner simultanément avec d'autres. C'est ce fonctionnement simultané que l'on qualifie de « parallèle ».

Les calculateurs vectoriels

Ce parallélisme entre les unités fonctionnelles du calculateur est assuré par le système d'exploitation de façon transparente aux utilisateurs.

Mais au début des années soixante-dix sont apparues des machines particulièrement efficaces pour le calcul scientifique, dans lesquelles le parallélisme existe à l'intérieur même des unités fonctionnelles élémentaires.

L'architecture de ces calculateurs est inspirée du principe de la chaîne d'assemblage : quand une voiture entre dans une chaîne de montage, elle passe successivement par un certain nombre de postes de travail spécialisés. Une fois que la chaîne est amorcée, il sort une nouvelle voiture à chaque temps de cycle. Les différents postes travaillent donc en parallèle sur différentes voitures qui progressent régulièrement et successivement dans la chaîne.

Dans une machine à architecture pipe-linéaire, les différents circuits chargés des différentes opérations élémentaires associées à la même instruction peuvent fonctionner simultanément comme une chaîne de montage pour effectuer l'instruction sur des séries suffisamment longues de données, rangées régulièrement comme les éléments d'un vecteur. D'où le nom de calculateur vectoriel.

Un programme ne s'exécute rapidement sur une telle machine que si une grande partie des calculs peut être réalisée en mode vectoriel. Cette contrainte influe donc nécessairement sur le choix des algorithmes.

Les calculateurs parallèles multi-processeurs

Les gains de puissance que l'on peut encore raisonnablement espérer obtenir grâce aux architectures pipe-lines sont malheureusement limités par des contraintes technologiques liées au ni-

► veau d'intégration déjà extrêmement poussé des circuits.

La seule façon d'augmenter sensiblement la puissance des machines consiste donc à multiplier le nombre de processeurs travaillant en parallèle. Cela semble naturel, mais ce n'est malheureusement simple ni au niveau matériel, ni au niveau logiciel.

Au niveau matériel, l'accès à la mémoire constitue toujours un goulot d'étranglement, et la puissance de la machine augmente moins vite que le nombre de processeurs. Il arrive même rapidement un point où la puissance diminue si l'on continue d'accroître le nombre d'unités de calcul, les conflits d'accès devenant alors très fréquents.

Au niveau logiciel, le parallélisme entre processeurs indépendants est encore moins transparent à l'utilisateur que le parallélisme vectoriel. En fait, la plupart des calculateurs multiprocesseurs actuels, comme le CRAY 2, ne fonctionnent en parallèle pour le même programme que si l'utilisateur le demande explicitement dans son code.

La machine Alliant, dont il existe un exemplaire au Laboratoire de mécanique de l'Ecole centrale, fait exception à la règle. Ce mini-supercalculateur (ce terme désigne une machine ayant une

architecture de super-calculateur avec une technologie moins rapide mais moins chère) dispose d'un compilateur capable d'analyser si des boucles de programmes simples ou imbriqués peuvent donner lieu à une exécution parallèle sur les huit processeurs.

Une des raisons principales pour laquelle les super-calculateurs multiprocesseurs ne disposent pas d'outils de parallélisation automatique est que l'exécution simultanée de différentes parties d'un même programme sur des processeurs différents nécessite des opérations de contrôle complexes très coûteuses en temps.

Par exemple, le lancement de tâches en parallèle sur le CRAY 2 demande de plusieurs dizaines de milliers à plus d'un million de temps de cycle. Il est donc exclu de paralléliser au niveau de paquets d'instructions élémentaires.

Utilisation des calculateurs parallèles

Si la vectorisation peut très souvent être obtenue simplement en écrivant correctement les programmes, la parallélisation efficace d'algorithmes ne relève pas de la seule programmation.

Elle nécessite en effet la mise en évi-

dence de larges parties des calculs exécutables simultanément. Or les algorithmes de calcul scientifique classiques ont en général une logique purement séquentielle. Ils se décomposent le plus souvent en étapes interdépendantes qui doivent donc s'effectuer successivement.

Les algorithmes parallèles efficaces s'appuient souvent sur une décomposition du problème, sous forme de sous-structures du point de vue physique, ou sous forme de blocs du point de vue algébrique. Cette décomposition relève bien souvent tout autant de la modélisation que de l'algorithmique à proprement parler.

On est donc très loin de la simple amélioration du rendement des machines, transparente à l'utilisateur, dont il était question au début, et c'est un nouveau champ d'investigation des mathématiques appliquées qui apparaît.

■ Pierre Leca, chef du groupe calcul parallèle, ONERA.

■ François-Xavier Roux, ingénieur, groupe calcul parallèle, ONERA, 29, avenue de la division Leclerc, 92330 Châtillon Cedex.

L'action du ministère de la Recherche et de la Technologie dans le domaine de la mécanique

Sur la mécanique repose fondamentalement la réalisation de tous les produits manufacturés. La Recherche en Mécanique a une identité propre, qui appelle des compétences spécifiques du plus haut niveau.

■ Raoul Monin

1988 - En cette année de la mécanique, a été inaugurée la campagne « Mécaniciens, au cœur du monde en mouvement », campagne qui vise à rappeler que les progrès technologiques de la plupart des secteurs industriels (production mécanique, automobile, aérospatiale, énergie, etc.), représentant un chiffre d'affaires annuel supérieur à 1 000 milliards de francs, resteront limités si les performances mécaniciennes ne continuent pas encore et toujours à progresser.

Loin d'être éclipsée par l'émergence de disciplines plus ou moins nouvelles, la mécanique est de plus en plus sollicitée pour les performances et la fiabilité. Il en découle une exigence de maîtrise qui passe nécessairement par une recherche, souvent pluridisciplinaire, toujours sans limite : connaissance de la matière et de ses caractéristiques d'exploitation, mise en forme, optimisation de la production.

Les axes principaux du soutien direct apporté par le ministère pour la recherche sont déterminés en consultation avec un comité d'experts de l'industrie, de la recherche, de l'adminis-

tration. L'action d'incitation et de soutien s'articule notamment selon des actions concertées industrie-recherche, des programmes d'action pluriannuels et des programmes EUREKA.

Quelques résultats récemment acquis

On ne peut inventorier tous les aboutissements industriels sensibles des recherches soutenues au cours de ces dernières années. Toutes ont produit une fédération des compétences majeures des acteurs de recherche tant publique que privée. Nous citerons quelques résultats remarquables :

- maîtrise du procédé d'usinage très grande vitesse, plaçant notre industrie au premier rang de la technique mondiale. Retombées sur la collectivité des concepteurs et utilisateurs de systèmes avancés de production à travers les centres techniques et les écoles d'ingénieurs ;
- usinage assisté par laser, maîtrise stratégique, développée dans le secret par nos pays concurrents : le programme soutenu par le ministère de la Recherche et de la Technologie a fédéré les deux plates-formes publiques compétentes avec dix industriels de haute technologie, très motivés ;

- traitements de surface : l'appréhension des phénomènes d'adhérence des protections et de la corrosion des aciers électro-zingués a permis à notre industrie automobile d'investir dans des processus de protection marquant un progrès sensible de la qualité. La maîtrise des traitements par voie chimique, physique, magnétron, implantation ionique, faisceau laser, ... a conduit à de multiples applications dès aujourd'hui mises en œuvre dans l'industrie ;

- écoulements diphasiques : les équipes (associées au CNRS) ont démontré une validation des équations lagrangiennes qui a soulevé le plus vif intérêt dans la communauté de la recherche ;

- laser : le programme Eurolaser a mobilisé dans le cadre d'EUREKA trois équipes associant intimement industriels et chercheurs des laboratoires publics. Des progrès significatifs ont d'ores et déjà été faits dans la construction des lasers à cristaux, et dans les procédés d'utilisation des lasers CO₂.

Propositions pour les années à venir

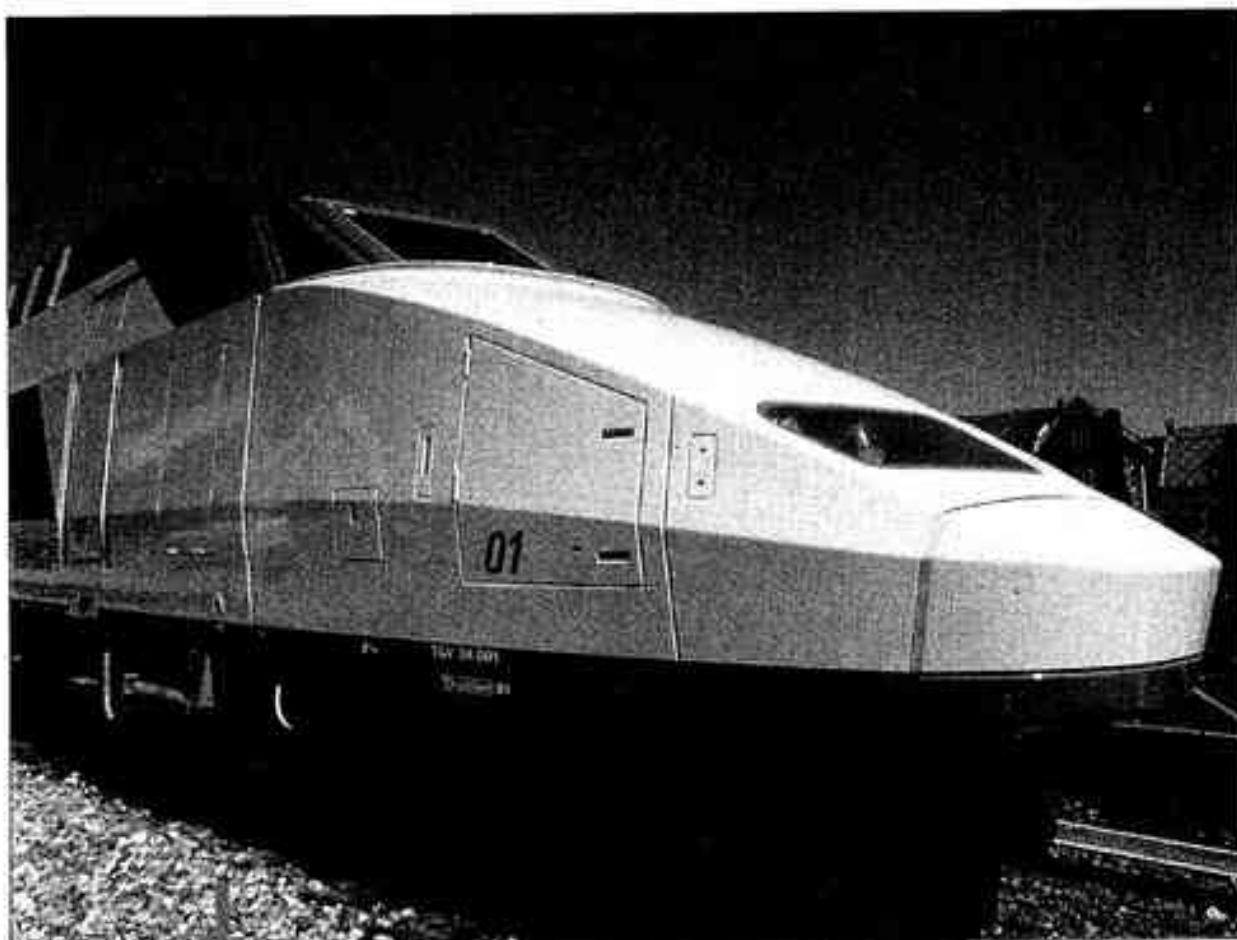
L'effort d'incitation pour la recherche et le développement de la mécanique doit être énergiquement accru, faute de quoi on verra à court terme nos industries productrices et utilisatrices de mécanique submergées par la concurrence : celle des pays de technologie avancée qui procèdent à un véritable redéploiement de la mécanique, mais aussi celle des pays en voie d'émergence, offrant à des prix dangereusement compétitifs les produits résultant des technologies acquises récemment.

Cet effort passe par la reconnaissance de la place essentielle de la mécanique dans le développement général, par le relèvement du budget d'incitation à la recherche, et par une accentuation de l'ensemble des procédures publiques d'incitation, telles les Firtech, les pôles technologiques, les

centres de recherche industrielle et de transfert de technologie, etc., ou le soutien à l'enseignement des disciplines mécaniciennes (pour l'enseignement supérieur : les instituts universitaires de technologie, école d'ingénieurs, universités).

Les grands acteurs de la recherche dans les disciplines mécaniciennes doivent affirmer leur détermination à poursuivre leur effort au service de la mécanique moderne. Le CNRS, ce « dossier mécanique » le prouve, occupe une position privilégiée pour donner l'exemple d'une salutaire remise en ordre des valeurs scientifiques et technologiques.

■ Raoul Monin, chef du Département mécanique, optique, aéronautique, génie électrique, du ministère de la Recherche et de la Technologie, 1, rue Descartes, 75231 Paris Cedex 05.



Le TGV Atlantique, chef d'œuvre de mécanique : aérodynamique, acoustique, calcul des structures, dynamique, fiabilité, etc. (© SNCF).

La mécanique et l'enseignement supérieur

Evolution rapide des DEUG, accroissement régulier de la licence à l'agrégation, confirmation des MST et DESS, diversification des DEA. Mais ce sont les écoles d'ingénieurs et les IUT qui continuent de doter la mécanique du gros de ses effectifs.

■ François Joubert

La mécanique, dans tous ses aspects, apparaît dans de nombreuses filières universitaires. Toutefois, elle n'est discipline centrale que dans quelques spécialités d'IUT*, quelques licences et maîtrises, un petit nombre de MST* et de DESS*, une quarantaine de DEA* et bien sûr un bon nombre d'écoles d'ingénieurs.

La situation évolue cependant rapidement, en particulier dans les DEUG* (sciences et structure de la matière) où apparaissent des enseignements de mécanique et de technologie.

Dans les IUT, deux départements - génie mécanique productique et génie civil - sont largement centrés sur la mécanique. Un nombre significatif d'étu-

dants (environ dix pour cent) accède en licence et MST ou intègre en première année d'écoles d'ingénieurs. Trois autres départements, génie thermique, maintenance industrielle et mesures physiques (au total 5 300 étudiants et 1 900 diplômés) dispensent un enseignement où la mécanique a une bonne place.

Les licences et maîtrises de mécanique, technologie de construction, génie mécanique, génie civil connaissent un accroissement régulier, comme d'ailleurs les préparations aux CAPET* et agrégations de mécanique, génie mécanique, génie civil.

Les MST ont connu depuis peu d'années un développement qui se confirme. Orientées vers les applications de la mécanique, elles couvrent des domaines variés (productique, conception assistée par ordinateur, mécanique des matériaux...). Il en est de même des DESS dont certains complètent les MST et conduisent à la délivrance de diplômes d'ingénieurs par les universités.

Les DEA offrent un panorama diversifié (acoustique, aérodynamique, mécanique des fluides, génie civil et habitat, technologie, robotique...) avec des effectifs très contrastés (une cinquantaine pour certains, quelques unités pour d'autres).

Enfin, les écoles d'ingénieurs (sous tutelle de l'Education nationale) forment avec les IUT le gros du bataillon des mécaniciens. Certaines affichent la mécanique comme vocation principale tout en diversifiant largement la formation. D'autres, à vocation plus généraliste, possèdent des options structurées autour de la mécanique. Les chiffres présentés dans le tableau ci-contre tiennent compte de ces deux « modèles ». Il faut noter que les écoles sous tutelle d'autres ministères et les écoles de statut privé fournissent un effectif sensiblement équivalent de diplômés.

LES DEUX RENCONTRES

Deux hommes, un jour, ont croisé la route de ce chercheur. L'un lui a fait voir une discipline, l'autre l'a orienté vers le métier qu'il exerce à présent.

Matheux dans l'âme, rêvait de bateaux qui vont toujours plus vite. Serge Huberson s'est engagé dans un chenal universitaire solidement balisé : maîtrise de mathématiques appliquées, DEA de mécanique des fluides et thèse de troisième cycle sur les écoulements tourbillonnaires à Paris VI en 1979.

Au menu de la faculté de Rouen, on trouvait, à l'époque, les statistiques, l'analyse numérique et la mécanique des fluides. L'avant-goût du milieu liquide et la réputation de dynamisme d'un certain professeur de mécanique des fluides pèsent bon poids à l'heure du choix universitaire. De même pour la carrière : son directeur de thèse trouvera les bons arguments qui orienteront Serge Huberson vers la recherche et le CNRS.

Mais auparavant, un service militaire à la Direction des recherches, études et techniques (DRET), passé à rédiger et suivre des contrats de recherche, offre au jeune thésard l'occasion de survoler largement le monde de la mécanique des fluides. Les quatre années suivantes, stagiaire de thèse à l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA), il travaille trois jours par semaine à compléter une méthode de calcul d'écoulement bidimensionnelle en vue de la transformer en une méthode particulière tridimensionnelle, applicable aux écoulements autour des rotors, pales d'hélicoptère et ailes delta en mouvement. « Le reste du temps, je complétais ma formation à Paris VI, notamment en analyse numérique ».

En 1983, le CNRS l'accueille au Laboratoire d'informatique et de mécanique pour les sciences de l'ingénieur (LIMSI). Chargé de recherche, il se consacre à la représentation des écoulements tourbillonnaires de fluides visqueux. Une façon de renouer avec la mer à travers les mathématiques.

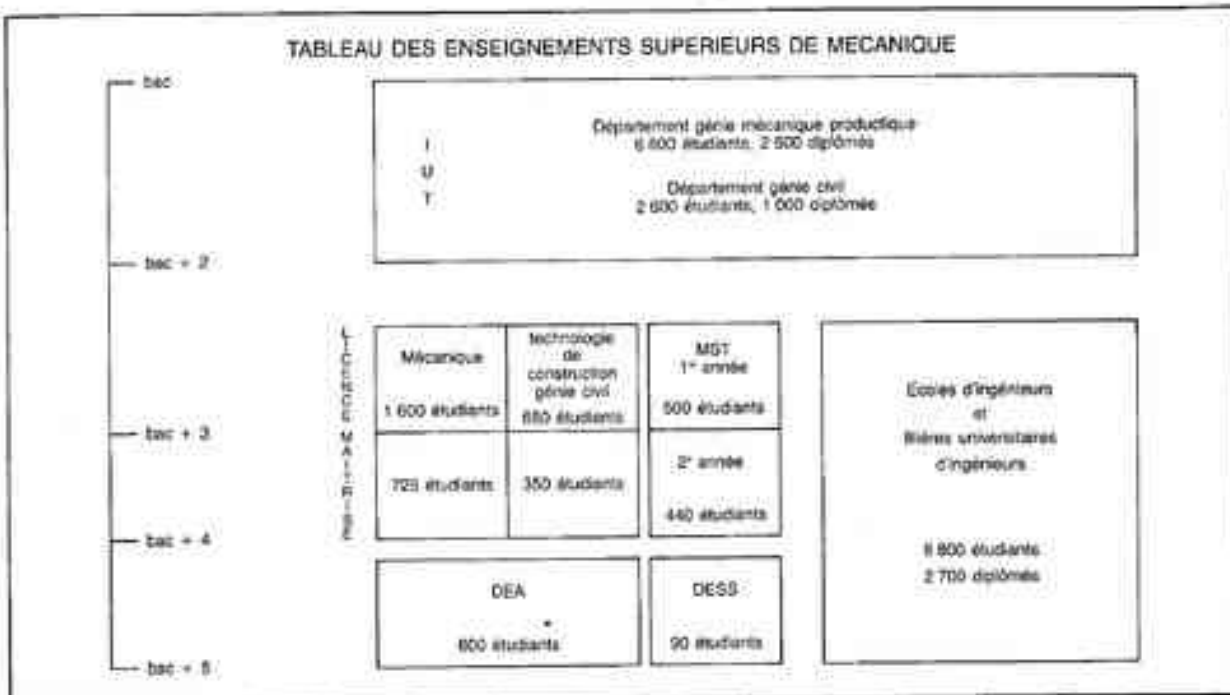
Serge Huberson a-t-il suivi la bonne filière ? « Si l'université prépare bien à la recherche, son manque d'unité, en revanche, ne favorise guère l'orientation professionnelle des étudiants ». Une solution ? « Des conseillers universitaires possédant une vision pluridisciplinaire seraient les bienvenus au moment de la licence ».

Jean CHOUTY

*IUT : Institut Universitaire de Technologie
MST : Maîtrise de Sciences et Techniques
DESS : Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées
DEA : Diplôme d'Etudes Approfondies
DEUG : Diplôme d'Etudes Universitaires Générales
CAPET : Certificat d'Aptitude Pédagogique à l'Enseignement Technique

■ François Joubert, professeur à l'IUT « A » de Bordeaux, 33405 Talence. Conseiller à la mission scientifique de la Direction générale de l'enseignement supérieur et de la recherche, vice-président de l'Association universitaire de mécanique.

TABLEAU DES ENSEIGNEMENTS SUPERIEURS DE MECANIQUE



Les pôles Firtech

Six des vingt-cinq pôles Firtech sont construits autour de recherches en mécanique. Ils fournissent à l'industrie des ingénieurs et des cadres de haut niveau formés par la recherche.

— Bernard Dormy,
Gérard Montel

Dans quelle mesure les recherches conduites dans les universités et écoles d'ingénieurs peuvent-elles avoir des retombées dans le monde économique et industriel ? Il existe à cette question des réponses classiques, qui vont de la prestation de service par un laboratoire universitaire, à la création de filiales, en passant par la valorisation des découvertes au travers des brevets et des licences. Les pôles Firtech constituent une approche nouvelle et complémentaire, qui repose sur deux idées simples :

— La proportion des ingénieurs de l'industrie formés par la recherche est, en France, très nettement moins élevée que chez nos grands partenaires économiques du monde occidental. N'est-ce pas un handicap, surtout à l'heure du grand marché unique européen de 1992 ?

— Le milieu des universités et des grandes écoles rassemble des personnels de haute qualité, qui assurent à la fois des fonctions d'enseignement et de recherche, et qui sont de plus en plus ouverts vers le milieu des entreprises. Qui mieux qu'eux pourrait assurer avec succès la formation par la recherche des futurs cadres de notre industrie ?

La formation par la recherche n'est ainsi plus réservée aux futurs chercheurs du CNRS ou enseignants-chercheurs des universités. Elle a aussi maintenant pour objectif de former des ingénieurs pour notre économie ; parce qu'une ouverture de nos entreprises sur les ressources de la recherche est un élément essentiel de leur compétitivité ; et aussi (et même surtout) parce qu'un ingénieur formé par la recherche est devenu un esprit inventif capable de s'adapter à des situations qui ne sont pas de celles que l'on domine avec le seul bagage d'un savoir livresque. Un esprit formé par la recherche a plus de chances de réussite dans son entreprise, même si (et ce n'est qu'en appa-

rence un paradoxe) il n'y poursuit pas des recherches dans le domaine qu'il a commencé à défricher à l'université.

C'est pour former ces esprits innovants dont a besoin notre économie qu'ont été créés les pôles Firtech. Ces pôles sont des regroupements, sur des thèmes d'intérêt commun, de laboratoires de recherche dépendant d'universités, d'écoles d'ingénieurs, de grands organismes de recherche (CNRS, INSERM, INRA...) — trois mondes aux qualités complémentaires, et qui ont tout intérêt à développer leur collaboration. Chaque pôle est construit autour d'un ou plusieurs DEA (diplôme d'études approfondies), garants d'une formation doctorale de qualité. Il collabore avec des centres industriels, des centres techniques, des PME, des collectivités territoriales. Il reçoit, pendant une période limitée (trois à quatre ans), un soutien financier très important du ministère de l'Éducation nationale (Direction de la recherche universitaire et Fonds de la recherche et de la technologie), de l'ordre de un à deux millions de francs par an. Il doit ensuite s'autofinancer, au moyen notamment de contributions du monde industriel.

Les premiers pôles Firtech ont été créés en 1984. Fin 1987, ils étaient vingt-cinq. Parmi ceux-ci, plusieurs ont des recherches en mécanique comme thème principal.

- Les pôles Firttech mécanique se répartissent dans quatre domaines :

1 - L'étude du comportement des matériaux lorsqu'ils sont soumis à des déformations importantes, au cours de leur mise en forme (emboutissage, pliage...), ou à des efforts importants pendant leur utilisation (traction, compression, torsion, vibration, vieillissement...). Ce type de recherche a pour but de prévoir l'évolution des matériaux les plus divers soumis à ces différentes contraintes, en fonction de leur composition, de leur texture, de leur structure à l'échelle atomique, des conditions dans lesquelles ils travaillent, et d'éviter ainsi les défauts de fabrication des objets, ou les accidents en cours d'utilisation (ruptures, fissurations...). Les pôles Firttech correspondants sont localisés à Paris et à Grenoble.

2 - L'étude du comportement mécanique des assemblages et des structures, tels que ceux qui sont réalisés en génie civil (barrages, ouvrages d'art, plates-formes off-shore, centrales nucléaires...). Ces études ont pour objet de définir la nature des matériaux à utiliser, les modes d'assemblage qui offrent le maximum de sécurité. Ces recherches sont conduites notamment dans un pôle Firttech situé à Paris.

3 - L'étude de la mécanique des machines, c'est-à-dire de l'ensemble des phénomènes qui interviennent au cours du

FORME PAR LA RECHERCHE

Pour cet ingénieur, la formation par la recherche a favorisé les conditions de dialogue avec les autres et développé certaines qualités personnelles.

La main caressant le poli des pièces, les odeurs d'huiles, le bruit des forets grignotant le métal... Il ne faut guère d'efforts pour replonger Daniel Aliaga, 38 ans, dans les sensations d'une enfance au milieu de l'atelier paternel de mécanique, à Béziers.

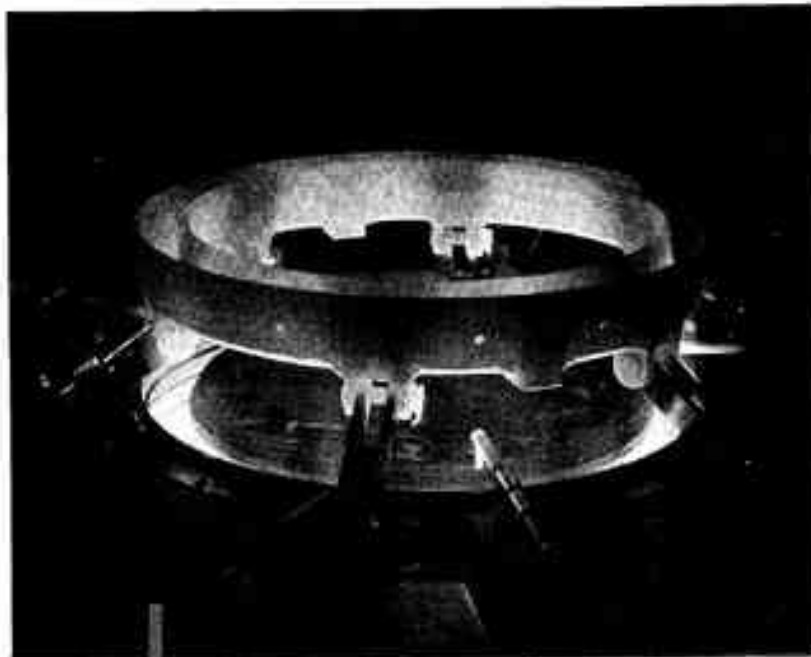
Aujourd'hui, il dirige le service « Matériaux métalliques » dans le Laboratoire central du centre commun de recherche Louis Blériot de l'Aérospatiale. Ce n'est plus la qualité du cadre de son vélo qui le préoccupe, mais celle des métaux utilisés dans les avions, les hélicoptères, les missiles ou les satellites.

Daniel Aliaga travaille dans cette entreprise depuis 1979. Ses études à l'Institut national des sciences appliquées (INSA) de Lyon l'ont rompu aux techniques de l'ingénieur. Le Centre des matériaux de l'Ecole des Mines de Paris lui assurera, de 1974 à 1979, une solide formation par la recherche. Cette expérience, dans le groupe du professeur Pineau, sera consacrée à étudier des aciers frittés-forgés pour le compte de l'industrie automobile. Elle se soldera par une thèse de docteur-ingénieur sur la mécanique de la rupture.

« A l'époque, cette spécialité ne courait pas les rues », précise Daniel Aliaga. Un point de plus sur son curriculum vitae, même si la barre du niveau de recrutement était alors placée moins haut. Aujourd'hui, au Laboratoire central, un ingénieur sur cinq, environ, possède un doctorat. Et la proportion va croissant.

Cette formation par la recherche, le chef du service « Matériaux métalliques » y voit plusieurs avantages. « Etant passé par ce moule, je comprends les contraintes des chercheurs et notre collaboration est plus fructueuse. Par ailleurs, l'Ecole des Mines m'a donné l'occasion de manipuler pas mal d'équipements scientifiques de pointe ou de polir moi-même des échantillons ». Des expériences qui s'avéreront des plus utiles pour dialoguer avec une équipe de techniciens aussi spécialisés que qualifiés. « Mais ce que la recherche m'a surtout enseigné, c'est peut-être bien la persévérance ».

Jean CHOUTY



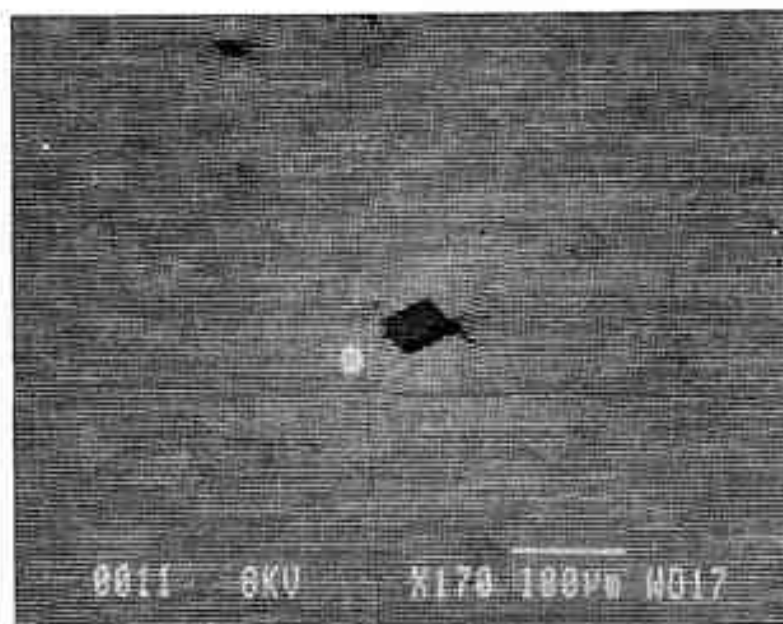
Essai de fatigue thermique. Pièce composite céramique/céramique. (© SNECMA)

déplacement de pièces mobiles les unes par rapport aux autres (moteurs, déplacement de véhicules...). Ces études portent notamment sur les vibrations, les phénomènes qui se produisent aux contacts (usure), l'aérodynamique, l'hydrodynamique. Ce type de recherche est conduit à Lyon, en particulier.

4 - L'étude de la conception et du fonctionnement des robots et des chaînes de production automatisées, qui conduit à une association de la mécanique, de l'électronique et de l'informatique, en vue de réaliser des appareils de manipulation automatisés, des chaînes de fabrication entièrement pilotées par des ordinateurs avec une mise en œuvre de l'intelligence artificielle. Cette recherche est conduite dans un pôle Firttech localisé à Toulouse.

■ Bernard Dormy, sous-directeur du développement de la recherche universitaire, Direction de la recherche.

■ Gérard Montiel, conseiller à la mission scientifique, Direction de la recherche, ministère de l'Education nationale, de la Recherche et des Sports, 61-65, rue Dutot, 75015 Paris.



A la surface d'une éprouvette de superalliage base nickel contenant une inclusion indéformable, on a déposé, par microlithographie, une grille métallique. L'éprouvette a ensuite été déformée en traction suivant une direction verticale.

En superposant la trame transparente livrée avec cette brochure à la photo du bas, on fait apparaître des franges de moiré. Lorsque la trame est horizontale, on visualise les perturbations du champ de déplacement suivant l'axe de traction. Noter ce qui se passe autour de l'inclusion. En plaçant la trame verticale, c'est le déplacement horizontal qui est mis en évidence.

La photo du haut montre les détails de l'interaction matrice/inclusion (grossissement 1000). Ces images ont été obtenues au microscope électronique à balayage et la technique d'analyse a été mise au point au Laboratoire des propriétés mécaniques et thermodynamiques des matériaux du CNRS - LP 9001. (M.H. Ambroise, T. Bretheau, D. Galdemaison).

1 - Robot Centaure. (© CEA - L.M. Puig).

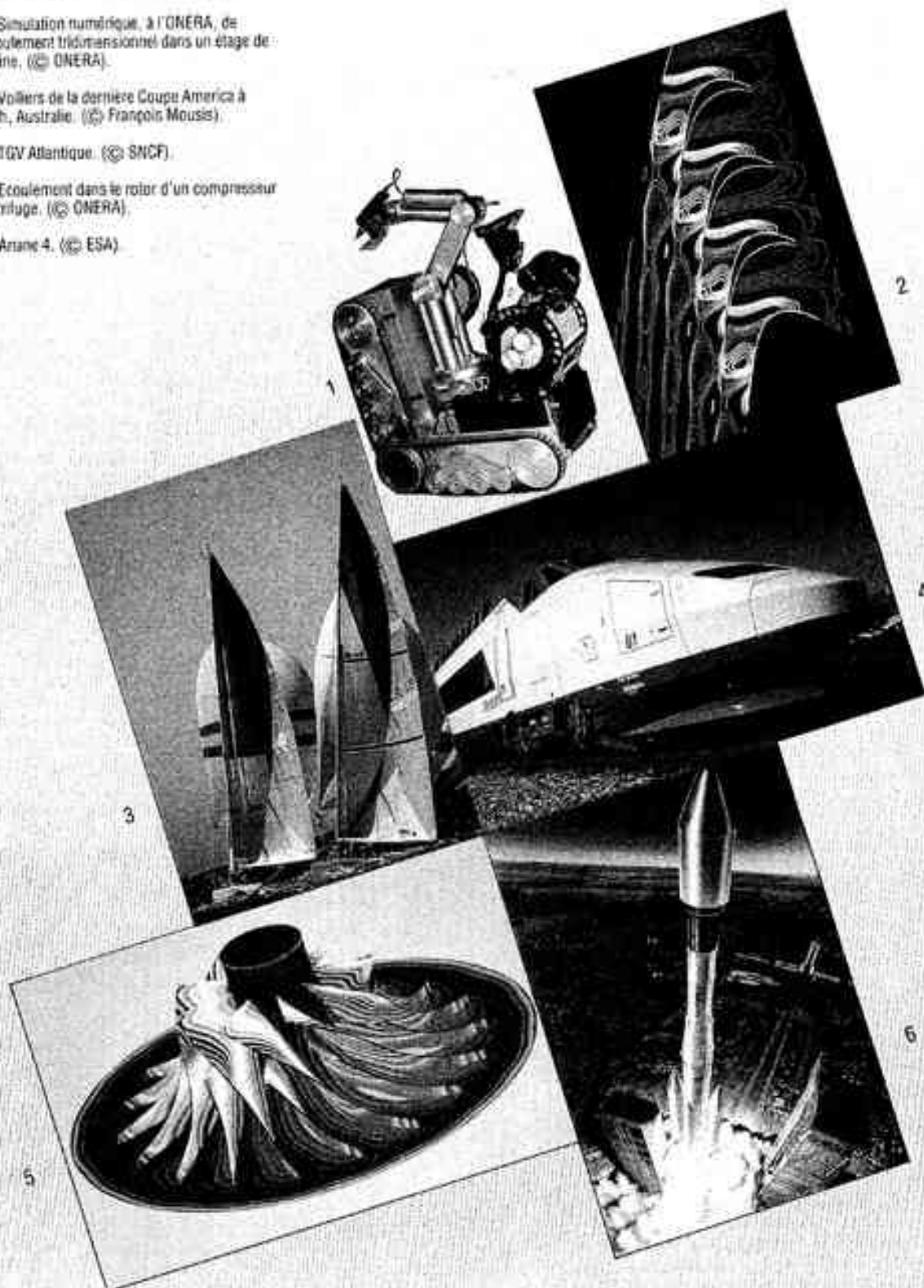
2 - Simulation numérique, à l'ONERA, de l'écoulement tridimensionnel dans un étage de turbine. (© ONERA).

3 - Voiliers de la dernière Coupe America à Perth, Australie. (© François Mousis).

4 - TGV Atlantique. (© SNCF).

5 - Écoulement dans le rotor d'un compresseur centrifuge. (© ONERA).

6 - Ariane 4. (© ESA).



CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
15, QUAI ANATOLE-FRANCE 75700 PARIS, TÉL. (1) 45 55 92 25, TÉLEX 280 034

