

## Le courrier du CNRS 50

Auteur(s) : CNRS

### Les folios

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

50 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 50, 1983-03

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

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

<https://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/145>

Copier

### Présentation

Date(s)1983-03

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 pages50

Notice créée par [Valérie Burgos](#) Notice créée le 05/10/2023 Dernière modification le 09/12/2024

---

# LE COURRIER DU CNRS

50

CNRS  
Centre des archives  
de la Documentation  
Bibliothèque 19  
1, avenue de la Terrasse  
91198 Gif-sur-Yvette

Bimestriel — Mars 1983 — 15 F

cnrs

---

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
15, quai Anatole France - 75700 Paris - Tél. : 555.92.25.

Directeur de publication : Goéry Delacôte  
Secrétaire de rédaction : Martine Chabrier-Elkik  
La vie des laboratoires : Véronique Brossollet  
Entretiens : Monique Mounier

Comité de rédaction : Martine Barrère, Georges Chevallier, Robert Clarke, Michel Crozon, Bernard Dormy, Elisabeth Gordon, Gilbert Grynberg, James Hiéblot, Gérard Lilamand, Jacqueline Mirabel, Jean-Claude Porée, Jean-Claude Ribes, Janine Rondest, Jean Tavlitzki.

Abonnement et vente au numéro, le numéro 15 F.

Abonnement annuel : 55 F - 65 F pour l'étranger (voir bulletin p. 27-30).

Tout changement d'adresse doit être signalé au secrétariat de rédaction.

Revue bimestrielle comportant cinq numéros par an.

Nous remercions les auteurs et les organismes qui ont participé à la rédaction de ce numéro.

Les intitulés et les chapéaux introductifs ont été rédigés par le secrétariat de rédaction.

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

Direction artistique : ODT, 41 avenue de Friedland - 75008 Paris.

Réalisation ALLPRINT, 8 rue Antoine Chantin - 75014 Paris.

C.P.A.D. 303 - ISBN 2-222-03292-X - ISSN 0153-985 X. © Centre national de la recherche scientifique.

---

Page 1 de couverture : Manches empêtrées et son poisson (Cliché Y. Le Maho) - Voir p. 15.

Page 4 de couverture : Yakas marchant sur les mains, grès 249, dynastie des Wei de l'ouest (Cliché P. Colombel) - Voir p. 48.

---

*Le Centre de documentation scientifique et technique du CNRS (CDST) propose à titre expérimental de fournir aux lecteurs intéressés, un complément d'information sur une sélection d'articles publiés dans le Courrier du CNRS, sous la forme d'une bibliographie standard (voir page 10).*

*Ces bibliographies standards sont réalisées par interrogation de la base de données bibliographiques multidisciplinaires PASCAL implantée sur le serveur national français QUESTEL-TELESYSTEME.*

---

Editorial	4	Pierre Papon	
Pleins feux	5	Une politique scientifique régionale pour le CNRS	Yves-André Rocher
Le point	11	L'hélium 3 polarisé	Bernard Castaing
À la découverte	15	Le Manchot empereur : une stratégie basée sur l'économie d'énergie	Yvon Le Maho
À la recherche	22	Les protéines contractiles cytoplasmiques	Louise-Anne Pradel
À propos	31	La théorie de la viabilité	Jean-Pierre Aubin
Réflexion	35	Les plantes haploïdes	Yves Demarly
Dossier	41	La spectroscopie LASER	Bernard Cagnac
Exposition	48	Les fresques du désert de Gobi	
Bibliographie	51	Les Éditions du CNRS	

---

ont même entraîné des regroupements d'équipes, certains secteurs scientifiques utilisant d'ailleurs assez systématiquement ces formules pour préparer des restructurations locales. Les GS, en particulier, actions de programme faisant intervenir des partenaires locaux ou régionaux, continueront, bien entendu, à jouer un rôle de premier plan dans l'organisation d'opérations pluridisciplinaires à caractère fondamental ou finalisé.

Les opérations de restructuration restent cependant trop rares du fait des obstacles humains, matériels et souvent institutionnels qu'elles rencontrent. De tels regroupements, justifiés par la constitution d'entités pluridisciplinaires et par l'économie des moyens, pourraient prendre au minimum la forme d'instituts permettant un fonctionnement plus efficace par la mise en commun de gros équipements et des services techniques. Il faut d'ailleurs leur opposer la tout aussi nécessaire émancipation de jeunes équipes issues des grands laboratoires. Il appartient au CNRS de favoriser ces deux expressions de la vie de la recherche.

#### *Le soutien du développement régional*

Le terrain régional constitue un domaine privilégié pour la valorisation des connaissances et la diffusion de l'information scientifique et technique. De multiples initiatives ont été proposées dans ce sens lors des Assises régionales et du Colloque : bureaux d'information scientifique et technique, boutiques de la science, centres de transfert, programmes de recherche à finalité régionale.

L'action du CNRS pourra ainsi se déployer du court au long terme, en visant les crêneaux les plus sensibles pour le développement des différentes régions, compte tenu des spécificités géographiques, agricoles, industrielles, ... de chacune. Le domaine social et culturel devra être pris en considération avec autant d'attention que le domaine économique.

Il s'agira, tout particulièrement, de regrouper et de fédérer les équipes de la communauté CNRS pour mobiliser leur action dans le cadre des pôles technologiques régionaux et des organisations mises en place régionalement en réponse aux programmes mobilisateurs.

Les objectifs ici sont clairs et les partenaires décidés à agir. Mais la demande est forte et se retrouve souvent en termes voisins d'une région à l'autre. Des actions interrégionales pourront

alors être construites.

Cette réponse organisée du CNRS aux préoccupations exprimées par les collectivités territoriales n'est qu'un volet de l'action de valorisation et d'information que le CNRS entend développer par voie déconcentrée. L'objectif est aussi de favoriser sur le terrain les relations bilatérales, voire multilatérales, entre un utilisateur de la recherche exprimant un besoin précis et le ou les équipes qui sont susceptibles d'y répondre. C'est là un objectif auquel la direction de la valorisation s'attache tout particulièrement et dont la réalisation est confiée à une réseau de chargés de mission aux relations industrielles dont la mise en place est en cours et dont l'action s'articule avec de nombreux partenaires régionaux, notamment les délégations de l'ANVAR, les chambres de commerce et d'industrie, les agences régionales de développement, ...

#### *La coopération avec l'Enseignement supérieur et les organismes de recherche*

Le renforcement de la coopération avec l'Enseignement supérieur et les grands organismes répond au souci national de coordination et de désencerclement des structures de recherche. C'est aussi, par rapport aux objectifs précédemment cités, une nécessité évidente dans la stratégie à développer.

Comment, en effet, le CNRS pourra-t-il construire son développement régional sans coopérer d'abord avec les établissements d'enseignement supérieur ? C'est pourquoi il a été décidé de soutenir la nouvelle politique contractuelle que la direction de la recherche du Ministère de l'éducation nationale commence à mettre en place auprès des établissements d'enseignement supérieur. L'intervention du CNRS devant bien sûr se situer dans le cadre de ses missions spécifiques telles que les prévoit et les étend le décret organique du 24 novembre 1982. Cette coopération pourra, en particulier, favoriser divers projets visant à développer et à structurer le potentiel scientifique, à lancer des programmes pluridisciplinaires ou à renforcer les actions de formation.

De la même manière, l'appui réciproque que se portent le CNRS et les organismes de recherche doit permettre de construire des potentiels locaux efficaces, bien charpentés à la fois au plan de la recherche fondamentale et à celui de la recherche finalisée, orientés vers

les besoins des régions. C'est bien à ces préoccupations que répond, par exemple, la création récente à l'Houmeau, près de La Rochelle, d'un laboratoire CNRS-Centre national pour l'exploitation des océans (CNEXO) tourné vers l'aquaculture et la valorisation des zones humides. De nombreux autres exemples pourraient être cités, où le CNRS agit de concert avec l'Institut national de la recherche agronomique, l'Institut national de la santé de la recherche médicale, le Centre national d'études des télécommunications, le Commissariat à l'énergie atomique...

#### *La stratégie*

**L**e CNRS doit maintenant développer une stratégie adaptée à ces objectifs. On peut distinguer quatre points forts dans cette stratégie :

##### *Une animation scientifique régionale*

En application du nouveau statut du CNRS, des délégués régionaux ont été nommés fin novembre 1982, à raison d'un par région de programme. Représentant et porte-parole de la direction du CNRS auprès des collectivités territoriales (politiques, administratives, universitaires), le délégué doit assurer une information réciproque et être l'artisan du développement d'une coopération entre le CNRS et la région dans ses différentes composantes. Cette mission doit être menée en liaison avec le délégué régional pour la recherche et le développement technologique du Ministère de la recherche et de l'industrie et en coordination avec les partenaires du CNRS, établissements d'enseignement supérieur, organismes de recherche et centres techniques. Le délégué doit également animer la réflexion et l'action de la communauté régionale du CNRS dans deux directions essentielles : l'ouverture vers les préoccupations régionales en matière de recherche et de technologie d'une part, le dynamisme et le développement du potentiel scientifique régional d'autre part.

Cette action doit évidemment se coordonner avec celle que conduit l'administrateur délégué. La solide décentralisation administrative de l'organisme constitue à l'évidence un instrument de premier plan sur lequel peuvent s'appuyer les initiatives de développement régional du CNRS. De la même manière, une articulation est à prévoir avec le chargé de mission aux relations industrielles dont la mission

**EFFECTIFS REGIONAUX DU GROUPE CNRS PAYÉS AU 31 DECEMBRE 1982 : 24 184 PERSONNES**

Localisation	Chercheurs	ITA	Total	%	Effect. 82/77 + 13,33 %	Localisation	Chercheurs	ITA	Total	%	Effect. 82/77 + 13,33 %
Île-de-France	9 132	8 360	13 482	51,88	8 780	Loire-Atlantique	173	415	588	2,42	98
Alsace	558	987	1 523	6,36	10 2	Mid-Pyrénées	262	658	1 010	4,18	24 6
Aquitaine	291	319	650	2,70	24 7	Nord-Pas-de-Calais	108	129	237	0,98	46 5
Auvergne	80	93	163	0,67	11 8	Basse-Normandie	45	205	250	1,02	33 0
Bourgogne	57	94	151	0,62	1 3	Haute-Normandie	54	19	93	0,32	55 9
Bretagne	134	148	282	1,17	43 1	Pay de la Loire	44	39	83	0,34	33 0
Centre	121	215	436	1,80	12 4	Picardie	11	8	16	0,07	12 8
Champagne-Ardenne	12	14	28	0,11	8 5	Poitou-Charentes	94	127	221	0,96	10 0
France Comté	25	58	83	0,34	12 2	Provence-Alpes-Côte d'Azur	723	1 212	1 935	8,01	21 1
LangUEDOC-Roussillon	311	492	810	3,35	17 7	Rhône-Alpes	797	1 239	2 026	8,39	25 9
Limousin	4	5	9	0,04	200 0	Régions non ventilées	—	—	—	—	—
						Outre-Mer - Etranger	23	97	114	0,47	10 8

de valorisation s'applique sur le terrain régional tout à fait privilégié pour la mise en œuvre de cette nouvelle mission du CNRS.

Le délégué scientifique, l'administrateur délégué et le chargé de mission aux relations industrielles formeront prochainement avec la représentation spécifique de la communauté scientifique régionale du CNRS au sein du CCRADT (1), une petite cellule qui assurera le suivi de l'activité du CNRS au niveau de la région et proposera à la direction des priorités pour l'élargissement de son activité dans son aire géographique.

*Des modes d'intervention*

Comment prendre en compte les initiatives et les besoins exprimés par une communauté scientifique régionale ? Comment accélérer le processus de développement des potentiels régionaux ?

Il faut d'abord être très clair sur un point : la politique scientifique régionale s'intègre complètement dans la politique générale de l'organisme. A ce titre, elle y marque des priorités, mais elle passe par tous les mécanismes habituels d'évaluation et de prise de décisions. Les responsabilités propres des départements scientifiques et du Comité national s'exercent pleinement en la matière, ce qui signifie à l'évidence qu'ils assument les objectifs de la politique régionale dans le cadre de la politique scientifique du CNRS, et qu'ils appliquent aux projets qui leur sont proposés les critères habituels de qualité.

Ceci précisé, revenons aux questions précédentes. Lorsque le besoin, construction ou équipement, par exemple, s'exprime uniquement en terme de financement, la réponse est, peut-on dire, relativement aisée. Elle se trouve

dans un soutien collectif auquel, à côté du CNRS, peuvent participer la région concernée, l'Enseignement supérieur, tel ou tel organisme ou agence. Des engagements de ce type ont souvent été souscrits ces dernières années.

La vraie question concerne le développement des moyens humains. Deux procédures particulières existent maintenant : la première est l'affichage de postes de chercheurs au profit de formations que l'on a décidé d'aider, étant bien entendu que le recrutement restera conditionné par la qualité des candidats ; environ quatre-vingt-dix postes de profil et niveau précisés sont ainsi affichés à partir de la prochaine session de recrutement, sur les trois cent vingt créations du budget 1983, cet affichage restant permanent quelques sessions consécutives. La seconde procédure est le programme « jeunes équipes », programme qui vise à favoriser l'installation de noyaux dynamiques ; ainsi espère-t-on, notamment, encourager l'émancipation d'équipes petites ou moyennes à partir des grands laboratoires et dont l'arrivée dans une unité différente permettra le démarrage d'orientations nouvelles et la constitution de compétences pluridisciplinaires. Bien entendu, on souhaiterait dans cet esprit favoriser la décentralisation de nombreuses équipes de la région parisienne, sans exclure des opérations entre régions de province. C'est d'ailleurs une opération interrégionale de ce type qui a permis la réalisation du Laboratoire de l'Houmeau précédemment cité.

Enfin, diverses formules existantes doivent être utilisées pour favoriser les opérations de restructuration. Ce sont, par exemple, les GS dont l'efficacité n'est plus à démontrer et, bien sûr, la création de laboratoires propres, formule prestigieuse que l'exiguité des budgets des dernières années avait raffinée mais qui demeure l'instrument privilégié d'une politique scientifique.

*Une politique de localisation des effectifs et des investissements*

Le CNRS a présenté en octobre 1982 au Comité de décentralisation son premier plan de localisation. Portant sur la période 1983-1985, ce plan amorce l'entreprise de rééquilibrage territorial du potentiel scientifique. Préparé en liaison étroite avec le ministère de tutelle et avec la Délégation à l'aménagement du territoire et à l'action régionale, le document présente des engagements globaux de répartition des moyens nouveaux entre les régions de province et la région Île-de-France ainsi que des projets précis d'implantations nouvelles.

Au plan des effectifs, il prévoit une répartition des postes frais de chercheurs et d'ingénieurs-techniciens-administratifs telle que le taux de croissance en province soit globalement de 50 % supérieur à ce qu'il sera en Île-de-France. De plus, un certain nombre d'opérations de décentralisation, essentielles pour accélérer le processus de croissance et de démarrage de centres provinciaux, sont prévues : elles impliqueraient une quarantaine d'équipes de cinq à dix personnes. Des mesures individuelles doivent pouvoir accompagner ces opérations.

Au plan des investissements, grands équipements et constructions, il est prévu que 70 % des crédits correspondants seront réservés à la province. Pour les constructions, le programme envisagé, qui porte au total sur 72 500 m<sup>2</sup>, nécessitera une coopération avec les Etablissements publics régionaux et les organismes partenaires.

On ne peut citer ici le détail des actions envisagées. A cet égard, on ne fera que mentionner un premier ensemble d'initiatives en sciences de l'homme et de la société allant dans le sens d'un meilleur équilibre national de ce secteur jusqu'ici très concentré sur Paris même. Diverses opérations sont ainsi

(1) CCRADT : Comité consultatif régional pour la recherche et le développement technologique.



1 - Ile-de-France, 2 - Alsace, 3 - Aquitaine, 4 - Auvergne, 5 - Bourgogne, 6 - Bretagne, 7 - Centre, 8 - Champagne-Ardenne, 9 - Corse, 10 - Franche-Comté, 11 - Languedoc-Roussillon, 12 - Limousin, 13 - Lorraine, 14 - Midi-Pyrénées, 15 - Nord-Pas-de-Calais, 16 - Basse-Normandie, 17 - Haute-Normandie, 18 - Pays de la Loire, 19 - Picardie, 20 - Poitou-Charentes, 21 - Provence-Alpes-Côte d'Azur, 22 - Rhône-Alpes.

(Dans la région Ile-de-France se trouvent les administrations déléguées : 1 - Paris A, 2 - Paris B, 3 - Rungis, 4 - Gif-sur-Yvette, 6 - Meudon).

LP : Laboratoire Propre  
 LA : Laboratoire Associé  
 ER : Équipe de Recherche  
 ERA : Équipe de Recherche Associée  
 URA : Unité de Recherche Archéologique  
 CID : Centre d'Information et de Documentation

#### CREATIONS DE FORMATIONS PAR LES SECTEURS SCIENTIFIQUES DU CNRS PENDANT LA PERIODE 1978 - 1982

Localisation	Math. — physique de base	Sciences physiques pour l'ingénieur	Chimie	Terre - ciel et atmosphère	Sciences de la vie	Sciences sociales	Humanités	Nombre de créations pendant la période 78/82	Nombre total de formations au 1/4/82
Ile-de-France	1 ERA, 7 ERA	5 ERA	1 LA, 2 ER, 8 ERA	4 LA, 2 ER, 7 ERA	4 LP, 1 LA, 4 ER, 12 ERA	3 ER, 19 ERA	4 ER, 10 ERA, 1 URA, 1 CID	101	644
Alsace			1 ERA	1 ERA	1 ERA	2 ERA	1 ERA	6	68
Aquitaine		2 ERA	1 ERA		1 LP, 2 ERA	2 ERA	3 ERA	11	50
Auvergne	1 ERA		2 ERA				1 CID	4	18
Bourgogne	1 ERA					2 ERA		3	12
Bretagne	3 ERA		2 ERA	2 ERA	2 ERA	6 ERA		14	32
Corse		1 ERA	2 ERA	1 ER, 1 ERX	1 ERA	1 ERA	1 ERA	8	31
Champagne-Ardenne					1 ERA			1	5
Franche-Comté	1 ERA	1 ERA				1 ERA		3	13
Languedoc-Roussillon			1 ERA	2 ERA	1 ER, 4 ERA	1 ERA	2 ERA	11	60
Limousin								0	3
Lorraine	1 ERA	3 ERA	1 ERA	1 ERA	1 ERA	1 ERA	1 ERA	9	34
Midi-Pyrénées	1 ERA	1 ERA	2 ERA	1 LP, 1 LA	1 LP, 2 ERA	1 ERA	1 ERA	11	52
Nord-Pas-de-Calais	2 ERA		1 ERA	1 ERA	1 LA	1 LA, 4 ERA	2 ERA	12	34
Basse-Normandie	1 LP		1 ERA		1 ERA			3	12
Haute-Normandie	1 ERA		1 ERA		1 ERA			3	12
Pays de la Loire	2 ERA		1 ERA		1 ERA			4	14
Picardie		3 ERA						3	4
Poitou-Charentes					1 ER, 1 ERA			2	18
Provence-Alpes-Côte d'Azur	2 ERA	1 LP, 3 ERA		1 ER, 1 ERA	2 LP, 1 ER, 2 ERA	1 ERA	3 ERA	17	100
Rhône-Alpes	1 ER	6 ERA		1 LA, 1 ERA	1 LP, 11 ERA	1 LA, 2 ERA		24	130
<b>TOTAL</b>								<b>250</b>	<b>1 341</b>

prévues en périphérie parisienne, à Lyon et Grenoble, Marseille, Montpellier, Lille, Rennes et Caen, pour ne citer que les plus proches d'entre elles.

Dans son état futur, le plan de localisation doit devenir le schéma directeur du développement scientifique régional du CNRS. Dans cette perspective, un travail important est en cours dans le cadre régional ainsi que dans les départements scientifiques en relation avec les organismes partenaires.

#### *Une politique de coopération, de concertation et de coordination*

Atteindre les objectifs proposés demande un effort particulier de coopération, de concertation et de coordination à et entre plusieurs niveaux :

- au sein de l'organisme, entre le niveau régional et le niveau central, pour évaluer et intégrer les objectifs régionaux dans la politique nationale ; de toute évidence, le Comité national doit faire bien cet effort de développement des potentiels scientifiques régionaux ;
- au niveau régional, comme cela a déjà été précisé, entre le CNRS et les autorités régionales d'une part, entre le CNRS et ses partenaires des grands organismes et de l'Enseignement supérieur, en liaison avec le délégué régional à la recherche et au développement technologique du Ministère de la recherche et de l'industrie ;
- au niveau national, dans la collaboration apportée à la direction de la recherche du Ministère de l'éducation nationale pour la mise en place d'une politique contractuelle avec les établissements d'enseignement supérieur ; dans la participation aux actions préparées dans le cadre du Comité interministériel d'aménagement du territoire (CIAT) ; dans les coopérations que le CNRS définit avec les directions des grands organismes.

Le bilan d'une première année de travail montre sans conteste l'effort important qui reste à faire pour améliorer la coordination à tous les niveaux. L'expérience acquise et la mise en place généralisée des structures nouvelles (CCRRDT, Délégués du MRI, etc...) devraient faciliter les choses à l'avenir.

#### *L'Ile-de-France : une situation particulière ?*

**A**yant largement décrit les données essentielles d'une politique dont le premier objectif est le développement du potentiel de

recherche des régions de province, on doit maintenant répondre par avance à l'interrogation de tous ceux qui à Paris et en région parisienne ont construit un ensemble scientifique de portée prédominante.

Peut-être faut-il d'abord rassurer. Les laboratoires d'Ile-de-France continueront à recruter : le taux élevé de croissance du CNRS annoncé pour les prochaines années doit y permettre l'indispensable renouvellement des moyens humains à un rythme satisfaisant. Au plan des moyens financiers, avec 30 % des engagements en matière d'opérations immobilières et d'équipements lourds et semi-lourds, c'est en fait un effort de rattrapage important qui s'annonce, puisque lors des six dernières années, aucune opération immobilière n'avait été réalisée en région parisienne et 20 % des crédits d'équipements lourds et semi-lourds y avaient été affectés.

Ceci fait, les acteurs de la recherche en Ile-de-France doivent assumer une responsabilité personnelle et collective au niveau du pays et au niveau de la région.

Ils doivent d'abord prendre conscience du rôle qu'ils peuvent jouer dans le développement scientifique des régions de province, où peut être transférée une partie sensible de la compétence accumulée en région parisienne, sans que soit menacée la vitalité des laboratoires concernés. On doit savoir que le CNRS est décidé à favoriser les actes de mobilité individuelle et les opérations de décentralisation orientées vers des objectifs précis, susceptibles d'accélérer de façon déterminante le développement des pôles provinciaux.

D'un autre côté, il est clair que s'appliquent en Ile-de-France toutes les propositions générales relatives à l'élaboration d'une politique régionale. Les questions suivantes n'intéressent-elles pas chacun des acteurs de la recherche dans cette région :

- la communication entre chercheurs et laboratoires de même discipline comme de disciplines différentes est-elle satisfaisante ? Comment peut-elle être améliorée ? Quel rôle peuvent jouer à cet égard les « campus » CNRS ?
- la structuration de la recherche, quelquefois très forte, quelquefois inexistante, selon les disciplines, ne peut-elle être réexaminée pour faire face aux nouveaux enjeux de la recherche fondamentale comme aux missions d'ouverture et de valorisation du CNRS ?
- quelles actions peut-on lancer, précisément, pour valoriser, transférer, no-

tiamment aux PME et PMI, tout l'acquis rassemblé dans de multiples domaines ?

– la répartition du potentiel scientifique en Ile-de-France, avec 95 % des effectifs au sud d'une ligne est-ouest traversant Paris en son centre est-elle satisfaisante ? La concentration des équipes en sciences de l'homme et de la société dans Paris intra-muros est-elle une nécessité immuable ou bien les nouvelles missions assignées à cette communauté la conduiront-elles, dans certains cas, à se rapprocher des autres communautés scientifiques ? Dans une perspective à dix ou quinze ans impliquant un développement de la recherche, de nouvelles implantations sont-elles à envisager, notamment à l'est et au nord de la région ?

Toutes questions auxquelles il va falloir répondre, sans se presser, en liaison étroite avec les départements ministériels concernés, avec la région Ile-de-France, avec nos partenaires.

**L**e CNRS a donc créé les conditions d'une dynamique scientifique régionale. Qu'on ne se fasse pas d'illusion : la construction sera lente parce que les processus essentiels en la matière sont lents, qu'il s'agisse de la croissance générale de l'organisme et à l'intérieur de celle-ci de la croissance d'une discipline particulière, ou encore de la formation d'une compétence.

Il faut bâtir solide : il faut donc s'appuyer sur l'acquis et augmenter les moyens en visant taille critique, qualité et cohérence. La mobilité des personnes et des équipes sera un facteur déterminant de cette construction, comme le sera la coopération entre les partenaires de la recherche.

S'appuyant sur des entités régionales puissantes et cohérentes, le CNRS va renforcer sa capacité d'ensemble mise au service de la recherche fondamentale et de sa valorisation. Soyons honnêtes : il aura plus de mal à faire coïncider dans chaque région les problématiques de la recherche fondamentale et les aspirations à court terme des collectivités territoriales. Que ces dernières sachent qu'un effort réel sera fait pour tenir compte des spécificités et besoins régionaux et qu'en tout état de cause c'est l'ensemble des moyens du CNRS qui est mis à la disposition de chaque région à travers les coopérations interrégionales.

## CENTRE DE DOCUMENTATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

**L**e Centre de documentation scientifique et technique du CNRS (CDST) propose à titre expérimental de fournir aux lecteurs intéressés, un complément d'information sur une sélection d'articles publiés dans le Courrier du CNRS, sous la forme d'une bibliographie standard. Ces bibliographies standards sont réalisées par interrogation de la base de données bibliographiques multidisciplinaires PASCAL implantée sur le serveur national français QUESTEL-TELESYSTEME.

Pour chaque article sélectionné, la bibliographie comportera la liste des références d'articles récents publiés sur le sujet, avec pour chaque référence, indication de : titre de l'article, noms des auteurs, références bibliographiques, descripteurs et éventuellement un court résumé. Les articles pouvant faire l'objet d'une bibliographie sont choisis en collaboration avec le comité de rédaction du Courrier du CNRS. Pour tous les articles, le CDST conseillera une stratégie de recherche destinée aux lecteurs souhaitant effectuer eux-mêmes leur bibliographie sur terminal.

Le CDST peut également effectuer, à la demande, des recherches bibliographiques rétrospectives ou mettre au point des profils documentaires sur tout sujet scientifique ou technique.

La base de données PASCAL analyse la littérature mondiale dans les domaines des sciences exactes, des sciences de la vie, des sciences de la terre et de la technologie.

Plus de 90 % des documents analysés sont des articles de périodiques (9 000 titres), mais PASCAL comprend également des comptes-rendus de congrès (2 600/an), des thèses (6 000/an), des rapports (2 500/an) et quelques ouvrages (1 000/an). Les documents analysés proviennent du monde entier (100 langues différentes), ils sont principalement rédigés en anglais (63 %), français (12 %), russe (10 %) et allemand (8 %).

PASCAL automatisé depuis 1973 comprend 4,3 millions de références (février 1983) et s'accroît chaque année d'environ 470 000 signalements nouveaux.

Ces bibliographies standards sont disponibles au CDST au prix de lancement de 100 F H.T. (118,60 F avec TVA) pour celles comportant moins de 50 références ; 130 F H.T. (154,18 F avec TVA) pour les autres. Il suffit de retourner le coupon prévu à cet effet accompagné d'un titre de paiement ou d'un bon de commande officiel de l'organisme payeur (voir coupon p. 30).

Cet exemple sur l'hélium 3 polarisé a été obtenu en recherchant les documents de la base de données comportant les mots : HELIUM 3 ET (SUPERFLUID / OU POLARIS /) ET ETAT LIQUIDE.

NO :	82-X-0182697
FT :	(RESUMES) DES EXPOSES/REUNION HELIUM, ECOLE NORMALE SUPERIEURE, LABORATOIRE DE PHYSIQUE, PARIS, 7-8 JANVIER 1982
CS :	ECOLE NORMALE SUPERIEURE/PARIS/FRA
DT :	TC;LM
SO :	REUNION HELIUM/1982-01-07/PARIS; FRA; DA. 1982; 33 P.; 30 CM; LOC. CNRS-YM 4553
LA :	FRE; ENG
FA :	RESUME DES EXPOSES: HELIUM 3, 4; SUPERFLUIDITE; CRISTAUX QUANTIQUES; HYDRODYNAMIQUE; POLARISATION ETC.
CC :	160.A.07
FD :	ETAT LIQUIDE; SUPERFLUIDITE; HYDRODYNAMIQUE; ECOULEMENT; CRISTAL QUANTIQUE; CONGRES; POLARISATION; HELIUM 3; HELIUM 4
ED :	LIQUID STATE; SUPERFLUIDITY; HYDRODYNAMICS; FLOW; CONFERENCE; POLARIZATION; HELIUM

## L'hélium 3 polarisé

Corps aux propriétés peu ordinaires, l'hélium 3 existe sous deux formes correspondant à deux orientations opposées dans l'espace. Mais que serait une phase où tous les moments magnétiques seraient dirigés dans la même direction ?

Bernard CASTAING

L'hélium naturel est composé en majeure partie d'hélium 4, le 4 signifiant que le noyau de l'atome d'hélium contient 4 nucléons : 2 protons et 2 neutrons. Il existe cependant un autre isotope stable de l'hélium qui est bien moins abondant. C'est l'hélium 3 dont le noyau est constitué de 3 nucléons (2 protons et 1 neutron). On sait créer des échantillons contenant exclusivement l'un ou l'autre de ces isotopes. A basse température, les propriétés de l'hélium 4 et de l'hélium 3 sont radicalement différentes. Ce résultat n'est pas lié à une différence d'interaction électrostatique entre les atomes, mais à une propriété bien plus subtile de la matière : l'existence des statistiques quantiques. Ainsi, les atomes d'hélium 4 ont tendance à se grouper dans le même état tandis que les atomes d'hélium 3 se répartissent dans des états différents. Cela a en particulier pour conséquence qu'à la température de 2°K, l'hélium 4 liquide est superfluide, c'est-à-dire qu'il peut s'écouler sans frottement, alors que l'hélium 3 ne l'est qu'à beaucoup plus basse température.

L'hélium 3 est d'ailleurs un corps aux propriétés peu ordinaires. Ainsi, à basse température, on peut « geler » l'hélium 3 en chauffant sa phase liquide. Ce résultat, déroutant pour l'intuition (on ne fait pas bouillir de l'eau pour obtenir de la glace), est relié au fait que l'hélium 3 existe sous deux formes que l'on note  ${}^3\text{He}^+$  et  ${}^3\text{He}^-$ . Ces deux formes correspondent à deux orientations opposées dans l'espace du moment magnétique du noyau de l'at-

ome d'hélium 3. Il est alors séduisant pour l'esprit d'imaginer ce que serait une phase où tous les moments magnétiques seraient dirigés dans la même direction. On obtiendrait alors un corps, aux propriétés physiques nouvelles, appelé hélium 3 polarisé. Celui-ci commence à être étudié tant au point de vue expérimental que théorique.

Parmi tous les problèmes que posent les grandes assemblées de particules que constituent les gaz, les solides et les liquides, les physiciens ne comprennent vraiment bien que le gaz presque parfait où les particules interagissent très peu. Bien sûr, ils savent tourner les problèmes, remplacer des particules interagissant fortement par des « quasi particules » qui, elles, interagissent peu, de sorte que les cristaux et, d'une manière générale, tous les états ordonnés de la matière sont assez bien compris. Nous devrions plutôt dire : assez bien décrits, car, dès qu'on se demande pourquoi tel ordre est apparu plutôt que tel autre, on retombe dans le difficile problème des interactions.

Prenons un exemple : l'état supraconducteur est un état ordonné des électrons d'un métal, qui apparaît par suite d'une « attraction » indirecte entre eux. Une fois admis que cette « attraction » conduit à la formation de « paires » d'électrons, on peut remplacer l'interaction par son effet moyen et on sait bien décrire les propriétés d'un supraconducteur.

Plus l'« attraction » sera grande, plus grande sera la température  $T_c$  où l'on brisera ces paires, faisant disparaître l'état supraconducteur. L'intérêt technologique à avoir la plus haute température  $T_c$  possible est évident. Mais, si l'interaction est trop forte, le gaz d'électrons risque de se « geler » comme le font les molécules d'eau et devenir isolant ! Pour certains types d'interaction, un ordre magnétique peut également apparaître.

□ Bernard Castaing, professeur à l'université de Grenoble, fait partie du Centre de recherches sur les très basses températures, avenue des martyrs, BP 166 X - 38042 Grenoble Cedex.

□ Les dessins sont de Jean-Pierre Petit.



Comment les ordres magnétiques, isolants et supraconducteurs se partagent-ils les diagrammes de phases, voilà ce qu'il serait intéressant de comprendre. En l'absence de théorie, on peut s'aider de l'expérience. Il existe des matériaux où suivant la pression et la température, les ordres magnétiques, isolants et supraconducteurs apparaissent et ils sont intensivement étudiés. Mais, ce sont des composés difficiles à obtenir, rarement monocrystallins, de structure compliquée. Il faudrait pouvoir dégager les grandes idées avec un système plus simple, des particules possédant les mêmes propriétés d'indiscernabilité que les électrons, mais sans la charge et sans le réseau.

La nature nous a fourni ces particules. Ce sont les atomes de  ${}^3\text{He}$ . Leur noyau ne possède qu'un neutron, ils obéissent comme les électrons à la statistique de Fermi : ce sont des fermions. Le  ${}^3\text{He}$  liquide devient suprafluide à basse température. C'est l'état analogue à la supraconductivité



Fig. 1 – La longueur d'onde  $\lambda$  d'un train d'onde est connue d'autant plus précisément qu'il y a plus d'oscillations dans ce train d'onde.

du système d'électrons. En augmentant la pression, on le rend solide. Dans le solide à basse température, l'ordre magnétique apparaît et tout indique qu'il est très près d'apparaître dans le liquide. On peut également diluer le  $^3\text{He}$  dans son isotope  $^4\text{He}$ . On se rapproche ainsi autant qu'on veut du gaz parfait de fermions dont nous allons à présent parler.

### *Le gaz parfait de fermions*

**L**e comportement inhabituel du gaz parfait à basse température est une conséquence directe de la mécanique quantique. Afin de faire comprendre le comportement quantique des particules, nous nous appuierons sur la notion d'onde associée à une particule. Nous allons voir immédiatement que les idées de relations d'incertitude et d'état en découlent.

Prenons l'exemple en effet d'un train d'ondes sur une corde tendue. Si le train comporte  $v$  oscillations, la longueur d'onde  $\lambda$  est connue à  $1/v$  près (fig. 1). Traduit mathématiquement, cela s'écrit, si  $\Delta x$  est la longueur du train d'onde :

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\Delta (1/\lambda)}{1/\lambda} = 1/\nu = 1/(\Delta x/\lambda)$$

$$\text{ou encore } \Delta x \cdot \Delta \frac{1}{\lambda} \approx 1$$

La longueur d'onde associée à une particule est reliée à sa quantité de mouvement  $p$  par  $\lambda = \frac{h}{p}$  où  $h$  est la constante de Planck. Pour les particules, notre relation s'écrit donc :

$$A \times A \rightarrow \mathbb{R}$$

C'est la relation d'incertitude de Heisenberg qui nous dit que l'on ne peut confiner une particule dans un espace étroit  $\Delta x$  sans augmenter l'incertitude sur sa vitesse et donc son énergie. Cette énergie cinétique minimum d'une particule confinée est ce que l'on appelle l'énergie de point zéro.

Reprendons l'exemple de la corde tendue. Elle peut vibrer sur toute sa longueur en 1, 2 fuseaux. Ce sont des états distincts de vibrations où la longueur

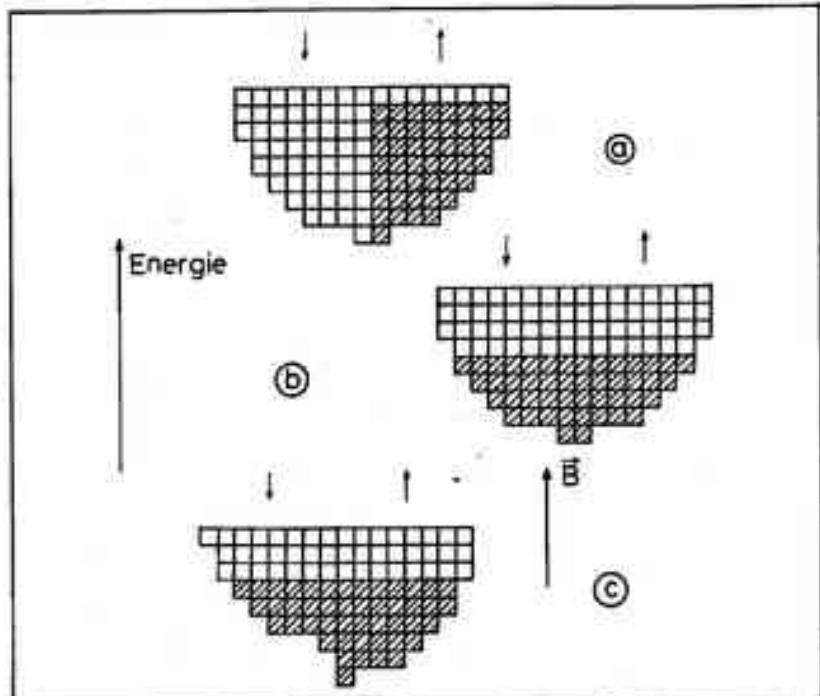


Fig. 2 – Répartition schématique des particules dans les états (cases fictives qui peuvent être pleines ou vides).

- a) Il n'y a que des particules  $\dagger$ . Plus l'énergie (donc la quantité de mouvement) est grande, plus il y a d'êtres de même énergie car  $\vec{P}$  peut pointer dans diverses directions. Le nombre d'êtres de quantité de mouvement inférieure à  $P_F$   $\ddagger$  (c'est le nombre de particules) est proportionnel au volume d'une sphère de rayon  $P_F$   $\ddagger$ . Il est également proportionnel au volume de la boîte de sorte que

Il faut maintenant expliquer pourquoi nous avons mis une flèche à côté de  $P_{E\uparrow}$  et pourquoi il y a des cases vides à gauche sur la figure 2a. C'est que les atomes de  $^3\text{He}$ , comme d'ailleurs les électrons, possèdent un moment magnétique qui peut lui-même être dans deux états (seulement deux !) : dans le sens du champ magnétique  $B$  ( $\uparrow$ ) ou dans le sens opposé ( $\downarrow$ ), de sorte que les états d'énergie dont nous avons parlé auparavant sont chacun dédoublés, la particule pouvant avoir l'une ou l'autre des orientations  $\uparrow$  ou  $\downarrow$ . La situation représentée correspond au cas où toutes les particules ont la même orientation. C'est le  $^3\text{He}$  polarisé !

-b) Il y a autant de particules  $\uparrow$  que  $\downarrow$ . C'est le cas normal, les particules se répartissent en nombre égal entre les deux orientations. On voit que cela correspond à une énergie moyenne plus basse. La différence d'énergie, par particule, est de l'ordre de  $E_F$ . Sous l'effet d'un champ magnétique  $B$ , l'énergie de chaque particule  $\uparrow$  est abaissée de  $\mu B$  où  $\mu$  est le moment magnétique de la particule. De même, chaque particule  $\downarrow$  voit son énergie élevée de  $\mu B$ .

– c) Un champ magnétique  $\vec{B}$  abaisse l'énergie des particules  $\downarrow$  et élève celle des particules  $\uparrow$ . A l'équilibre, il y a plus de particules  $\downarrow$  que de  $\uparrow$ . C'est la situation d'énergie minimum. On voit enfin apparaître de l'ordre de  $\vec{B}$  des particules  $\downarrow$  est massée dans l'ordre  $\uparrow$ .

Il faut donc un champ magnétique de l'ordre de  $\frac{E_F}{\mu}$

pour polariser notablement le système. Pour les densités habituelles, ce champ magnétique est très élevé. Il faut donc beaucoup d'énergie pour modifier cette espèce « d'ordre magnétique » qu'impose la statistique de Fermi.

d'onde est de plus en plus petite. De même, une particule dans une boîte a divers « états » de longueurs d'ondes allant de la dimension de la boîte aux dimensions de l'atome, ou même plus petites. Pour une boîte de 1 cm de côté et un atome d'<sup>3</sup>He par exemple, la plus grande longueur d'onde possible (2 cm) correspond à une vitesse presque nulle (7 microns par seconde). Une longueur d'onde de dimension atomique correspond à environ 100 m/s.

A ce stade, il faut introduire l'autre notion fondamentale pour comprendre le gaz de fermions. C'est le principe de Pauli qui dit que deux fermions ne peuvent occuper le même état. Ils s'opposent en cela aux bosons que l'on peut trouver en nombre quelconque dans le même état.

Le problème théorique d'un gaz de M particules dans une boîte de volume V à température nulle (énergie minimum) est alors simple : les M particules occupent les M états les plus bas. L'état le plus haut en énergie correspond à une quantité de mouvement  $P_F$ , donc à une énergie :

$$E_F = \frac{p_F^2}{2m}$$

où m est la masse d'une particule (fig. 2).

### Les phases diluées

**U**ne partie des expériences projetées ou en cours de réalisation sur le <sup>3</sup>He polarisé concerne en fait les phases « diluées », c'est-à-dire soit le gaz soit <sup>3</sup>He dissout dans <sup>4</sup>He.

Ces deux systèmes sont proches du gaz parfait, car les particules sont en moyenne relativement éloignées les unes des autres et les interactions sont faibles. Nous avons vu quel était l'effet du principe de Pauli sur le gaz parfait de fermions : une sorte d'ordre magnétique. Briser cet ordre en polarisant le gaz demande un surcroît d'énergie et augmente, à densité égale, la pression et la vitesse du son. La capacité calorifique est également modifiée. Toutes ces grandeurs sont donc intéressantes à mesurer. Ce sont en quelque sorte les propriétés statiques du système. Elles dépendent peu des interactions.

En revanche, les propriétés de transport comme la viscosité  $\eta$ , la conduction thermique K, dépendent beaucoup des interactions. Mais, nous devons d'abord parler de l'effet du principe de Pauli sur la distance relative des particules.

Bien sûr, la position n'a pas de sens pour des états de quantité de mouvement bien définie, mais nous pouvons

parler de la probabilité :

$g(x, y, z) \delta x \delta y \delta z$

pour que le vecteur qui joint deux particules ait pour composantes x, y, z à  $\delta x, \delta y, \delta z$  près. En fait, g ne dépend que de la distance  $r$  entre ces particules. Si ces deux particules n'ont pas la même orientation de moment magnétique,  $g(r)$  est parfaitement indépendante de  $r$ .

En revanche, pour deux particules de même orientation,  $g(r)$  s'annule approximativement pour :

$$r < \frac{h}{P_F} = \lambda_F$$

C'est ainsi que se traduit le principe de Pauli pour les distances mutuelles dans un gaz parfait : deux particules identiques ne peuvent se rapprocher plus près qu'une longueur d'onde  $\lambda_F$ . Cette remarque va nous aider à comprendre l'effet de la polarisation sur les propriétés de transport.

Les coefficients de transport comme la viscosité  $\eta$ , la conductivité thermique K, sont proportionnels au libre parcours moyen fait par une particule entre deux collisions. En effet, K par exemple, traduit la vitesse à laquelle une particule transporte son énergie d'un point à l'autre. Si elle change sans cesse de direction à cause des collisions, ce temps sera long. Donc, si on diminue les interactions,  $\eta$  et K augmentent.

Or, si  $\lambda_F$  est suffisamment grand (densité suffisamment faible), tout se passe comme si les atomes identiques n'interagissaient pas. En effet, ils restent toujours au moins à une distance  $\lambda_F$  l'un de l'autre. Il suffit donc que  $\lambda_F$  soit supérieur au rayon d'action de l'interaction. Pour un gaz non polarisé, cela ne change pas grand chose, car les chocs sur les atomes d'orientation opposée subsistent. Mais, si l'on polarise progressivement le gaz, le libre parcours  $\lambda$  augmente, les atomes majoritaires (1) rencontrant de moins en moins d'atomes minoritaires (1),  $\eta$  et K peuvent (théoriquement) augmenter de plusieurs ordres de grandeur.

### Les phases denses

**C**e dont nous venons de parler s'applique au gaz presque parfait. Les phénomènes y sont relativement bien compris et il serait surprenant que l'expérience ne confirme pas ici la théorie. Mais, ce ne serait pas la première fois et la vérification n'est pas à négliger !

Cependant, notre but ultime est de comprendre le problème des fermions en forte interaction, c'est-à-dire dans notre cas le <sup>3</sup>He liquide et solide.

Pendant vingt ans, le <sup>3</sup>He liquide a

été considéré comme bien compris. L. Landau avait montré, en 1956, que l'on pouvait remplacer les fermions en forte interaction par des particules fictives, de masse et d'interaction différentes, de sorte qu'on retrouvait le comportement du gaz parfait à suffisamment basse température. Deux ou trois paramètres, ajustables d'après l'expérience, permettraient de décrire toutes les propriétés de <sup>3</sup>He liquide. Mais les physiciens se sont progressivement de moins en moins satisfaits de cette description, car le but de toute théorie est de prédire et si celle-ci prédisait bien que la chaleur spécifique devait être proportionnelle à la température T ou que la susceptibilité magnétique devait être constante à basse température, elle était incapable par exemple de prédire les propriétés du liquide fortement polarisé.

Afin de deviner ce à quoi nous devons nous attendre, nous sommes donc réduits à la thermodynamique, qui ne fait jamais défaut, et aux idées générales que nous allons exposer à présent.

Dans le cas du gaz parfait, nous avons vu qu'il existait une énergie caractéristique :  $E_F$ . Dans les phases denses (liquide, solide), nous allons voir qu'il en existe deux, l'une correspondant au temps  $\tau_F$  qu'il faut à un atome pour s'échanger avec un de ses voisins et l'autre correspondant à l'énergie de point zéro de l'atome confiné dans la « cage » que forment ses voisins.

Supposons, en effet, que nous puissions observer une de ces phases durant un temps t et que cela nous permette de mesurer l'énergie moyenne d'un atome. Cette valeur différera de l'énergie moyenne réelle d'un atome d'à peu près  $\hbar$ . Il existe, en effet, entre énergie et temps, une relation d'incertitude :  $\Delta E \Delta t \approx \hbar$

Elle se comprend aisément, si l'on se souvient qu'en mécanique quantique les énergies et les fréquences sont une même grandeur. Or, pour mesurer avec une précision relative de  $1/\nu$  la fréquence d'un mouvement périodique, il faut l'observer pendant  $\nu$  périodes. C'est exactement ce que nous dit la relation d'incertitude.

Supposons maintenant que t est légèrement inférieur à  $\tau_F$ . Dans cette estimation de l'énergie moyenne, on pourra considérer les atomes comme discernables, puisqu'ils ne s'échangent pas. Il importe donc peu qu'ils soient bosons ou fermions, polarisés ou non.

Or, cette estimation n'est fausse que de l'ordre de  $E_F^2 = \hbar/\tau_F$ . C'est donc cet ordre de grandeur d'énergie qui caractérise la « rigidité magnétique » du système à basse température. Un

champ magnétique  $B$  polarisera une proportion  $\mu B$

$$\frac{E_F^*}{E_F}$$

des atomes, il faudra atteindre une température  $T_F = \frac{E_F^*}{k_B}$

(où  $k_B$  est la constante de Boltzmann) pour briser « l'ordre magnétique ». Enfin, la différence d'énergie par atome entre l'état polarisé et l'état normal sera de l'ordre  $E_F^*$ .

Quant à l'énergie de point zéro, elle est due au confinement d'un atome dans une région de dimension atomiques :  $a$ . La quantité de mouvement minimum de l'atome est alors  $p = \frac{\hbar}{a}$

et son énergie du point zéro :

$$E_0 = \frac{p^2}{2m} \sim \frac{\hbar^2}{2ma^2}$$

Dans le gaz parfait, à quoi  $E_F^*$  correspond-il ? La distance entre atomes voisins était de l'ordre de

$$\lambda_F = \frac{\hbar}{p_F}$$

La vitesse relative était environ

$$V_F = \frac{p_F}{m}$$

Donc, le temps que deux atomes voisins mettaient à s'échanger était :

$$T_F = \frac{\hbar / p_F}{V_F} = \frac{\hbar / p_F}{m} = \frac{\hbar^2}{p_F^2 m}$$

$$E_F^* = \frac{\hbar^2}{T_F m} = \frac{p_F^2}{m}$$

Ce n'est rien d'autre que l'énergie de Fermi. On peut voir que l'énergie du point zéro  $E_0$  est dans ce cas du même ordre. Par contre, dans une phase dense, les atomes mettent beaucoup plus de temps à s'échanger qu'à faire une oscillation dans leur cage :  $E_F^* \ll E_0$ .

Par exemple, dans les phases liquides et solides de  $^3\text{He}$ ,

$$\frac{E_0}{k_B} \approx 30^\circ\text{K}$$

Dans le solide, l'ordre magnétique intervient à  $1\text{mK}$ , donc

$$\frac{E_F^*}{k_B} \approx 1\text{mK}$$

Dans le liquide, l'échange de deux atomes est plus facile, « l'ordre magnétique se rapproche de celui du gaz parfait :  $\frac{E_F^*}{k_B} \approx 300\text{mK}$

$$\frac{k_B}{k_B}$$

Pour un gaz parfait de même densité, l'énergie de Fermi serait

$$\frac{E_F}{k_B} = 3\text{K}$$

ce qui souligne l'importance des interactions !

Donc, en résumé, la polarisation provoquera une augmentation d'énergie par atome de l'ordre de  $300\text{mK}$  pour le liquide, de l'ordre de  $1\text{mK}$  pour le solide.

### L'effet Pomeranchuk

Cette remarque a une conséquence spectaculaire. À des températures inférieures à  $300\text{mK}$ , le liquide a déjà commencé à s'ordonner magnétiquement, mais pas le solide. Or, en chauffant, on passe d'une phase plus ordonnée à une phase moins ordonnée. On passera donc du liquide au solide en chauffant ! C'est ce que montre le diagramme de phase du  $^3\text{He}$  non polarisé (fig. 3). Aux températures supérieures à  $300\text{mK}$ , tout rentre dans l'ordre classique. Cette remontée de la pression d'équilibre à basse température est ce que l'on appelle l'effet Pomeranchuk.

Pour le  $^3\text{He}$  polarisé, on n'attend rien de tel. Le liquide et le solide sont en quelque sorte déjà ordonnés magnétiquement. Donc, pas de remontée Pomeranchuk. Une courbe d'équilibre possible est représentée en pointillé sur la figure 3.

Jusqu'à quelle pression descendra-t-elle, il est impossible de le prédire, car cela dépend de façon très fine de l'augmentation d'énergie du liquide quand on le polarise. Il faut se tourner vers l'expérience.

### Les expériences

Pour l'étudier, il faut d'abord obtenir  $^3\text{He}$  polarisé ! On peut essayer d'appliquer un champ magnétique  $B$ . Cela n'est pas très efficace !

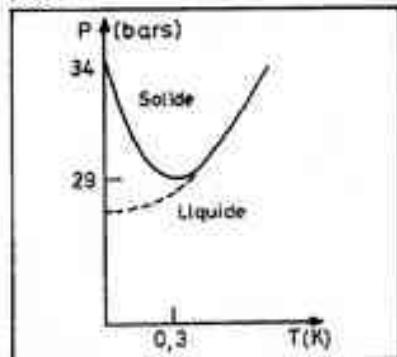


Fig. 3 - En trait plein, le diagramme de phase de  $^3\text{He}$  normal. En pointillé, un diagramme possible pour  $^3\text{He}$  totalement polarisé. Chaque échelle est linéaire. Celle de la température part du zéro absolu.

Pour obtenir une polarisation notable, nous avons vu qu'il faudrait un champ  $B$  tel que :  $\mu B \approx k_B T_F$

pour le liquide  $T_F = 300\text{mK}$  et cela donne  $B = 400\text{Tesla}$ , plus de dix fois ce que l'on sait produire avec d'énormes bobines consommant 10 Mega-Watts et nécessitant une rivière pour les refroidir !

On ne tombe à une valeur plus raisonnable de 10 Teslas que pour  $T_F > 8\text{mK}$ , ce qui correspond à un mélange de 0,01 % de  $^3\text{He}$  dans  $^4\text{He}$ . Une expérience a été réalisée dans ces conditions aux Bell Laboratories aux Etats-Unis.

Le pompage optique des atomes excités par une décharge électrique est beaucoup plus efficace. Par cette méthode, délicate à mettre en œuvre, des chercheurs du Laboratoire de spectroscopie de l'ENS ont obtenu des polarisations de l'ordre de 50 %. C'est une méthode destinée à l'étude des phases diluées, mais on peut espérer condenser le gaz  $^3\text{He}$  polarisé sans trop perdre de sa polarisation.

Une autre méthode, plus simple, quoique la polarisation obtenue soit éphémère, a été proposée et utilisée au Centre de recherches sur les très basses températures de Grenoble et à Copenhague. On se sert du fait que le solide est beaucoup plus facile à polariser que le liquide. Il suffit de cinq Teslas à une température de  $3\text{mK}$  pour obtenir une polarisation de 70 %. En fondant brutalement ce solide, on peut obtenir du liquide de même polarisation ! Bien sûr, il s'agit d'un état hors d'équilibre ! Les premières expériences ont montré l'effet produisant un liquide polarisé à 40 % à  $300\text{mK}$ . Cette polarisation disparaît en quelques minutes. D'autres expériences sont en cours pour déterminer les propriétés thermodynamiques (énergie interne à diverses polarisations et températures) de ce liquide polarisé.

Enfin, toute cette étude demandera une meilleure compréhension des mécanismes de fusion. Mais, ceci est une autre histoire !

### BIBLIOGRAPHIE PROPOSÉE PAR LE COST

Le Centre de documentation scientifique et technique du CNRS propose à titre expérimental de fournir aux lecteurs intéressés, un complément d'information sur ce sujet, sous la forme d'une bibliographie standard (voir texte p. 167). La bibliographie concernant cet article est disponible au CDST au prix de 100 F HT (voir bon de commande p. 20).

Cette bibliographie a été obtenue en recherchant les documents de la base de données comprenant les mots :

HELIUM 3 ET (SUPERFLUID) OU POLARISÉ ET ETAT LIQUIDE. Environ 120 références.

(Le signe / indique la présence d'une briseure, en recherche tous les mots commençant par la racine indiquée !

Exemple : POLARISÉ / → POLARISATION, POLARISÉ, POLARISÉE, etc ...).

# Le Manchot empereur : une stratégie basée sur l'économie d'énergie

L'étude de cet oiseau marin, soumis à un froid intense et à un jeûne prolongé, permet d'aborder les mécanismes fondamentaux d'épargne énergétique.

Yvon LE MAHO

**L**es Manchots sont des oiseaux habitant exclusivement l'hémisphère Sud et hautement spécialisés dans l'adaptation à la vie marine. Contrairement à l'image que l'on s'en fait souvent, ils ne vivent pas exclusivement dans un environnement polaire. Sur dix-sept espèces, dix vivent dans des zones tempérées ou subtropicales, ou même, pour l'une d'entre elles, aux îles Galapagos, c'est-à-dire à l'Équateur. Parmi les sept espèces vivant dans les régions antarctiques et subantarctiques, le Manchot empereur est la seule à se reproduire le long des côtes antarctiques durant l'hiver austral.

Le Manchot empereur est le plus grand de tous les Manchots actuels : il mesure environ un mètre et sa masse corporelle est comprise entre environ vingt et quarante kilogrammes. Comme tous les Manchots, il tire sa subsistance uniquement de la mer (crustacés, poissons, céphalopodes). C'est un remarquable plongeur puisqu'il est capable d'atteindre la profondeur de deux cent soixante-cinq mètres et peut rester en apnée pendant dix-huit minutes (1). Comme c'est également le cas pour les autres Manchots, la vie du Manchot empereur est caractérisée par l'alternance de séjours alimentaires en mer et de longues périodes de jeûne hors de l'eau, celles-ci étant liées à la reproduction et à la mue. Au total, le Manchot empereur passe près de la moitié de l'année à jeûner ! De plus, puisque ce Manchot est le seul à se re-

produire le long des côtes antarctiques durant l'hiver austral, il a la particularité de jeûner dans des conditions climatiques très défavorables. Dans les colonies situées aux plus basses latitudes (vers 77°S), la température ambiante peut être aussi basse que -50°C. Les tempêtes (appelées blizzards lorsque le vent est chargé de particules de glace) sont fréquentes. En Terre Adélie la vitesse du vent peut atteindre 300 km/h et on sait que dans un blizzard, avec un vent moyen de 125 km/h, une surface d'un mètre carré perpendiculaire à la direction du vent est traversée par dix tonnes de glace en une heure (2).

Au total, on dénombre actuellement une trentaine de colonies de Manchots empereurs, établies pour la plupart sur la banquise qui se forme en hiver le long des côtes du continent antarctique.

Ces colonies sont localisées dans des zones dites préférentielles, où la glace de mer est solide et ne présente qu'un faible risque de destruction au cours d'une tempête (par exemple parce que la banquise est ancrée entre le continent et des îles). L'engagement de la mer pouvant être important, la distance séparant les colonies de la mer libre peut être considérable, plus de deux cents à trois cents kilomètres.

## Un cycle reproducteur hivernal

À près une période estivale passée en mer (de janvier à mars, environ), au cours de laquelle ils accumulent des réserves énergétiques, les Manchots empereurs

Avant de décrire cet extraordinaire cycle reproducteur du Manchot empereur qui commence avec l'hiver antarctique, il est important de remarquer qu'il n'y a qu'un seul endroit au monde où l'on puisse réellement l'étudier ! En effet, une seule base a été établie à proximité d'une colonie de Manchots empereurs, la station Dumont d'Urville, base scientifique française de Terre Adélie. C'est le biologiste français Jean Prévost (université de Limoges) qui a réalisé la première étude détaillée du cycle reproducteur du Manchot empereur ; ses travaux d'écologie ont été complétés par Jean-Louis Mougin et Monique Van Beveren du Muséum national d'histoire naturelle et Paul Irenmann (Centre d'études phytosociologiques et écologiques Louis Emberger, CNRS, Montpellier). C'est essentiellement grâce à Pierre Jouventin (Institut des sciences de l'évolution, CNRS, Université de Montpellier) que l'on comprend maintenant la stratégie adaptative du Manchot empereur du point de vue éco-éthologique et que l'on sait notamment comment se fait la reconnaissance individuelle chez cette espèce. Avec René Groseolas (Labora-

toire de physiologie animale et nutrition, CNRS, Université de Dijon) et Gérard Dewasmes (Laboratoire de thermorégulation, CNRS, Université de Lyon), notre équipe (Laboratoire de physiologie respiratoire, CNRS, Université de Strasbourg) étudie les aspects physiologiques de la stratégie adaptative du Manchot empereur : nos efforts portent plus particulièrement sur la régulation de son métabolisme énergétique, sur son métabolisme lipidique, glucidique et protéique et sa régulation hormonale. D'autres équipes de physiologie sont d'ailleurs associées à ces recherches, notamment au Centre de recherche sur la nutrition du CNRS (Bellevue), au Muséum national d'histoire naturelle (Laboratoire d'endocrinologie comparée), à l'Université de Montpellier (Laboratoire de neuroendocrinologie), mais aussi à l'étranger. Enfin, une étude anatomique est réalisée par G. Trauva du Muséum.

Ces travaux sont réalisés dans le cadre des programmes de la Mission de recherche des Terres australes et antarctiques françaises, avec le soutien technique et logistique des Expéditions polaires françaises.

□ Yvon Le Maho, chargé de recherche au CNRS, est responsable de programmes de physiologie animale dans les Terres australes et antarctiques françaises. De 1971 à 1981, période durant laquelle a été réalisé l'essentiel de ce travail, il a été rattaché au Laboratoire de thermorégulation du CNRS à Lyon. Il travaille maintenant à Strasbourg, au Laboratoire de physiologie respiratoire du CNRS.

rejoignent leur colonie de reproduction au moment où la banquise se forme, c'est-à-dire entre fin mars et début avril. Leur vitesse de marche sur la banquise est de l'ordre d'un à deux kilomètres/heure.

Dès leur arrivée dans la colonie, les Manchots empereurs se mettent à la recherche de leurs partenaires. Les couples se forment rapidement mais les accouplements n'ont lieu qu'un mois plus tard ; les œufs sont pondus environ dix à quinze jours après la copulation. La femelle pond un seul œuf, de quatre cent cinquante grammes. Après la ponte les deux partenaires paradent à intervalles réguliers, ces duos vocaux permettant à chaque oiseau de se familiariser avec le chant de son conjoint. Cela est très important puisque le mode de reconnaissance individuelle est auditif chez le Manchot empereur. Au cours des duos vocaux, la femelle laisse l'œuf au mâle, qui assure la totalité de l'incubation. Puis, quelques heures après la ponte, elle retourne vers la mer libre pour reconstituer ses réserves énergétiques, ayant alors jeûné quarante à cinquante jours dans la colonie et perdu 25 % de sa masse corporelle.

Le Manchot empereur n'a pas de nid. Le Manchot empereur et le Manchot royal sont les seuls Manchots à incuber leur œuf, unique, sur les pattes. Ils peuvent se déplacer avec cet œuf, incubé entre la surface supérieure des tarses et une portion de peau abdominale richement vascularisée et dépourvue de plumes. Celles-ci recouvrent l'ensemble qui forme par conséquent une sorte de « niche incubatrice ».

L'œuf est incubé à une température de l'ordre de 34°C et l'incubation dure en moyenne soixante-cinq jours. Elle coïncide avec le milieu de l'hiver, donc avec la période où les conditions climatiques sont les plus défavorables. Les blizzards sont très fréquents et le rayonnement solaire pratiquement nul ; aux latitudes où sont les colonies de Manchots empereurs, entre 66°S et 77°S, la durée du jour est réduite à deux ou trois heures vers la mi-juin.

Durant cette longue période d'incubation dans de sévères conditions, les Manchots empereurs sont serrés les uns contre les autres en formations denses d'environ dix oiseaux au mètre carré, formations appelées tortues par analogie avec celles des soldats romains se regroupant avec leurs boucliers. Ces tortues peuvent se former non seulement parce qu'il n'y a pas de nid chez le Manchot empereur mais aussi parce qu'il n'y a pas de territoire. Au début de la période d'incubation,

dans la colonie de Terre Adélie qui comprend environ trois mille cinq cents couples, plusieurs tortues de cinq cents à mille oiseaux sont le plus souvent observées. Par la suite, avec l'aggravation des conditions climatiques, l'ensemble des mâles forme en général une seule et immense tortue.

Les tortues ne restent pas immobiles, elles ont un mouvement très lent, mais continu, dans le sens du vent. Les oiseaux de la périphérie, les plus exposés, poussés par le vent, avancent lentement le long des flancs de la tortue, de manière à se retrouver à l'abri du vent, devant les oiseaux qui, primitivement au centre, sont à leur tour exposés au vent, et ainsi de suite. Durant un blizzard continu de quarante-huit heures, une tortue peut ainsi se déplacer de cent à deux cents mètres. Lorsque les conditions climatiques s'améliorent les oiseaux ne forment plus de tortue et reviennent sur leurs pas.

Au moment de l'élosion les femelles sont de retour à leur colonie. Elles localisent leur conjoint par le chant : le mâle se faufile alors hors de la tortue et se fait reconnaître à son tour. Après une série de duos, le mâle laisse l'œuf (ou le poussin, qui est le plus souvent déjà éclos) à la femelle. Si l'on additionne la durée de l'incubation à celle de la période prépostéiale la précédant, le mâle jeûne alors depuis environ quatre mois (2). En dépit de la longueur extraordinaire de ce jeûne, le mâle est capable de nourrir le poussin pendant une dizaine de jours, cela en régurgitant une sécrétion cesophagienne contenant environ 60 % de protéines et 30 % de lipides par poids sec.

Après avoir confié l'œuf ou le poussin à la femelle, ou bien abandonné le poussin si la femelle n'est pas revenue dans les semaines qui suivent l'élosion, le mâle quitte la colonie pour un nouveau voyage vers la mer libre. Après quatre mois de jeûne, sa masse corporelle moyenne est passée de trente-huit à vingt-trois kilogrammes, soit une perte de 40 % environ (3). Le jeûne du mâle n'est généralement pas terminé à son départ de la colonie puisque, sauf exception due à une destruction de la banquise par une tempête, il doit à nouveau faire une longue marche avant de retrouver la mer libre.

Pendant que le mâle reconstitue ses réserves énergétiques, la femelle nourrit le poussin par régurgitation du contenu stomacal ramené de la mer. D'abord nourri pratiquement toutes les heures, le poussin reçoit par la suite deux ou trois repas par jour. Le mâle revient environ quatre semaines après son départ et nourrit à son tour le poussin pendant

une à trois semaines. A cette époque, le poussin, qui se tenait jusqu'à là sur les pattes de l'adulte, les quitte progressivement, c'est « l'émancipation thermique ». Le poussin est alors capable de maintenir sa température interne sans avoir besoin de la couveuse que représente la « niche incubatrice » de l'adulte. Cependant, en cas de mauvais temps, les poussins se serrent les uns contre les autres et forment donc, eux aussi, des tortues. C'est le chant du poussin qui lui permet d'être localisé et reconnu par ses parents.

L'émancipation thermique du poussin signifie que les deux parents peuvent effectuer leurs voyages alimentaires sans devoir s'attendre, ce qui contribue donc à augmenter la fréquence de nourrissage du poussin. Après cette émancipation le mâle repart en général avant le retour de la femelle, chacun des conjoints faisant en moyenne encore six visites alimentaires.

La dislocation de la banquise à la fin de l'hiver rapproche la mer libre de la colonie, ce qui facilite évidemment les voyages alimentaires des parents. De plus, la fin de la période d'élevage, celle où les besoins alimentaires du poussin sont les plus grands, coïncide avec le début de l'été, donc avec une forte augmentation de la productivité marine.

Après avoir moé, les poussins sont prêts à partir en mer vers la mi-décembre (ce qui correspond en général à la débâcle de la banquise), bien que leur masse corporelle n'atteigne guère en moyenne que dix à douze kilogrammes (2). Ainsi, une des caractéristiques essentielles de la stratégie de reproduction du Manchot empereur, dont le cycle reproducteur est obligatoirement lié à la formation hivernale de la banquise, est une période d'élevage raccourcie, au terme de laquelle le poussin n'est encore qu'un adulte miniature (4) (5). A la fin de la période de reproduction, les adultes reconstituent d'importantes réserves lipidiques et protidiques, puis muent en des points divers des côtes du continent antarctique.

#### *Un problème énergétique*

**S**ur le plan énergétique, l'étonnant cycle reproducteur du Manchot empereur a évidemment amené à se demander comment cet oiseau peut résister à un jeûne de quatre mois dans des conditions climatiques aussi défavorables et terminer ce jeûne par une longue marche sur deux cents à trois cents kilomètres pour rejoindre la mer libre.



Après la ponte, échange de l'œuf entre la femelle et le mâle. On voit en arrière-plan les mâles qui incubent les œufs ( cliché Y. Le Maho).

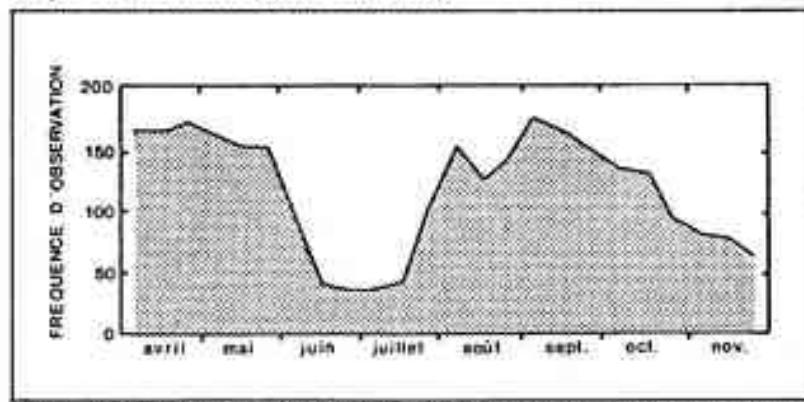


Fig. 1 - Evolution au cours du cycle reproducteur du Manchot empereur de la fréquence d'observation d'activités comportementales (pour 15 minutes d'observation quotidienne). Le minimum de comportements observé en juin-juillet coïncide avec le jeûne hivernal des mâles (d'après Joeventin, 1978).

Pour résister à un jeûne prolongé l'idéal est bien sûr de disposer au départ du maximum possible de réserves énergétiques. Il est important que le stockage de l'énergie se fasse sous la forme du carburant ayant la plus forte densité énergétique. Enfin, il faut limiter au maximum la dépense. Qu'en est-il pour le Manchot empereur ?

#### *Des réserves importantes et un carburant préférentiel*

C'est au début du cycle reproducteur et chez les mâles que l'on observe les masses corporelles les plus élevées. A leur arrivée à la colonie les femelles pèsent en moyenne vingt-neuf kilogrammes et les mâles trente-huit kilogrammes, la démarche difficile des individus pesant près de quarante kilogrammes suggère que cette masse corporelle ne peut guère être dépassée. On sait qu'un

Manchot empereur de trente-huit kilogrammes possède onze kilogrammes de tissu adipeux et dix-sept kilogrammes de muscles (3). Le tissu adipeux étant très pauvre en eau, en particulier chez les oiseaux, sa densité énergétique est très proche de celle des lipides, soit de  $3,8 \cdot 10^7$  J/kg. Au contraire, la teneur en eau des muscles est considérable (69 % chez le Manchot empereur, et seulement 29 % de protéines). De plus, la densité énergétique des protéines n'atteint pas la moitié de celle des lipides, soit  $1,6 \cdot 10^7$  J/kg. Par conséquent, bien que la masse adipeuse du Manchot empereur à son arrivée à la colonie soit inférieure à sa masse musculaire, on peut calculer que ses réserves théoriquement disponibles sont constituées pour 83 % par des lipides et seulement 17 % par des protéines (3). Alors que la quasi-totalité des réserves lipidiques théoriquement disponibles est mobilisable, au contraire les « réserves » protéiques ne le sont que partiellement. En effet, la

fonction des protéines n'est pas seulement celle de réserve énergétique puisqu'elles ont également une fonction de structure, une fonction mécanique (cf. les muscles) ou enfin enzymatique. En définitive, les réserves énergétiques dont peut effectivement disposer le Manchot empereur, sont stockées essentiellement sous la forme de lipides, donc du « carburant » ayant la meilleure densité énergétique.

#### *Utiliser le meilleur carburant*

Bien sûr, pour qu'un animal puisse résister à un jeûne prolongé, il ne suffit pas qu'il ait au préalable stocké d'importantes réserves sous la forme du carburant de plus forte densité énergétique. Il faut aussi que soit utilisé préférentiellement ce carburant qui est justement le plus énergétique, les lipides et il est capital que soient épargnées au maximum ces protéines aux fonctions vitales si importantes. En fait, les lipides contribuent pour une part considérable à la dépense énergétique du Manchot empereur : pour 93 % et par conséquent les protéines pour seulement 7 % (3). Chez l'homme soumis à un jeûne prolongé, la part des lipides dans la dépense énergétique est de l'ordre de 85 %. Pour l'instant, il semblerait que seules quelques espèces animales puissent avoir une épargne protéique totale au cours d'un jeûne prolongé : des oiseaux migrateurs de petite taille et l'ours en sommeil hivernal. Chez les animaux entrant en hibernation profonde, comme la marmotte, l'épargne protéique n'est pas totale.

#### *Réduire la dépense*

Chez l'animal, la dépense énergétique totale est évidemment la somme du métabolisme lié à l'activité et du métabolisme de repos. Une épargne des réserves énergétiques de l'organisme implique donc une réduction de ces deux formes de dépense.

#### *La dépense liée à l'activité*

Le métabolisme lié à l'activité dépend bien sûr du niveau d'activité, mais également de l'évolution du coût énergétique d'une activité déterminée.

Aussi, non seulement les attitudes comportementales du Manchot empereur sont peu coûteuses sur le plan énergétique (4) (son répertoire comportemental est à la fois limité et marqué par une économie de mouvements),

mais également ces attitudes sont mises en œuvre avec parcimonie à l'époque du long jeûne hivernal des mâles (fig. 1). De plus, les couples parcourront en moyenne seulement quatre-vingt-dix mètres par jour dans la colonie au début du jeûne. Cette distance quotidienne parcourue chute même à trente mètres pour les mâles lorsqu'ils se retrouvent seuls à jeûner (Geleen et Jouventin, communication personnelle).

Par ailleurs, pour une même vitesse de marche le métabolisme du Manchot empereur diminue au cours du jeûne. Cependant, deux animaux marchant à la même vitesse peuvent avoir un métabolisme très différent (fig. 2A). En fait, il s'avère que l'évolution du métabolisme n'est pas liée à la durée du jeûne mais est fonction de la masse corporelle de l'animal : cela signifie par exemple que deux Manchots empereurs jeûnant l'un depuis quarante jours et l'autre depuis soixante jours, mais ayant la même masse corporelle, auront un métabolisme similaire s'ils marchent à la même vitesse. Le coût énergétique net de la marche est bien sûr, pour une vitesse de marche déterminée, la différence entre d'une part la dépense énergétique mesurée au cours de cette marche et d'autre part la dépense au repos. Si l'on exprime ce coût net par unité de masse corporelle, on voit (fig. 2B) que ce coût ne change pratiquement pas entre trente-huit kilogrammes et vingt-trois kilogrammes ; cette variation de masse corporelle est celle observée pour les mâles au cours de leur long jeûne hivernal. Cela revient à dire que pour marcher à une même vitesse l'animal dépense d'autant moins d'énergie que sa masse corporelle a diminué.

Il semble que la diminution du coût de la locomotion pour une masse corporelle inférieure à vingt-trois kilogrammes (fig. 2B) résulte d'une modification de la mécanique de la marche de l'animal : son dandinement apparaît alors moins important (6). Or cette masse de vingt-trois kilogrammes correspond justement à celle des mâles quittant leur colonie pour rejoindre la mer libre. Il est donc remarquable qu'ils partent pour ce long voyage au moment où le coût énergétique de leur locomotion commence à diminuer.

#### Le métabolisme de repos

Une réduction du métabolisme de repos du Manchot empereur (c'est-à-dire du métabolisme que l'on peut déterminer lorsqu'il est immobile) peut-elle expliquer en partie sa résistance exceptionnelle au jeûne ?

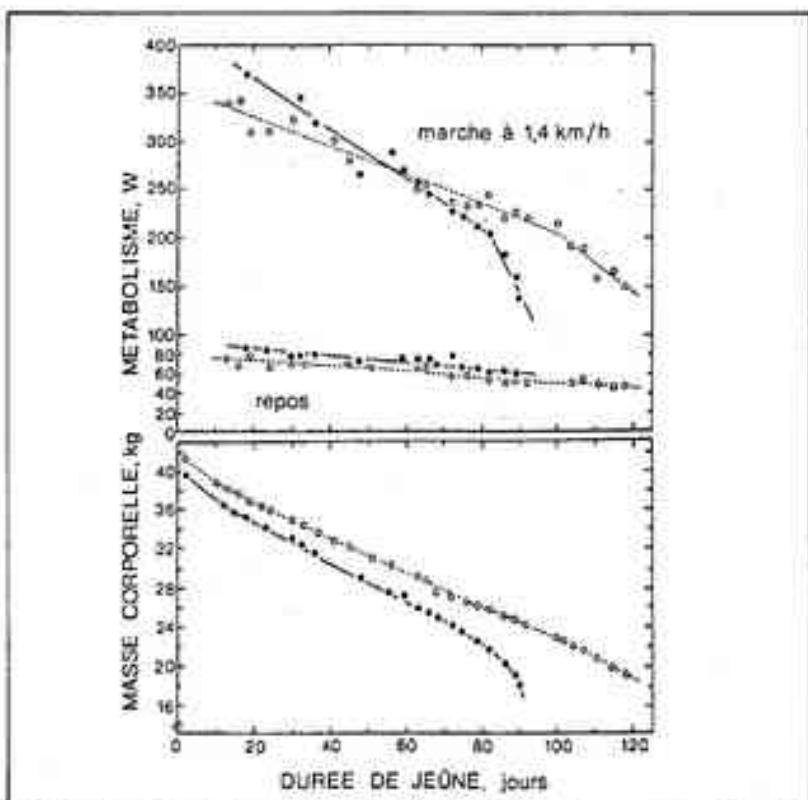


Fig. 2A - Evolution de la masse corporelle du métabolisme de repos et du métabolisme lors de la marche à 1,4 km/h au cours du jeûne chez deux Manchots empereurs. Cette étude a été réalisée à une température ambiante de -10°C, en mesurant les échanges respiratoires des oiseaux à neutralité thermique, soit immobiles, soit marchant sur un tapis roulant. On peut voir que le métabolisme lors de la marche n'est pas lié à la durée du jeûne mais par contre qu'il est similaire pour une même masse corporelle.

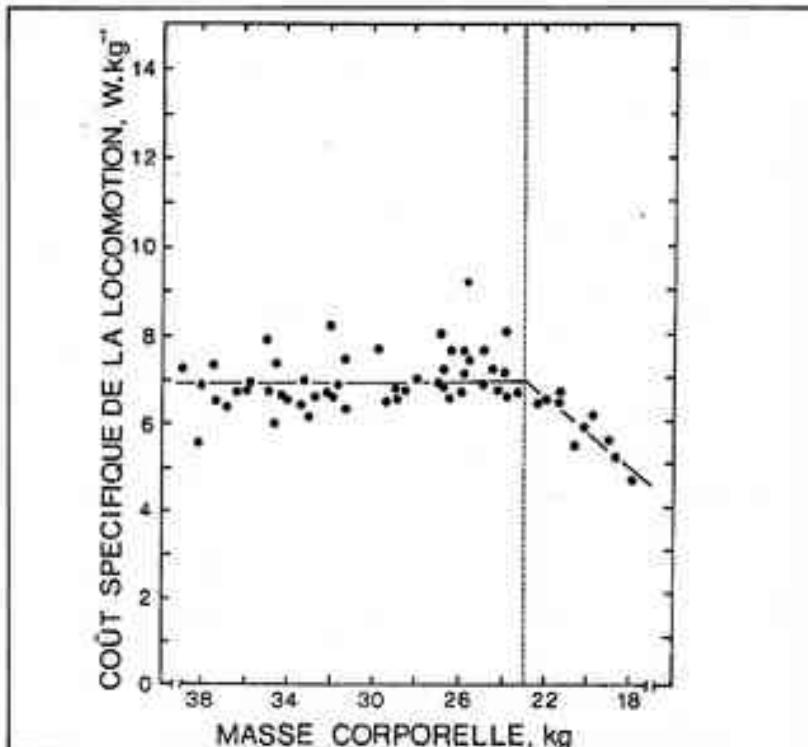
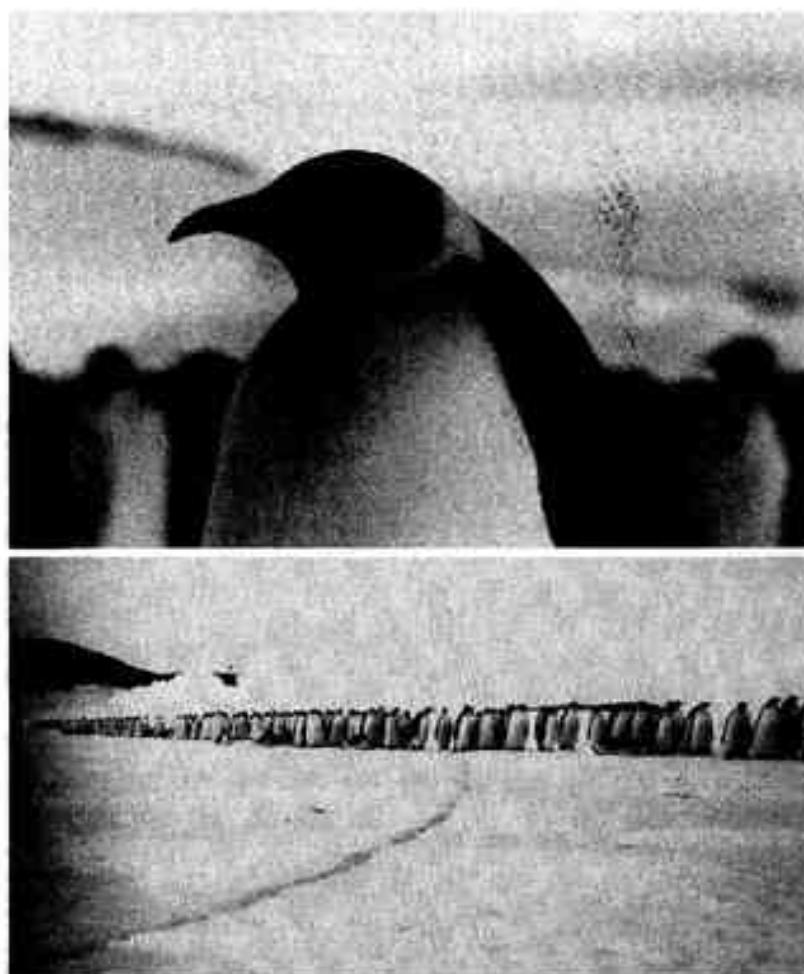


Fig. 2B - Evolution du coût énergétique spécifique (c'est-à-dire par unité de masse corporelle) de la locomotion, au cours du jeûne chez quatre Manchots empereurs et en fonction de leur masse corporelle. La masse corporelle en-dessous de laquelle le coût spécifique de la locomotion diminue, correspond à celle des animaux quittant leur colonie pour retourner vers la mer libre (d'après Dewasmes et coll., 1980).



Colonne de Manchots empereurs se dirigeant vers leur colonie (cliché Y. Le Maho).

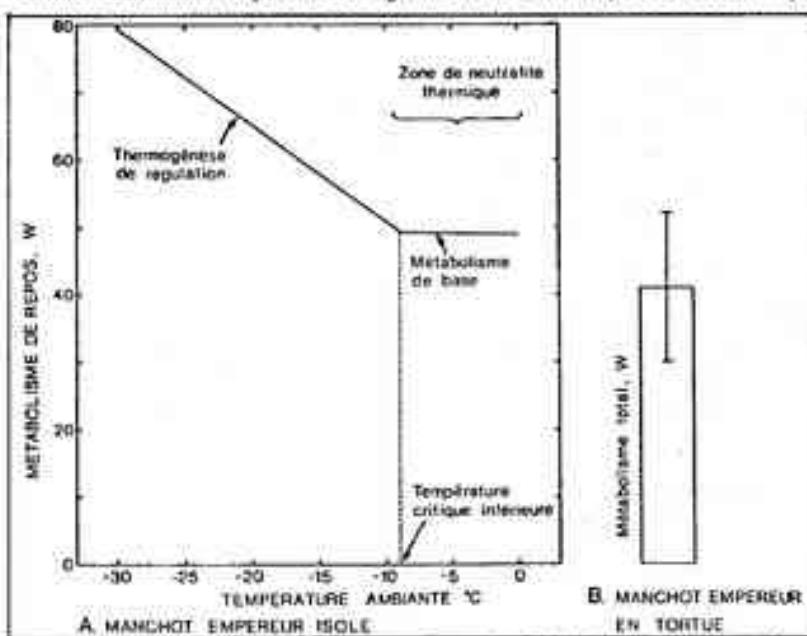


Fig. 3 - A : Evolution du métabolisme de repos en fonction de la température ambiante chez le Manchot empereur isolé, pour une vitesse de vent inférieure à 20 km/h (d'après Le Maho et coll., 1976).

B : Métabolisme du Manchot empereur en tortue (d'après les données de Prévost, 1961 et Groscolas, 1982). Bien que la température ambiante soit alors comprise entre -10 et -30°C, son métabolisme total (la somme du métabolisme de repos et du métabolisme d'activité) est voisin du métabolisme de base de l'animal isolé, c'est-à-dire du métabolisme de repos de l'animal isolé à neutralité thermique.

Le métabolisme de repos d'un homéotherme<sup>(1)</sup> est la somme de son métabolisme de base et de sa thermogénése de régulation (fig. 3A). Pour une certaine gamme de températures ambiantes appelée « zone de neutralité thermique », le métabolisme de repos est minimal, il est égal au métabolisme de base. En-dessous d'une certaine température ambiante (appelée température critique inférieure), la température interne ne peut être maintenue constante que par une augmentation du métabolisme de repos. Cette partie de la dépense énergétique qui est supérieure au métabolisme de base est ce que l'on appelle la « thermogénése de régulation ».

Pour un homéotherme, une façon très efficace de réduire le métabolisme de repos est évidemment que la valeur à laquelle la température interne est régulée diminue considérablement. C'est ce que font certaines espèces en entrant en hibernation profonde ; ainsi le métabolisme de repos d'une marmotte est réduit d'environ vingt fois lorsqu'elle hiberne en maintenant sa température interne à 10°C.

En plus du fait qu'on ne connaît aucun animal de la taille du Manchot empereur qui hiberne avec une aussi basse température interne, cette stratégie est évidemment exclue chez le Manchot empereur mûre puisqu'au cours de son long jeûne hivernal il incube un œuf à environ 34°C. Tout au plus pouvait-on envisager chez le Manchot empereur la possibilité d'une réduction du métabolisme de repos par le biais d'un abaissement modéré de la température interne, comme chez l'ours brun en hibernation dont la température interne est de l'ordre de 35°C.

Si l'on considère un Manchot empereur isolé dans sa colonie, sa température rectale est en fait de 38°C. En revanche, celle du Manchot empereur en tortue peut descendre jusqu'à 35-36°C (2). En accord avec cette différence de température interne la vitesse d'amincissement d'un Manchot empereur est réduite de 25 à 50 % lorsqu'il entre en tortue (2). La masse corporelle atteinte par les Manchots empereurs après quatre mois de jeûne à la colonie (donc avec la possibilité d'entrer en tortue) est obtenue en seulement deux mois par les Manchots empereurs isolés. Cette différence n'est pas seulement la conséquence du stress de l'isolement ; en effet, des Manchots empereurs isolés

(1) Les oiseaux et les mammifères sont des homéothermes, c'est-à-dire des animaux dont la température interne est maintenue à une valeur élevée et à peu près constante pour une large gamme de températures ambiantes.

peuvent supporter un jeûne de quatre mois s'ils se trouvent dans des conditions climatiques favorables (6) (Robin, données non publiées).

Puisque la dépense énergétique liée à l'activité du Manchot empereur dans sa colonie est négligeable, cela signifie que l'abri mutuel que forment les Manchots empereurs en se mettant en tortue leur permet de réduire leur métabolisme de repos.

Pour déterminer de quelle façon le métabolisme de repos de l'animal est réduit lorsqu'il se trouve en tortue, il fallait évidemment comparer son niveau de dépense énergétique au métabolisme de base et à la thermogenèse de régulation de l'animal isolé. Cette comparaison était facilitée par le fait que les oiseaux isolés (mis en parc) ont, comme ceux en tortue, une activité presque nulle.

Pour l'animal isolé, la mesure des échanges respiratoires a permis de constater que son métabolisme de repos est minimal jusqu'à une température ambiante très basse : -10°C (fig. 3A). Jusqu'à cette température (qui est donc la température critique inférieure de l'animal), le niveau de métabolisme de repos correspond par conséquent au métabolisme de base. Celui-ci est d'environ 50 W pour une masse corporelle de 25 kg (7) (8) ; cette valeur est conforme à ce que l'on pouvait attendre pour un oiseau de cette masse corporelle et est similaire à celle observée pour les mammifères de masse corporelle équivalente.

Les valeurs de métabolisme de repos indiquées (fig. 2A) ayant été obtenues à une température ambiante de -10°C, elles correspondent par conséquent au métabolisme de base de l'animal. On peut voir que ce métabolisme de base diminue au cours du jeûne. En moyenne, il diminue de telle manière qu'il tend à rester pratiquement constant par unité de masse corporelle, à environ 2 W/kg. Il est important de noter qu'une réduction du métabolisme de base est également un mécanisme essentiel dans l'adaptation de l'homme au jeûne prolongé.

L'augmentation du métabolisme de repos résultant de la mise en œuvre d'une thermogenèse de régulation est faible chez le Manchot empereur ; dans les conditions ambiantes naturelles, par vent faible, le métabolisme n'est même pas doublé à -30°C (fig. 3A). En chambre froide, il est seulement doublé à -50°C (9). Bien sûr, les Manchots empereurs ne sont pas soumis au seul facteur climatique de la température ambiante, le vent et les tempêtes de neige ou les blizzards sont des éléments



Fig. 4 - Plume dorsale du Manchot empereur. A la base de chaque plume se trouvent deux duvets. Une structure à double isolement (thermique et mécanique) est ainsi constituée : les duvets formant l'isolement thermique, les plumes rigides, qui se recouvrent comme les tuiles d'un toit, assurant une protection mécanique contre le vent.

déterminants du pouvoir de refroidissement ambiant. Les Manchots empereurs isolés maintiennent leur température interne à environ 38°C même dans les plus mauvaises conditions climatiques, par exemple dans un blizzard à -30°C. La thermogenèse de régulation représente alors seulement deux fois le métabolisme de base (c'est-à-dire que le métabolisme de base est seulement triplé). Jusqu'à une vitesse de 20 km/h, le vent n'a aucun effet significatif sur le métabolisme de repos de l'animal (8). Donc les performances thermiques du Manchot empereur sont remarquables : sa température critique inférieure est très basse, l'importance de sa thermogenèse de régulation aux basses températures est réduite et un vent modéré

n'augmente pas significativement la déperdition thermique de l'animal. Ces performances thermiques ont été expliquées par la faible surface corporelle du Manchot empereur par rapport à sa taille et par un excellent isolement thermique. Le plumage représente 85 % de l'isolement total et cet isolement est double (fig. 4). En outre, la structure vasculaire des ailerons et des pattes du Manchot empereur indique l'existence d'excellents échangeurs de chaleur à contre-courant ; il en résulte par conséquent une réduction de la déperdition thermique dans ces territoires moins bien isolés thermiquement que le reste du corps de l'animal (10).

Quoi qu'il en soit, même si le Manchot empereur peut maintenir un méta-

bolisme basal jusqu'à -10°C, il faut bien voir que la température ambiante est au moment du jeûne hivernal nettement inférieure à -10°C ; même si le vent n'a pas d'effet jusqu'à 20 km/h, sa vitesse est souvent supérieure à cette valeur en hiver. Donc, s'il est vrai que la performance thermique du Manchot empereur isolé est remarquable, elle n'est pas suffisante pour que l'oiseau évite une mise en jeu de sa thermogénése de régulation.

Pour ce qui concerne les Manchots empereurs en tortue, on peut calculer que leur dépense énergétique est comprise entre 30 et 52 W pour une masse corporelle de 25 à 30 kg (2), (3), (fig. 3B). Ainsi, en se groupant en tortue, les Manchots empereurs peuvent non seulement éviter totalement la mise en jeu d'une thermogénése de régulation, mais aussi avoir éventuellement un métabolisme de base inférieur à celui des animaux isolés (on a vu que chez ces derniers il est d'environ 50 W pour une masse corporelle de 25 kg). Le regroupement des Manchots empereurs en tortue, rendu possible par l'absence de nid et de défense territoriale, permet une réduction de leur surface corporelle exposée au froid, et au vent et crée un microclimat plus favorable, c'est donc un comportement thermorégulateur social. Ce comportement apparaît par conséquent comme un facteur décisif dans la résistance du Manchot empereur à un jeûne prolongé dans des conditions climatiques défavorables. Il est vraisemblable que le faible niveau du métabolisme du Manchot empereur en tortue est lié essentiellement à sa fa-

ble température rectale de 35-36°C. Cette température est du même ordre de grandeur que celle de l'ours en sommeil hibernal et on peut donc se demander s'il n'y a pas une analogie entre le processus permettant la réduction de la température interne de l'ours en hibernation et l'état physiologique du Manchot empereur en tortue.

Ainsi, la stratégie permettant au Manchot empereur de résister à son jeûne prolongé au cours de l'hiver antarctique est basée à la fois sur l'accumulation d'importantes réserves énergétiques, sur l'utilisation préférentielle de ce carburant et sur une réduction de la dépense. Cette stratégie n'aurait pu être comprise sans une étude pluridisciplinaire, c'est-à-dire englobant aussi bien l'écologie et l'éthologie du Manchot empereur que son anatomic et sa physiologie.

L'intérêt de l'étude d'animaux placés dans des conditions particulièrement sévères n'est pas seulement lié à la compréhension de la façon dont ils peuvent survivre, il est aussi lié au fait que le caractère extrême de leurs adaptations physiologiques en font des modèles exceptionnels pour l'étude de mécanismes fondamentaux. Ainsi, la réduction du métabolisme de base et l'épargne protéique sont deux mécanismes essentiels que l'on retrouve au cours du jeûne aussi bien chez l'homme que chez l'animal. Ce qui diffère c'est soit la stratégie adoptée (alors que l'ours se blottit dans sa tanière, les Manchots empereurs forment un abri mutuel en se mettant en « tortue »), soit l'importance avec laquelle le méca-

nisme est mis en jeu (très bonne épargne protéique chez le Manchot empereur, épargne protéique totale semble-t-il chez l'ours). Mais on ne connaît pas encore les processus physiologiques par lesquels le métabolisme de base et le catabolisme protéique peuvent diminuer. Nos travaux actuels portent précisément sur l'étude de ces processus ; en plus des Manchots antarctiques nous nous intéressons à l'oiseau domestique qui, en raison de sa capacité de stockage d'importantes réserves lipidiques, apparaît également comme un intéressant modèle animal dans ce contexte (11).

Du point de vue de la physiologie humaine, la compréhension de ces deux processus que sont la réduction du métabolisme de base et l'épargne protéique, est très importante pour pouvoir intervenir dans les situations cliniques où il faudrait que ces mécanismes soient mis en œuvre. Dans de nombreuses situations pathologiques, le métabolisme de base est incroyablement élevé et la fonte musculaire considérable. Le régime alimentaire suivi par un homme obèse devrait idéalement provoquer une réduction de sa masse lipidique et non pas également de sa masse protéique. Il est en fait possible que l'on comprenne un jour les processus de ces mécanismes fondamentaux par l'étude écophysiologique d'espèces animales qui sont de remarquables modèles d'épargne, soit parce qu'elles vivent dans des conditions extrêmes, soit parce qu'elles ont une particularité métabolique.

#### BIBLIOGRAPHIE PERSONNELLE DE L'AUTEUR

- (1) Kooyman G.L., Drybek C.M., Elmer R. et Campbell W.B., *Diiving behavior of the emperor penguin, Aptenodytes forsteri*. The Auk 88 : 775-795, 1971.
- (2) Prevost J., *Ecologie du Manchot empereur, Aptenodytes forsteri*. Thèse, Paris, Hermann, 1961.
- (3) Gerressas R., *Modifications métaboliques et hormonales en relation avec le jeûne prolongé, la reproduction et la mue chez le Manchot empereur Aptenodytes forsteri*. Thèse d'Etat, Univ. Dijon, 1981.
- (4) Jouventin P., *Éthologie comparée des Sphénocéales*. Thèse d'Etat, Univ. Montpellier, 1978.
- (5) Jouventin P., Le Maho Y. et Mougin J.L., *Les Manchots*. Pour la science 30 : 79-91, 1980.
- (6) Dewaunes G., Le Maho Y., Comte A. et Grégoire R., *Resting metabolic rate and cost of locomotion in long-term fasting emperor penguins*. J. Appl. Physiol. : Respirat. Environ. Exercise Physiol. 49 : 838-846, 1980.
- (7) Le Maho Y., *The emperor penguin : a strategy to live and breed in the cold*. Am. Scient. 65 : 680-693, 1977.
- (8) Le Maho Y., Delclos P. et Chatonnet J., *Thermoregulation et fastiging emperor penguins under natural conditions*. Am. J. Physiol. 231 : 913-922, 1976.
- (9) Pinshow B., Fedak M.A., Battles D.R. et Schmidt-Nielsen K., *Energy expenditure for thermoregulation and locomotion in emperor penguins*. Am. J. Physiol. 231 : 903-912, 1976.
- (10) Travers G., *Notice préliminaire sur la vascularisation des membres des Sphénocéales*. L'Oiseau et RFO 40 : 142-156, 1970.
- (11) Le Maho Y., *Adaptations métaboliques au jeûne prolongé : les Manchots antarctiques et l'oiseau*. Thèse d'Etat, Univ. Lyon, 1981.

#### BIBLIOGRAPHIE COMPLÉMENTAIRE PROPOSÉE PAR LE CDST

Le Centre de documentation scientifique et technique du CNRS propose à titre expérimental de fournir aux lecteurs intéressés, un complément d'information sur ce sujet, sous la forme d'une bibliographie standard. (voir texte p. 10). La bibliographie concernant cet article est disponible au CDST au prix de 100 F HT (voir coupon-réponse p. 30).

Les références les plus pertinentes seront retrouvées en recherchant :

##### APTENODYTES ET FORSTERI

Pour une recherche plus exhaustive on peut compléter la stratégie par :

(PENGUIN / OU MANCHOT / OU APTENODYTES) ET (EMPEREUR OU FORSTER)

Des références marginales seront obtenues en recherchant en plus :

(AVES OU OISEAU) ET ANTARCTIQUE ET (THERMOREGULATION OU METABOLISME ENERGETIQUE OU JEUNE)

au total il y a une cinquantaine de références bibliographiques.

(Le signe / indique la présence d'une troncature, en recherchant tous les mots commençant par la racine indiquée :

Exemple : POLARIS—POLARISATION, POLARISÉ, POLARISÉE, etc.).

## Les protéines contractiles cytoplasmiques

La motilité cellulaire dépend probablement non seulement de la transformation de l'énergie chimique en énergie mécanique, mais également de celle qui accompagne les changements structuraux d'organisation des filaments d'actine dans le cytoplasme. Des protéines spécifiques associées à l'actine et régulées par le calcium seraient responsables de ces processus.

Louise-Anne PRADEL

**L**e mouvement est une des propriétés fondamentales des cellules vivantes ; il s'exprime dans la cellule sous forme d'activités très diverses telles que la locomotion, la phagocytose, le rassemblement et le transport des protéines membranaires, lors de l'exo- et de l'endocytose (1), de la mitose et de la division cellulaire.

On sait depuis longtemps que dans la contraction musculaire, l'actine et la myosine sont les protéines responsables du mouvement. Dès 1952, l'existence de protéines ayant les mêmes propriétés que l'actine et la myosine musculaires avait été démontrée dans des cellules eukaryotes aussi éloignées que les amibes unicellulaires et des cellules de vertébrés (fibroblastes et plaquettes par exemple). En 1966, l'isolement et la caractérisation de l'actine et de la myosine dans de très nombreux types cellulaires confirme l'intérêt fondamental de ces deux protéines dans le mécanisme général de la production du mouvement dont la contraction musculaire n'apparaît alors que comme un exemple spécialisé.

Dans le muscle, l'actine et la myosine existent sous forme de filaments ordonnés, interdigités dans l'unité musculaire qu'est le sarcomère (fig. 1). Au cours de la contraction, il y a glissement des filaments épais de myosine sur les filaments d'actine.

Dans les cellules non musculaires, on ne rencontre pas ce type de structure ordonnée ; il est néanmoins probable que l'actine et la myosine au cours de leur interaction convertissent l'énergie chimique provenant de l'hydrolyse de l'adénosine triphosphate (ATP) en énergie mécanique, en mouvement.

□ Louise-Anne Pradel est maître de recherche au CNRS, à l'Institut de biologie physico-chimique, 13, rue Pierre et Marie Curie - 75005 Paris.

L'actine dans le muscle présente une structure permanente sous forme de filaments fins de dimensions déterminées ; dans les cellules non musculaires, en revanche, l'actine peut adopter des états d'organisation variés ; ainsi elle peut exister sous forme de monomères (actine G non polymérisable), sous forme de filaments sans organisation définie ou bien sous forme de structures organisées dans un espace tridimensionnel : réseaux, faisceaux (fig. 2 et 3).

Ces différents états adoptés par les microfilaments sont le plus souvent transitoires ou cycliques. Ils dépendent de l'état physiologique de la cellule. Ainsi, quand un fibroblaste passe d'un état d'adhérence au support à un état

de division, ou bien lorsqu'il subit une transformation virale, les structures ordonnées en faisceaux se désagrègent. Ces transitions, qui ont été observées en microscopie, suggèrent que dans les cellules non musculaires, l'actine pourrait aussi bien jouer un rôle dans la structure et les fonctions du cytosquelette qu'un rôle contractile. Les structures ordonnées en faisceaux seraient des structures de maintien, les structures moins organisées des structures mobiles.

Parallèlement à ces transitions structurales, le cytoplasme subit des transformations qui le font passer d'un état

(1) Endocytose et endocytose : exocytose et ingestion au niveau membranaire d'éléments épars.

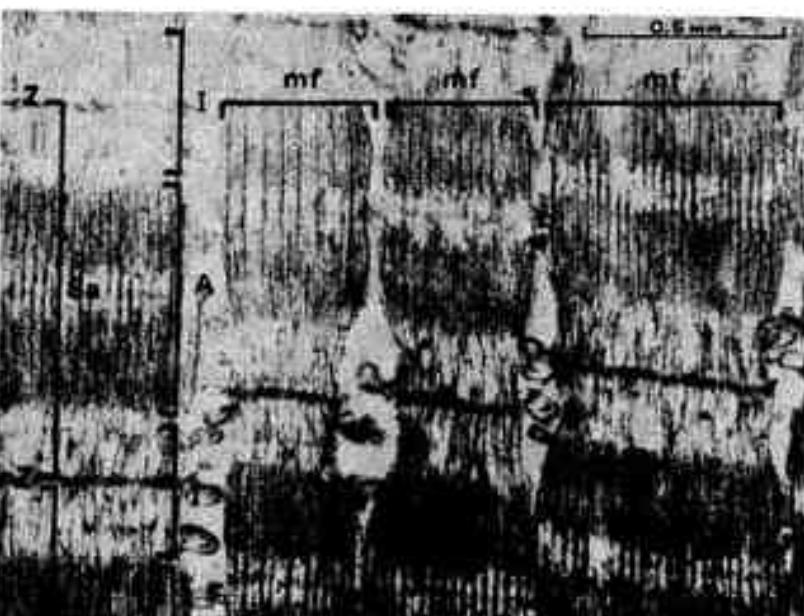


Fig. 1 - Disposition des myofibrilles dans une fibre musculaire striée. Les myofibrilles (mf) sont constituées d'une succession d'unités identiques : les sarcomères (Sa). Structure du sarcomère : la bande I n'est constituée que de filaments fins d'actine ; la bande A est constituée de filaments épais de myosine dans lesquels s'engagent des filaments fins.

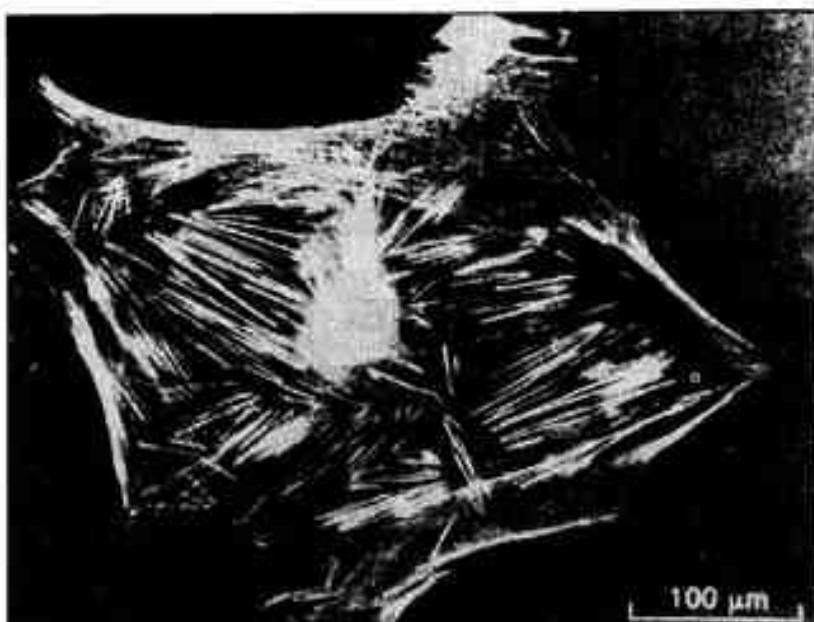


Fig. 2 - Les faisceaux d'actine (stress-fibers) mis en évidence par immunofluorescence sur un fibroblast humain.

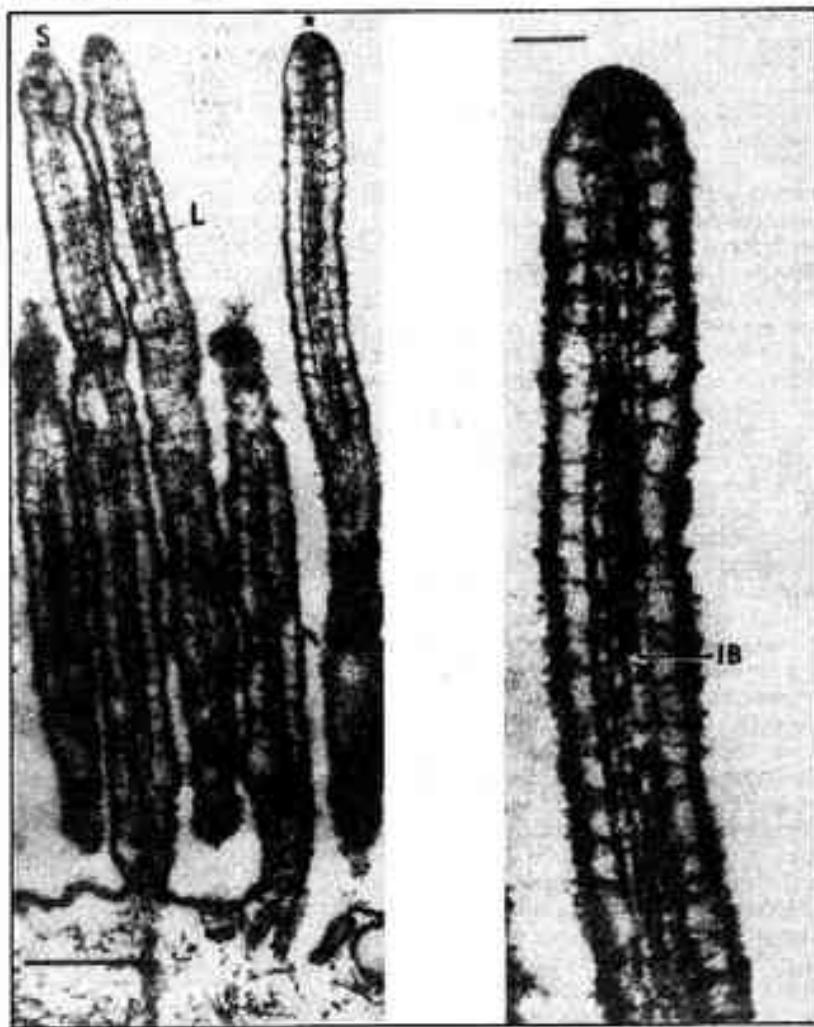


Fig. 3 - Les microvillosités de la bordure en brosse des cellules épithéliales de l'intestin. Les microfilaments d'actine sont organisés en faisceaux orientés selon le grand axe de la microvillosité. On voit nettement les ponts unissant les microfilaments entre eux, et ceux qui les unissent à la membrane.

gel à un état sol (2).

Ces dernières années, les recherches les plus intéressantes ont porté sur la caractérisation et l'isolement des protéines responsables de l'organisation supramoléculaire des filaments d'actine et sur celles des protéines responsables de la régulation de ces édifices. Ces études ont permis en particulier de définir les bases physiologiques et biochimiques de la transition gel-sol.

#### Actine cytoplasmique

Dépuis 1974, l'actine a été purifiée à partir des différents éléments figurés du sang (érythrocytes, macrophages, leucocytes, plaquettes), du cerveau, mais aussi de nombreux tissus de vertébrés et d'invertébrés, de cellules en cultures ; elle a également été purifiée à partir des œufs d'oursins, de spermatozoïdes, de l'algue verte *Nitella*, du myxomycète (3) *Physarum polycephalum*, de l'amibe *Acanthamoeba* et de l'amibe sociale *Dicyostelium*.

L'actine cytoplasmique représente de 5 à 20 % des protéines totales des cellules. Toutes les actines qui ont été purifiées présentent des propriétés physiques et chimiques analogues ; elles possèdent la même mobilité électrophorétique sur gel SDS-polyacrylamide, donc le même poids moléculaire (42 000 d) que l'actine de muscle, en revanche elles présentent deux formes isomorphes ( $\gamma$ ,  $\alpha$ ) différentes de celle de l'actine musculaire. Elles polymérisent dans des conditions physiologiques (0,1 M KCl, 2 mM  $MgCl_2$ ) pour former des filaments  $\alpha$  hélicoïdaux de sept nanomètres de diamètre dits microfilaments, identiques à ceux formés par l'actine musculaire (fig. 4, 5). Toutes ces actines stimulent l'activité adénosine triphosphatique dépendante du  $Mg^{++}$  ( $Mg^{++}$ -ATPasique) de la myosine de muscle.

On peut donc dire que, en dépit des différences qui portent sur les différentes formes d'actine, il est évident que la structure de base de la molécule d'actine a été fortement conservée même parmi des espèces largement divergentes. Ceci reflète probablement les contraintes imposées par la taille relativement petite de la molécule et par les multiples interactions que nécessite sa fonction, interaction avec quatre autres molécules d'actine pour former le polymère, interaction avec les nucléotides et les cations divalents, interaction avec la myosine et avec des facteurs régulateurs.

(2) Sol - solution colloïdale : liquide contenant une matière dispersée dans sa masse sans que cette dispersion corresponde à la séparation du corps en ses molécules.

(3) Myxomycète : champignon inférieur.

### Myosine cytoplasmique

La myosine a été localisée dans la plupart des cellules eucaryotes ; elle représente 0,3 à 1,5 % des protéines totales de la cellule. Les myosines cytoplasmiques qui ont été isolées des plaquettes, des leucocytes, des macrophages, des fibroblastes, présentent une structure oligomérique (4) constituée de deux chaînes lourdes de poids moléculaire identique (200 000 d) et de deux types de chaînes légères de 20 000 d et 17 000 d ; elles présentent une forme asymétrique, la capacité de former des filaments bipolaires plus courts que les filaments épais de myosine de muscle (fig. 6, 7).

Enfin, elles possèdent une activité ATPasique élevée dans des conditions non physiologiques (0,5 M KCl, EDTA ou  $\text{Ca}^{++}$ ) mais une très faible activité dans les conditions physiologiques (0,1 M KCl, 1 mM  $\text{MgCl}_2$ ) ; l'activation de l'hydrolyse de l'ATP dans ces conditions requiert, d'une part, la phosphorylation des chaînes légères de 20 000 d contenues dans les têtes globulaires de myosine, d'autre part, l'interaction de ces dernières avec l'actine. Cette activation est soumise à un système différent de celui observé dans le muscle.

### Régulation du système actomyosine

Pour que se développe un mouvement contrôlé, l'activation de la myosine doit être soumise à un système de régulation *in vivo*.

Dans le muscle strié, la contraction est contrôlée par l'effet de la concentra-

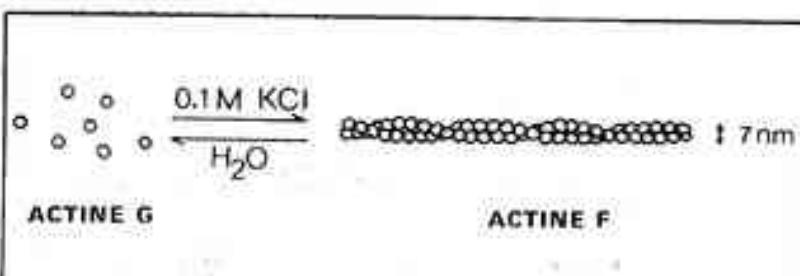


Fig. 4 - Polymérisation de l'actine. L'actine G s'assemble en filaments à des forces ioniques physiologiques. Les filaments peuvent atteindre plusieurs microns.

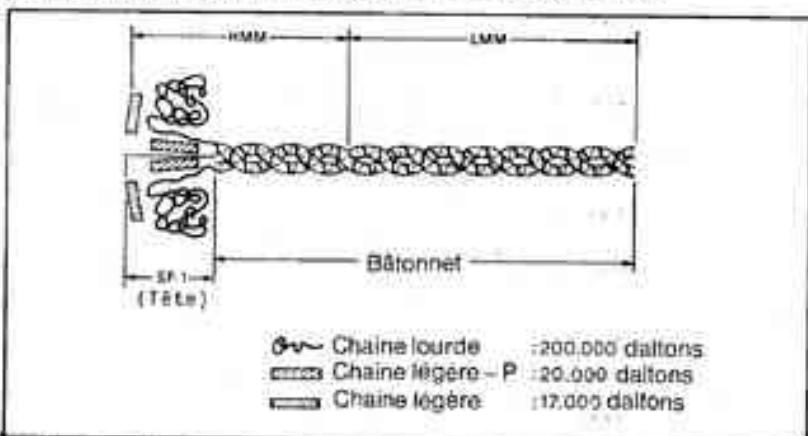


Fig. 6 - La molécule de myosine. Schéma de structure.

tion intracellulaire de calcium sur des protéines régulatrices, troponine et tropomyosine, associées au filament fin d'actine. A faible concentration en calcium ( $< 10^{-6}$  M), ces protéines inhibent une des étapes du cycle d'hydrolyse de l'ATP par le complexe actomyosine. Pour des concentrations plus élevées de calcium, cette inhibition est levée (fig. 8).

Dans les cellules non musculaires, on sait que sous l'effet d'une stimulation externe, le taux de calcium intracellulaire augmente localement et qu'une concentration de l'ordre de la micromole est requise pour la contractilité. De multiples recherches ont été poursuivies dans le but de caractériser des protéines régulatrices du type tropomyosine-troponine liées au filament fin d'actine.

La tropomyosine a été purifiée, isolée du cerveau et des plaquettes ; dimère de 60 000 d, elle possède les mêmes caractères structuraux que la tropomyosine musculaire (70 000 d) ; c'est une longue molécule fibreuse et hélicoïdale qui recouvre six monomères d'actine ; elle apporte un élément de stabilité structurale au filament fin ; étant donné sa concentration dans la cellule, la tropomyosine cytoplasmique ne serait liée qu'à la moitié de l'actine présente.

L'existence d'un système régulateur troponine-tropomyosine n'a pas encore

été démontrée dans les cellules non musculaires ; cependant, certaines données récentes démontrent que la tropomyosine cytoplasmique peut fixer la calmoduline, calciprotéine régulatrice de l'activité  $\text{Mg}^{++}$ -ATPasique du complexe actomyosine des cellules non musculaires.

Dans ces dernières, en effet, un système régulateur modulé par l'ion cal-

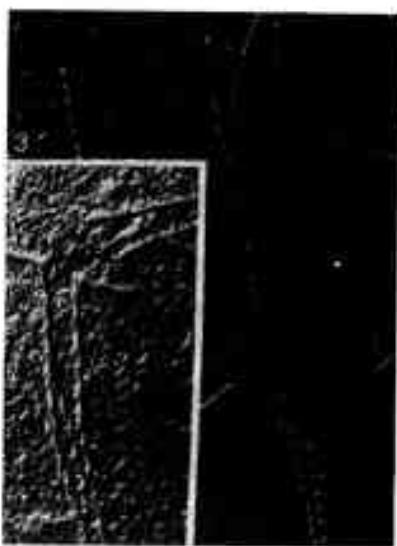


Fig. 5 - Filaments d'actine observés en microscopie électronique. On voit nettement le filament fin d'actine à deux brins torsadés en hélice.

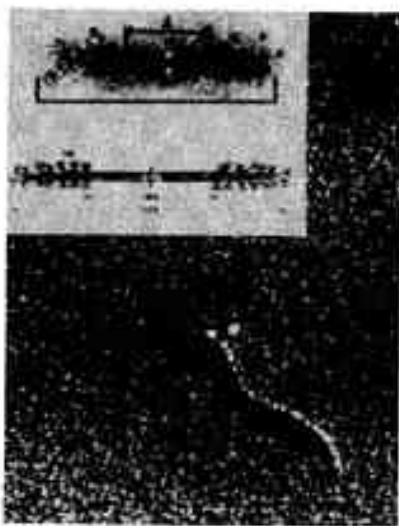


Fig. 7 - Molécule de myosine de *Physarum* observée au microscope électronique après ombrage par le platine. On voit nettement les deux têtes globulaires et la partie en bâtonnet. Dans l'encart : filaments bipolaires de myosine.

TABLEAU I  
PROTEINES DE PONTAGE - FACTEURS DE GELATION

Protéine	Source	Sensibilité au Ca <sup>++</sup>	P.M.	Auteurs
$\alpha$ -Actin-binding protein	macrophage mammifère	-	2 x 270.000	J.H. Hartwig et al (1981)
Filamine	fibroblastes de mammifères muscle lisse	-	2 x 250.000	D. Wallach et al (1978)
Spectrine	érythrocyte humain	-	hétérodimère 1 x 240.000 1 x 260.000 triamère 2 x hétérodimère	S.L. Brenner et al (1979)
$\alpha$ -actinine	muscle de vertébrés	-	2 x 100.000	K. Manuyama et al (1965)
$\alpha$ -actinine	Cellules Hela	+	2 x 100.000	K. Burridge and J.R. Feramisco (1981)
Actinogeline	Cellules d'Erich	+	1 x 115.000	N. Mimura et A. Asano (1979)
Acanthamoeba Protein 90 K	Acanthamoeba	+	2 x 90.000	J.S. Condell et D.L. Taylor (1977)
Gelactone I	Acanthamoeba	-	1 x 23.000	H. Manuta et al (1977)
II	Acanthamoeba	-	1 x 28.000	
III	Acanthamoeba	-	1 x 32.000	
IV	Acanthamoeba	-	1 x 38.000	
Dicytostellum $\alpha$ -Actin-binding protein	Dicytostellum	-	1 x 120.000	J. Condell et al (1982)
Fascine	œufs d'oursin	-	1 x 58.000	J. Bryan et al (1978)
Vilin	épithélium intestinal de poulet	+	1 x 85.000	A. Bresscher et K. Weber (1980)
Embrane	épithélium intestinal de poulet	+	1 x 68.000	A. Bresscher et al (1981)
Vinculine	muscle lisse fibroblastes	-	1 x 130.000	B.M. Jockusch et al (1981)

TABLEAU II  
PROTEINES REGULATRICES DE LA LONGUEUR DES FILAMENTS - FACTEURS DE SOLUTÉ

Protéine	Source	Sensibilité au Ca <sup>++</sup>	P.M.	Auteurs
Fragmine	Physarum	+	1 x 43.000	T. Hasegawa et al (1980)
Gelsoline	macrophage	-	1 x 91.000	M.L. Yin et T. Stossel (1979)
Vilin	cellules épithéliales intestinales	+	1 x 85.000	A. Bresscher et K. Weber (1980)
Actinogeline	cellules d'Erich	+	1 x 115.000	N. Mimura et A. Asano (1979)

cium, intervient spécifiquement pour activer directement l'hydrolyse de l'ATP par le complexe actomyosine. Contrairement à la myosine musculaire, la myosine cytoplasmique doit être phosphorylée pour être activée par l'actine. Cette phosphorylation intervient sur les deux chaînes légères de 20 000 d, situées dans les têtes globulaires de la molécule. La phosphorylation est assurée par le calcium à travers le complexe régulateur calmoduline-myosine kinase. La calmoduline, protéine ubiquitaire et multifonctionnelle a été récemment reconnue comme le régulateur de processus intracellulaires multiples dépendant du calcium. Protéine acide de 17 000 d, elle fixe 3 molécules de calcium et forme un complexe actif avec la myosine kinase qu'elle rend apte à phosphoryler les chaînes légères de la myosine. A ce complexe s'ajoute une phosphatase spécifique qui déphosphoryle ces dernières lorsque la concentration en calcium diminue.

L'activation de l'activité actomyosine ATPasique semble donc être très finement régulée, elle a longtemps été considérée comme essentielle dans le processus de motilité cellulaire.

Cependant dans les cellules non musculaires, un autre facteur dynamique paraît avoir aussi une importance majeure, c'est la modulation de la consistance cytoplasmique et la variété des formes structurales que peut adopter l'actine. Certaines sont remarquablement ordonnées, d'autres forment des réseaux ponctués au hasard. Les transitions rapides de ces structures et les changements de leurs propriétés viscoélastiques sont aussi une des bases structurales de la motilité cellulaire.

On a pu démontrer récemment que des protéines spécifiques associées à l'actine étaient responsables de l'organisation structurale et spatiale des filaments et de la rigidité du gel formé par la matrice d'actine mais aussi que, sous l'effet du calcium, certaines protéines étaient susceptibles de détruire ces structures et probablement de moduler la transition gel-sol.

#### Facteurs de gélation

**U**ne des propriétés les plus remarquables d'un extrait cellulaire (œufs d'oursin, macrophages, plaquettes, *Acanthoeca*) est de gélifier.

Le gel solide qui se forme entre 30 et 40°C dans un milieu physiologique, dépourvu d'ions calcium, est constitué de filaments d'actine et en général d'un ou plusieurs facteurs de gélation. Ceux-

(4) Oligomérique : formée d'un petit nombre de sous-unités.

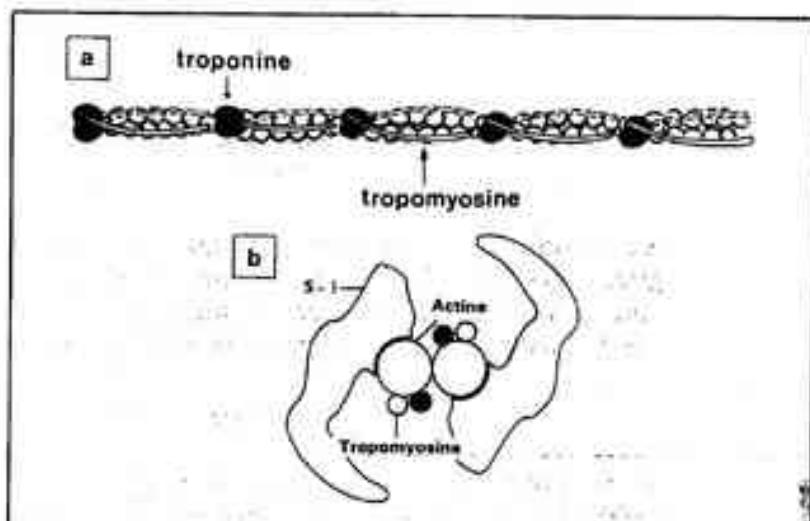


Fig. 8 - a) Filament fin d'actine musculaire à deux brins torsadés en hélice. Dans les gouttières de cette hélice sont logées les molécules fibreuses de tropomyosine et les molécules globulaires de troponine. Chaque molécule de tropomyosine est en contact avec 7 molécules d'actine et porte, associée à une de ses extrémités, une molécule de troponine. b) Association des protéines contractiles du muscle. La tropomyosine dans le muscle contracté ( $>10^{-6}$  M Ca<sup>2+</sup>) est représentée par des cercles noirs et dans le muscle relaxé par des cercles blancs. S-1 représente la tête globulaire de myosine (J. Seymour et E.J. O'Brien, 1980).

ci ont été isolés de cellules de vertébrés et d'invertébrés, de myxomycètes et de protozoaires. Bien qu'ils paraissent être structuralement hétérogènes, ils présentent tous la faculté de gélifier l'actine F (tableau 1).

Les facteurs de gélation les plus étudiés, « l'actin-binding protein » de macrophage, la filamine de muscle lisse, la spectrine d'erythrocytes, sont des protéines dimères de poids moléculaire élevé (500 000 d) qui apparaissent en microscopie comme de longues molécules à la structure flexible. Cette forme permet probablement une liberté appréciable dans l'angle d'attachement de deux filaments d'actine, et de ce fait, elle facilite un pontage important et un développement de la rigidité.

Les facteurs de gélation sont donc des protéines qui pontent les filaments d'actine pour leur donner une structure tridimensionnelle ordonnée en réseaux ou faisceaux.

#### Facteurs de régulation gel-sol

**C**es extraits cellulaires gélifiés se dissolvent en présence d'ions calcium. En 1979, il a été démontré que la gelsoline, isolée d'extrait de macrophages, présente la propriété remarquable de solubiliser le gel formé par l'actine F et « l'actin-binding protein », en présence de concentrations micromolaires de calcium.

En 1980, plusieurs équipes de chercheurs isolent des types cellulaires différents : trois facteurs sensibles au cal-

cium, l'actinogéline des cellules d'Ehrlich, la villin des cellules épithéliales intestinales et la fragmine de *Physarum*. La propriété commune de ces protéines est, pour une concentration en calcium égale ou supérieure à 10<sup>-6</sup> M, de fixer cet ion et de diminuer la viscosité des solutions d'actine F (tableau 2).

Cette propriété s'accompagne d'une segmentation des filaments d'actine, visible en microscopie électronique. La destruction du gel s'accompagne lorsqu'il y a une protéine de pontage présente, telle « l'actin-binding protein », ou lorsque la molécule elle-même, telle la villin ou l'actinogéline, en absence de calcium, fonctionne comme une protéine de pontage des filaments d'actine.

L'utilité potentielle de ces transformations entre les états de gélification et de dissolution du cytoplasme apparaît considérable. Selon le degré de pontage et la charge des polymères d'actine, le cytoplasme dans des régions différentes et à des temps différents, peut moduler l'exclusion des organelles, du solvant et des corps dissous, tout ce qui, en fait peut influencer le métabolisme de la cellule, le mouvement de l'eau et des organelles à l'intérieur de la matrice cellulaire.

#### STRATEGIE DE RECHERCHE PROPOSEE PAR LE CDST

Le sujet est trop vaste pour une bibliographie standard, en effet il se publie 400 à 500 références par an sur le sujet. On peut limiter la recherche à : ACTINE OU MYOSINE OU ACTOMYOSINE, OU CITOSQUELETTE. Sur ce sujet plus limité on recense une cinquantaine de publications par année.

## La théorie de la viabilité

La théorie de la viabilité est un outil mathématique mis au point pour étudier l'évolution des grands systèmes dynamiques comme ceux que l'on rencontre en biologie ou en sciences économiques et sociales. Elle constitue un exemple de l'utilisation des mathématiques dans un cadre non déterministe.

Jean-Pierre AUBIN

**I**l est fréquent de constater que nombre d'utilisateurs potentiels de métaphores mathématiques (voir encadré 1) pensent que l'usage des techniques mathématiques exige un cadre déterministe ou stochastique. Au point de départ, on assiste à un très grave malentendu. A la manière des physiciens, les spécialistes des sciences « molles » comme les sciences économiques et sociales, réclament des mathématiciens des modèles prédictifs. Mais il ne peut y avoir de modèles prédictifs que pour des systèmes évolutifs (ou dynamiques) qu'il est possible de faire évoluer à volonté n'importe quand. Cela implique la possibilité de faire des expériences et de connaître en quelque sorte l'environnement futur de ces systèmes.

Ce n'est pas le cas, évidemment, des « grands » systèmes provenant des sciences économiques et sociales. L'étude de tels systèmes nous conduit donc à prendre en compte, en plus de l'ignorance de l'environnement futur du système : l'absence de déterminisme (qui comprend aussi l'impossibilité d'une description exhaustive des dynamiques du système), l'ignorance des lois qui relient certaines commandes du système aux états de ce système, la plus ou moins grande variété de dynamiques disponibles offertes au système.

La théorie de la viabilité à laquelle les mathématiciens du CEREMADE (voir encadré 2) ont apporté au cours des dernières années une contribution essentielle, a pour objet d'étude l'évolution de systèmes dynamiques dont l'état est soumis à des contraintes qu'il

ne peut violer, en révélant les réactions latentes qui permettent de les réguler. Dans de tels systèmes dynamiques, la vitesse dépend à chaque instant de façon multivoque (de façon non-unique, et donc, non déterministe) de l'état présent ou passé du système et de certaines commandes de régulation. Le cadre mathématique est celui des *inclusions différentielles*, par opposition aux équations différentielles qui expriment que la vitesse dépend de l'état de façon univoque.

Dans l'étude de ces systèmes, on suppose que les commandes de ré-

gulation ont une grande inertie, c'est-à-dire qu'elles ont tendance à rester constantes et à ne varier que sous l'action de contraintes très fortes. Naturellement, on s'attend à ce que de tels systèmes possèdent de nombreuses trajectoires, ne serait-ce qu'à cause du manque de déterminisme et des possibilités de choix entre plusieurs commandes de régulation. Les premières questions que l'on a tenté de résoudre portent sur la structure de cet ensemble de trajectoires. Se pose ensuite le problème de la sélection de certaines de ces trajectoires.

### LES METAPHORES MATHÉMATIQUES

Comme le langage ordinaire, les mathématiques permettent d'élaborer des métaphores pour expliquer un phénomène donné en lui en associant un autre qui est plus familier, ou considéré comme tel. C'est le sentiment de familiarité, individuel ou collectif, inné ou acquis antérieurement par l'éducation, qui procure l'intime conviction d'avoir compris ce phénomène.

La construction de métaphores mathématiques exige naturellement le développement autonome de la discipline pour fournir des théories destinées à être substituées – ou associées – aux phénomènes en attente d'explications. C'est le domaine des mathématiques pures. La construction du *corps mathématique* obéit à sa logique propre, comme celles de la littérature, de la musique, de la peinture. Dans tous ces domaines, une satisfaction d'ordre esthétique est à la fois un but de l'activité créatrice et un signal qui permet de reconnaître les œuvres réussies. (Dans tous ces domaines également, des phénomènes de mode – de consensus social – contribuent à l'élaboration de ces critères esthétiques).

Comme une métaphore mathématique fait correspondre une théorie mathématique et un autre phénomène, cette association peut être vue de deux façons : la première, la plus connue, est de chercher dans le *corps mathématique* et les *inclusions différentielles*, ainsi que la théorie de la régulation en automatique. C'est cette universalité des résultats, prenant leur source dans une discipline et trouvant des applications dans d'autres qui rendent les mathématiques tellement fascinantes.

que une théorie qui peut correspondre de façon aussi précise que possible à un phénomène donné. C'est le domaine des mathématiques appliquées, au sens où l'on entend d'habitude.

Mais les autres disciplines peuvent à leur tour procurer aux mathématiques des métaphores, en leur suggérant des concepts et des raisonnements, en faisant pressentir ces solutions, en matière de nouveaux modes d'intuition : c'est là le domaine des mathématiques motivées.

Il est possible que le problème de viabilité de trajectoires d'inclusions différentielles ne décrive pas de façon idéale l'évolution des macro systèmes en tenant en compte les objections qui ont été soulevées. Il est possible que les utilisateurs potentiels (économistes, biologistes) soient déçus ou découragés par les résultats obtenus ou susceptibles de l'être. Mais cette motivation a rendu service aux mathématiciens, en renouvelant et en enrichissant le domaine des systèmes dynamiques et des équations différentielles, ainsi que la théorie de la régulation en automatique. C'est cette universalité des résultats, prenant leur source dans une discipline et trouvant des applications dans d'autres qui rendent les mathématiques tellement fascinantes.

□ Jean-Pierre Aubin, professeur à l'université de Paris-Dauphine et maître de conférence à l'Ecole polytechnique est l'auteur de plusieurs ouvrages sur l'analyse numérique, l'analyse fonctionnelle linéaire et non linéaire, la théorie de l'optimisation, la théorie des jeux et l'économie mathématique et les inclusions différentielles.

## LE CEREMADE

La théorie de la viabilité et ses applications aux sciences économiques ont été développées en France par des chercheurs du CEREMADE (Centre de recherche de mathématiques de la décision), équipe de recherche (ERA 249) de l'université de Paris-Dauphine, associée au CNRS en 1971. Ce centre a été formé à partir d'une politique bien définie dès cette époque : développer en milieu universitaire les applications nouvelles des mathématiques, en particulier les applications aux sciences économiques, aux sciences de l'organisation et à l'automatique.

Les principaux axes de recherche, présents dès les premiers jours, sont la théorie des systèmes dynamiques et l'optimisation sous toutes ses formes, de la programmation mathématique au contrôle optimal, en passant par la théorie des jeux, celle du choix social. Plus récemment, l'analyse des données et la classification automatique se sont développées au CEREMADE, ainsi que des applications à la théorie monétaire et à la théorie financière.

Le CEREMADE réunit une trentaine de chercheurs permanents autour de Astin J.P., Bensoussan A., Cazes P., Chavent G., Diday E., Ekeland I., Lagny E., Larnac P.M., Lasry J.M., Lions P.L. et Moulin M., ainsi qu'une trentaine de chercheurs associés français et étrangers.

## Commande optimale et viabilité

La théorie de la commande optimale, antérieure à la théorie de la viabilité, fournit une première classe de méthodes de sélection : elle consiste à associer à chaque trajectoire du système un coût et à le minimiser. Elle suppose donc implicitement l'existence d'un décideur agissant sur les commandes du système (ou d'un petit nombre de décideurs dans le cas de la théorie des jeux différentiels). Elle sous-entend aussi une information (déterministe ou stochastique) sur le futur, nécessaire à la définition du coût des trajectoires et l'existence de décisions (éventuellement conditionnelles) prises une fois pour toutes à l'instant initial.

Avec la théorie de la viabilité une autre classe de méthodes de sélection est proposée : on retient les trajectoires qui, à chaque instant, obéissent à des contraintes, dites contraintes de viabilité, telles la consommation de ressources rares en économie. Ces contraintes qui pèsent sur l'état du système déterminent un domaine de l'espace des états, appelé domaine de viabilité, au sein duquel il est indispensable que les trajectoires demeurent à chaque instant. Ces trajectoires sont alors dites

viabiles. On peut d'ailleurs faire dépendre ce domaine de viabilité de l'état présent ou de l'histoire de l'évolution de l'état, du temps, des commandes de régulation, etc... La théorie de la viabilité explicite les conditions nécessaires et suffisantes pour qu'à partir de chaque état initial, il existe une trajectoire viable du système. Elle fournit aussi des relations entre l'état du système et les commandes de régulation, qui sont les fameuses rétroactions. Il est important de souligner qu'en général, ces rétroactions ne sont pas déterministes : la commande de régulation dépend de façon multivoque de l'état du système, permettant de réguler le système de façon d'autant plus souple – et par là, plus robuste – que l'ensemble des rétroactions est grand.

On montre ainsi que tant que l'état du système est à l'intérieur du domaine de viabilité, n'impose quelle commande de régulation convient et que, par conséquent, le système garde celle qu'il hérite du passé (c'est la commande de régulation qui est constante, alors que l'état, lui, peut évoluer très vite).

Que se passe-t-il alors lorsque l'état atteint la frontière de viabilité ? Si la vitesse choisie permet à l'état du système de rester dans le domaine de viabilité, on peut encore garder la même

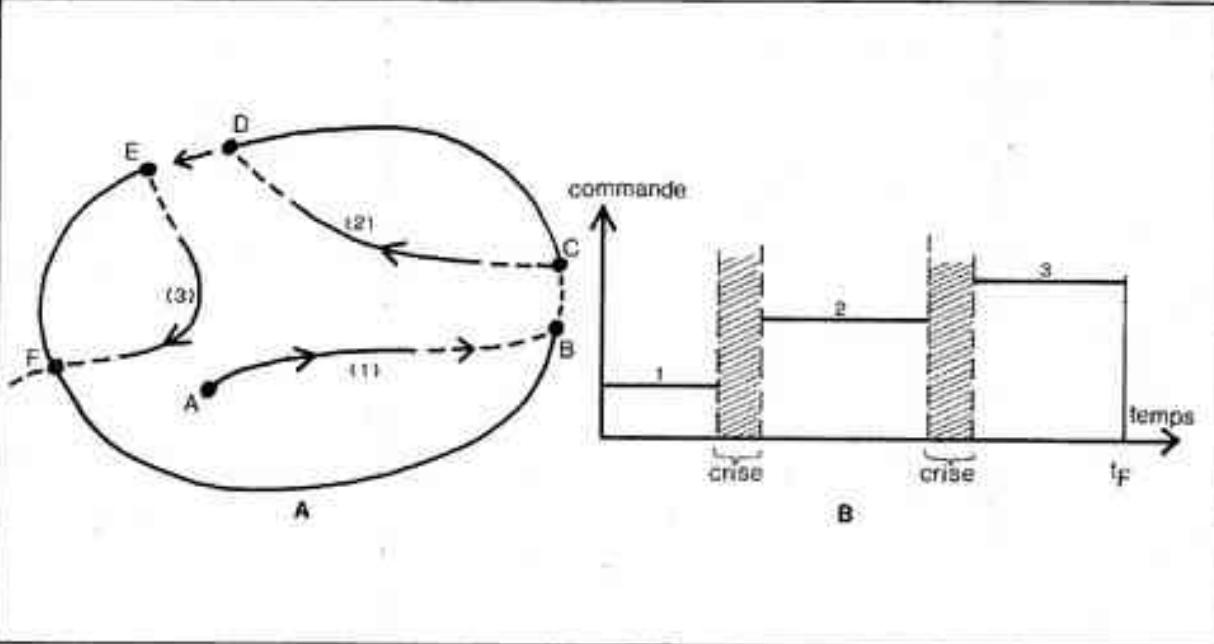


Fig. 1 – La théorie de la viabilité explique l'évolution de l'état des grands systèmes dynamiques, comme ceux rencontrés en biologie, ou en sciences humaines, soumis à des contraintes qui pèsent sur eux. Ce dessin A schématise la démarche suivie. Les trajectoires « viables » pour le système sont incluses dans un domaine de l'espace des états appelé domaine de viabilité (en gris), qui peut d'ailleurs lui aussi évoluer dans le temps. Partant d'un état initial A, le système suit une trajectoire (1) associée à une certaine commande de régulation. En B, il parvient à la frontière de ce domaine ; il y a alors une crise et le système recherche une nouvelle commande de régulation le ramenant dans le domaine de viabilité. Il suit alors une nouvelle trajectoire (2) jusqu'en D, où une nouvelle crise se produit, qui se déroule en (E). Arrivé en F, au bout de la trajectoire (3), le système ne trouve pas de commande de régulation disponible pour rendre sa trajectoire viable. Il se désorganise alors et meurt. En B est représentée l'évolution correspondante des commandes de régulation en fonction du temps. Les zones hachurées traduisent les périodes de crise. L'instant final est celui de la désagrégation du système.

commande de régulation. Sinon, on a le choix entre : ou bien agir sur la commande de régulation pour que la nouvelle vitesse fasse rentrer la trajectoire à l'intérieur du domaine de viabilité ; ou bien, lorsque c'est possible, agir sur le domaine de viabilité pour l'agrandir et pour qu'ainsi, l'état du système se retrouve encore à l'intérieur du domaine de viabilité.

Lorsqu'aucune de ces possibilités n'existe, la trajectoire « meurt » et le système n'est plus viable (fig. 1). Ce n'est donc pas un modèle déterministe, puisqu'il y a de nombreuses solutions possibles, mais il conserve quand même quelques vertus en indiquant, à contrario, qu'il y a des trajectoires impossibles.

La théorie de la viabilité détermine également une division du domaine en « cellules ». Chaque cellule est l'ensemble des états du système qui peuvent être régulés par une commande de régulation donnée. Pour aller d'une cellule à l'autre, il faut obligatoirement changer de commande. Les frontières de ces cellules signalent les zones de changement de commande. L'état d'un système est d'autant plus robuste qu'il est loin de la frontière de viabilité. Donc ne demeurent en définitive que les « portions » de trajectoires, associées à diverses commandes de régulation, qui sont éloignées de la frontière de viabilité. Cette remarque peut permettre de rendre compte de l'apparente discontinuité des conséquences de l'évolution historique de certains systèmes. Nous en donnons plus loin une illustration dans le domaine de l'évolution biologique des espèces.

Cette courte présentation de la théorie de la viabilité – qui ne prend tout son sens que sous forme de théorèmes mathématiques – a pour seule ambition de montrer que les grands systèmes dynamiques peuvent être régulés par une politique – l'opportunisme – permettant de conserver les trajectoires viables que l'absence de déterminisme – la possibilité d'évoluer selon plusieurs vitesses – permet de trouver. Nous allons maintenant donner deux illustrations, la première en économie, la seconde en paléontologie.

#### Paniers de biens et mécanismes de régulation

**C**onsidérons le cas d'une situation économique simple. Des agents économiques doivent, à chaque instant, se partager un panier de biens qui est astreint à évoluer dans

#### THEOREME DE VIABILITE

Le prototype des théorèmes de viabilité, joué, dans un cadre dynamique, le rôle joué par le théorème de point fixe de Brouwer (1910) dans le cadre statique. On désigne par  $K$  le domaine de viabilité, sous-ensemble fermé de  $\mathbb{R}^n$ . La dynamique du système est décrite par une correspondance (ou application multivoque)  $F$  de  $K$  dans un ensemble borné de  $\mathbb{R}^n$ , qui associe à tout état  $x$  de  $K$  l'ensemble  $F(x)$  des vitesses.

Si  $x_0$  est un état fixe dans  $K$ , on cherche une trajectoire viable  $t \rightarrow x(t)$  de l'inclusion différentielle :

- (i) pour presque tout  $t \geq 0$ , la dérivée  $x'(t)$  appartient à  $F(x(t))$
- (ii)  $x(0) = x_0$
- (iii) pour tout  $t \geq 0$ ,  $x(t)$  appartient à  $K$ .

Il s'agit de donner une condition nécessaire et suffisante d'existence d'une trajectoire viable pour tout état initial  $x_0$  de  $K$ . Intuitivement, on souhaiterait que pour chaque état  $x$  de la frontière de  $K$ , il existe au moins une vitesse de  $F(x)$  qui soit « tangente » à  $K$ . Encore faut-il définir une vitesse « tangente » à un ensemble fermé  $K$  quelconque qui ne possède pas nécessairement d'espace tangent ! On remplace pour cela la notion d'espace tangent à  $K$  en  $x$  par celle de cône tangent, défini pour de toutes

autres raisons par Bouligand au début des années 1930 :

$$T_K(x) = \bigcup_{\epsilon > 0} \bigcup_{h \in ]0, \epsilon[} B\left(\frac{1}{2}(x+h), \epsilon\right)$$

où  $B(A, \epsilon)$  désigne l'ensemble des points dont la distance à l'ensemble  $A$  est inférieure à  $\epsilon$ . (Le cône tangent coïncide avec l'espace tangent quand il existe).

On fait très peu d'hypothèses sur la dynamique  $F$  : le graphe de  $F$  (l'ensemble des couples  $(x, y)$  tels que  $y \in F(x)$ ) est fermé et pour tout  $x \in K$ , l'ensemble  $F(x)$  est convexe.

#### THEOREME

La condition nécessaire et suffisante pour qu'il existe une trajectoire viable pour tout état initial  $x_0 \in K$  est que : Pour tout  $x$  de la frontière de  $K$ , il existe une vitesse de  $F(x)$  contingente à  $K$  en  $x$ .

Si l'on suppose de plus que  $K$  est convexe et borné, cette condition nécessaire et suffisante de viabilité implique l'existence d'un équilibre viable (ou trajectoire stationnaire)  $\bar{x}$  :  $\bar{x}$  appartient à  $K$  et la vitesse nulle appartient à  $F(\bar{x})$ .

un ensemble de paniers de biens disponibles : cette succession de choix sera appelée trajectoire viable.

On peut recenser plusieurs mécanismes de régulation qui permettent de respecter les contraintes globales de rareté. Un exemple bien connu est celui de la formation de queues, lorsqu'il y a pénurie, c'est-à-dire quand le panier à partager atteint la frontière de l'ensemble des biens disponibles pour en sortir. Un second mécanisme consiste à introduire un (ou plusieurs) bien (s) fictif (s) pour lesquels la contrainte de rareté peut être violée. Ce sont essentiellement des biens fiduciaires, qui, contrairement aux biens « physiques », ne sont limités que dans une mesure dictée par la confiance (ou plutôt, la tolérance) de l'ensemble des agents économiques. Les déséquilibres, qui ne peuvent porter sur les biens physiques, se concentrent sur les biens fiduciaires. Un troisième mécanisme, plus simple, consiste en la régulation par les systèmes de prix. On constate que les économies réelles utilisent ces trois mécanismes de régulation dans des proportions va-

riées. On peut même considérer que les deux premiers sont des mécanismes correcteurs du troisième.

Il est possible de faire apparaître un mécanisme de régulation par les prix qui jouit de la propriété de décentralisation et qui fournit des trajectoires viables ainsi que des mécanismes plus souples qui impliquent la formation de queues ou l'utilisation de crédits en biens fictifs. Par suite, en théorie, il n'est pas illogique de justifier le fait que la « main invisible » d'Adam Smith, (philosophe et économiste écossais du XVIII<sup>e</sup> siècle, il publia avec ses *Recherches sur la nature et les causes de la richesse des nations* le premier grand traité d'économie) choisisse, à chaque instant, des systèmes de prix transmettant une information suffisante pour que les acheteurs modifient leur consommation indépendamment les uns des autres, tout en respectant la contrainte collective de rareté. Autrement, il n'est pas incohérent que dans ce cadre très simple, les mécanismes décentralisés fonctionnent.

Ces agents économiques sont plus

précisément des fonctions de demandes instantanées, c'est-à-dire des automates qui savent associer à tout système de prix et à tout panier de biens des variations instantanées de consommation, c'est-à-dire, les vitesses auxquelles les biens du panier devront être modifiés. Ces automates sont astreints à respecter une contrainte budgétaire de bon sens qui peut s'énoncer comme suit : pour chaque système de prix et pour chaque panier de biens, la valeur de la variation instantanée de consommation est négative ou nulle. Autrement dit, il est interdit de dépenser plus que ce que l'on gagne.

Il est possible de démontrer, sous des hypothèses convenables, la version dynamique du théorème d'existence d'un équilibre.

• Quelle que soit l'allocation initiale d'un panier de biens disponibles, il existe, à chaque instant, un système de prix tel que chaque agent économique, en modifiant sa consommation de façon décentralisée selon sa fonction de demande instantanée, choisisse un panier de biens de telle sorte que la somme des paniers de biens ainsi choisis demeure dans l'ensemble des biens disponibles.

Curieusement, ces mêmes hypothèses impliquent aussi l'existence d'un système de prix stationnaires et de paniers de biens stationnaires, pour lesquels les demandes instantanées sont

nulles : ces paniers de biens sont conservés par chaque agent lorsque le temps s'écoule.

Cette évolution est passive : dans ce mécanisme de régulation, le système de prix joue le rôle d'une commande de rétroaction.

On peut en effet montrer que l'évolution du système de prix dépend du temps, certes, mais via les allocations de panier de biens : la « main invisible » sait associer à toute allocation un système de prix qui transmet à chaque agent l'information pertinente lui permettant de décentraliser ses décisions. Mathématiquement, il est possible d'établir les équations qui déterminent ces prix de rétroaction à partir des fonctions de demande instantanée des agents et de l'ensemble des paniers disponibles.

### *Une métaphore paléontologique*

**L**a théorie de la viabilité peut servir de métaphore mathématique au modèle des « équilibres intermittents » en macroévolution biologique, présenté par Eldredge et Gould au début des années 70. Dans un article récent à la revue *Nature* (Paleontological documentation of speciation in Cenozoic Molluscs from Turkana Basin, *Nature*, 293 (1981), 437-443) l'auteur, P.G. Williamson, tire des

résultats de fouilles effectuées au lac Turkana (Kenya), un témoignage clair de l'évolution d'une espèce à une autre. Dans ce cas très favorable, les couches géologiques contiennent une série de fossiles mettant en évidence chaque étape de l'évolution. L'auteur a examiné plus de 3 000 fossiles montrant comment 13 espèces de mollusques ont évolué pendant plusieurs millions d'années. Il a observé que ces mollusques sont restés les mêmes pendant de très longues périodes de temps. Mais par deux fois, il y a 2 millions d'années et 700 000 ans, le nombre d'espèces a été modifié. C'est la première fois, semble-t-il, que l'on a pu observer en détail le phénomène de spéciation pendant la « ponctuation ». Ces deux ponctuations sont apparues, semble-t-il, pendant des périodes d'assèchement du lac, ce qui est compatible avec ce que nous avons dit de l'évolution des commandes de régulation lorsque la frontière de viabilité est atteinte.

### BIBLIOGRAPHIE

La théorie de la viabilité est trop récente pour faire l'objet de publications accessibles aux non-spécialistes. La théorie mathématique est présentée dans l'ouvrage *Differential Inclusions* de Aubin J.-P., Cellina A., à paraître chez Springer-Verlag en 1983 et dans la thèse de G. Baudat. Une version française - qui est l'objet d'un cours de DEA sur la théorie de la viabilité - est en cours de rédaction.

Ce sujet relevant du domaine des mathématiques n'est pas traité dans PASCAL.



## Les plantes haploïdes

Les plantes haploïdes, qui ne portent qu'un seul stock chromosomique, étaient considérées comme des curiosités assez rares jusqu'à ce que les généticiens commencent à s'y intéresser et à essayer d'en obtenir pour la production de lignées pures.

Yves DEMARLY

**A**nimaux et végétaux supérieurs ont une structure génétique généralement diploïde, c'est-à-dire qu'ils cumulent deux stocks de gènes, l'un d'origine paternelle, l'autre d'origine maternelle. Chez chaque individu à un certain stade du développement se différencient des territoires sexués où une division cellulaire particulière, la méiose, aboutit à des gamètes qui ne portent qu'un seul stock chromosomique : cet état est appelé haploïdie.

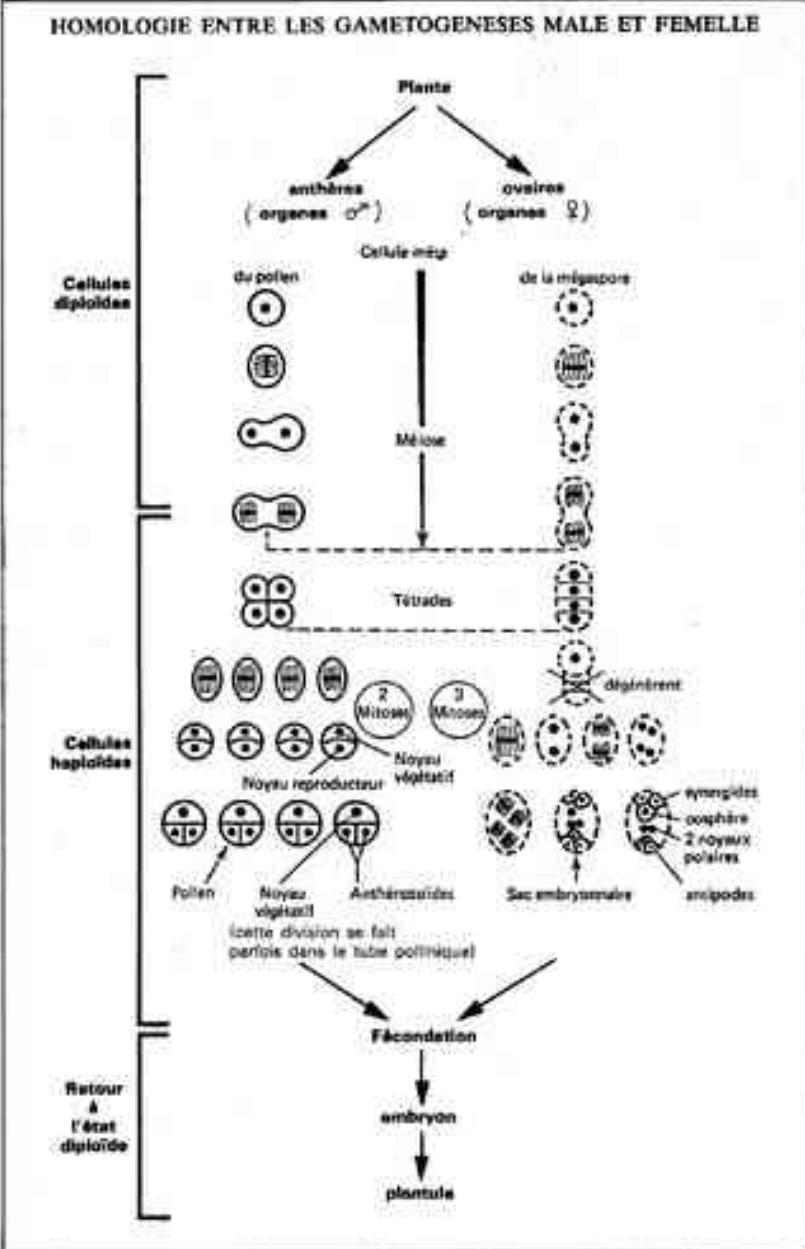
La fécondation, union d'un gamète mâle haploïde avec un gamète femelle lui aussi haploïde, est ensuite à l'origine des descendances diploïdes.

La séquence des trois étapes suivantes : sexualité des parents diploïdes - loterie génétique de la méiose par distribution des gènes dans les gamètes - fécondation reconstituant un descendant diploïde, est d'importance capitale car elle constitue une merveilleuse source de polymorphisme génétique, donc de souplesse adaptative pour ces espèces.

### Pourquoi rechercher des plantes haploïdes ?

**A**u cours de l'évolution dans le règne végétal, la phase haploïde est devenue de plus en plus brève et de plus en plus cachée et protégée. On peut donc se demander dans quel but des chercheurs ont pour objectif la mise au point de processus qui aboutissent à des plantes entièrement haploïdes.

□ Yves Demarly, professeur à l'université de Paris XI, dirige l'équipe de l'amélioration des plantes au sein du laboratoire d'étude et d'exploitation du polymorphisme végétal (LA 115), Université de Paris XI, Bât 360, 91405 Orsay.



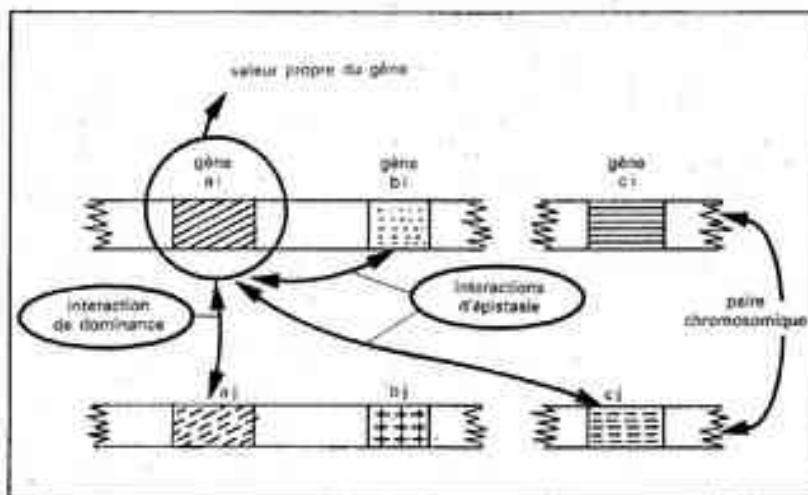


Fig. 2 - Les types d'effets géniques chez un individu diploïde.

Ce schéma représente deux zones chromosomiques d'une paire de chromosomes homologues. Dans ces zones sont figurés les emplacements ou loci de trois gènes a, b, c. Les codes que possèdent ces gènes ont les formes  $a_1$  et  $a_2$  au locus de a,  $b_1$  et  $b_2$  au locus de b,  $c_1$  et  $c_2$  au locus de c. On dit que  $a_1$  et  $a_2$  sont des gènes allèles ou des formes alléliques du gène a. Il existe des interactions entre les produits des gènes. Lorsqu'elles apparaissent entre les allèles d'un même gène elles sont appelées « dominances », lorsqu'elles s'établissent entre gènes différents c'est l'épistase.

L'état diploïde, ou polyploïde (deux stocks chromosomiques de chaque parent chez les tétraploïdes, trois stocks chez les hexaploïdes, etc...) qui est de règle chez les végétaux supérieurs, entraîne qu'à un même locus chromosomique, ou d'un locus à l'autre, nombre d'interactions compliquent l'expression propre de chaque allèle : la dominance est l'une de ces interactions (fig. 2).

• La clarté de lecture d'une valeur allélique, ou du résultat d'une opération génétique sur un allèle est donc occultée par ces effets multiples. En revanche l'état haploïde, par la simplicité de sa structure est le révélateur rêvé de la valeur propre des allèles, de la modification par des mutations (naturelles ou provoquées), des opérations de recombinaison entre allèles, des hybridations somatiques (où la formule la plus élégante est de fusionner deux sources haploïdes), des effets d'introductions ou de manipulations génétiques.

• Par différence avec l'individu diploïde correspondant la plante haploïde permettra aussi l'analyse plus fine des nombreuses interactions entre allèles ; on pourra ainsi apprécier directement certains des paramètres de la génétique quantitative qui jusqu'ici ne pouvaient que faire l'objet d'estimations statistiques, en terme de variances le plus souvent (balances internes, épistases, aptitudes à la combinaison...).

• Ce qui a poussé aussi les généticiens à s'intéresser à l'haploïdie, c'est que, lorsqu'on obtient des individus haploïdes à partir des cellules gamétiques

d'un individu hybride, on peut visualiser clairement, sous forme de plantes, un ensemble des ségrégations potentielles que cet hybride pourrait produire au cours des générations successives dans sa descendance.

L'haploïdisation apparaît ici comme un raccourcissement assez saisissant et si on la fait suivre d'une opération complémentaire, qui est l'auto-doublage du stock chromosomique, on obtient alors des lignées diploïdes parfaitement homozygotes : c'est-à-dire définitivement stables dans leur descendance, chacune de ces descendances étant une copie d'un des gamètes de l'hybride.

L'auto-doublage de chacun des chromosomes est généralement obtenu en faisant agir un agent perturbant, au moment d'une division cellulaire ou mitose, lorsque les chromosomes viennent de se dédoubler pour donner deux cellules.

Les chromosomes auto-doublés restent donc sur place au lieu de donner deux cellules-filles, ce qui aboutit à une seule cellule à nombre de chromosomes doublé. Puisque chaque allèle a été auto-copié, dans chacun des chromosomes homologues l'information génétique est parfaitement identique : c'est ce qu'on appelle l'état homozygote. Une plante homozygote, reproduite par autofécondation donne donc des descendants absolument identiques à elle-même : on a obtenu une lignée pure.

Appliquée à un hybride la séquence haploïdisation-diploïdisation permet

donc d'obtenir la gamme des ségrégations gamétiques de l'hybride et de les diffuser, de manière stable, sous forme de lignées pures. On imagine aisément l'intérêt d'une telle opération génétique pour les sélectionneurs ; avant la mise au point de cette nouvelle possibilité la stabilisation d'une variété nécessitait au minimum une dizaine de générations successives d'autofécondations, c'est-à-dire une dizaine d'années pour des espèces annuelles.

### Les voies d'obtention des plantes haploïdes :

#### Les haploïdes spontanés

Il est logique de se demander si des plantes qui ne posséderait que la moitié du nombre normal de chromosomes pourraient avoir un développement viable.

Les premiers haploïdes que l'on a pu observer provenaient d'haploïdisations spontanées : dans les graines de la plupart des espèces on trouve environ une graine sur mille qui, au moment de la germination, donne naissance à deux plantules. Souvent ces deux plantes sont jumelles, mais il arrive (avec une fréquence de quelques pourcents) que l'une des deux plantes est plus faible que l'autre : le dénombrement de ses chromosomes confirme qu'elle est haploïde. On a pu observer de telles plantes chez l'asperge et chez le piment, le cacaoyer et le caféier...

D'autres accidents spontanés ont produit des plantes haploïdes de maïs, de trèfle, de cotonnier, etc... Dans tous les cas, ces plantes sont viables mais très reconnaissables à leur taille réduite, leurs feuilles étroites et fines, et, bien évidemment, leur stérilité totale. Il arrive d'ailleurs assez fréquemment qu'au cours de leur développement les plantes haploïdes rétablissent naturellement l'état diploïde à la suite d'une mitose anormale ; les tissus doublés, plus vigoureux, prennent le dessus sur les tissus haploïdes.

Jusqu'à une époque récente, ces plantes haploïdes étaient plutôt considérées comme des curiosités assez rares et, étant donné leur aspect chétif, sans intérêt pratique. Mais à partir des années 1950, d'une part la nécessité accrue de produire des lignées pures, d'autre part le développement de techniques nouvelles qui élargissaient considérablement les possibilités de l'haploïdisation ameneront les sélectionneurs et les généticiens à perfectionner un certain nombre de voies.

### L'hybridation interspécifique

Lorsqu'on tente d'hybrider des espèces différentes, il est assez peu fréquent que la fécondation se réalise ; on connaît cependant quelques cas d'hybridations interspécifiques réussies. Une situation intermédiaire peut se produire, lorsque l'un des parents, généralement le pollinisateur, provoque le développement de l'embryon mais ne participe pas (ou participe très transitoirement) génétiquement à sa constitution. L'individu né de tels croisements ne possède donc qu'un stock chromosomal, c'est donc une plante haploïde. On peut exploiter ce phénomène et produire ainsi en grand nombre des organes haploïdes en croisant l'orge cultivée par l'orge bulbeuse sauvage ou réduire à 24 les 48 chromosomes de la pomme de terre, *Solanum tuberosum*, en la croisant avec l'une des espèces de son complexe ancestral *Solanum phureja*. Dans ces deux cas, le développement embryonnaire est délicat, l'embryon passe par un stade d'élevage « en couveuse » *in vitro*.

### L'androgenèse artificielle

Une voie beaucoup plus audacieuse a été ouverte avec la réussite par Guha

et Maheskari en 1964 de la culture *in vitro* de cellules sexuelles mâles avec régénération de plantes entières, viables et haploïdes d'origine exclusivement paternelle. Ce processus a été étendu à de nombreuses autres espèces, les laboratoires français (le Laboratoire du phytotron de Gil-sur-Yvette, les chercheurs du Laboratoire d'amélioration des plantes de l'université d'Orsay (LA 115)), ayant joué un rôle de premier plan dans ce développement (fig. 3a, 3b).

Les boutons floraux sont disséqués et les anthères qui doivent produire le pollen haploïde sont prélevées à un stade bien précis du développement des cellules sexuelles mâles. Elles subissent alors un traitement thermique et sont cultivées stérilement *in vitro* dans des milieux artificiels assez complexes (sucres, sels minéraux, auxines) qui permettent une régression de la différenciation vers le grain de pollen et un retour vers des potentialités embryonnaires. Un certain nombre des cellules ainsi rejuvenéalisées peut aboutir, soit directement, soit après des transferts dans une séquence programmée de milieux artificiels, à une plante haploïde viable issue d'un gamète paternel (fig. 4a, 4b).

### La gynogenèse artificielle

Toutes les tentatives pour obtenir des plantes à partir du sac embryonnaire sans fécondation, par culture des ovules *in vitro*, avaient échoué bien que ce soit là une voie beaucoup plus naturelle que celle qui exploitait les cellules sexuelles mâles. Cependant en 1976, San Neeum<sup>3</sup> réussissait pour la première fois à régénérer, à partir d'ovules vierges élevés *in vitro*, des plantes haploïdes d'orge. En quelques années, la gynogenèse *in vitro* a été étendue à d'autres céréales (riz, blé, maïs) à des composées (gerbera, laitue) à des solanacées (tabac) et tout récemment à la Betterave à sucre. Dans cette voie, qui constitue, sur le plan pratique une alternative heureuse à l'androgenèse et sur le plan théorique une très riche source d'étude des effets cytoplasmiques, le laboratoire d'Orsay a joué le rôle prépondérant.

Les ovaires sont prélevés stérilement dans la fleur à un stade bien déterminé du développement ovulaire, puis sont cultivés dans des milieux artificiels qui favorisent le développement des cellules haploïdes, avec ou sans excision de l'ovule. Après un élevage *in vitro* relativement long (5 à 6 mois), des plantes

<sup>3</sup> Laboratoire d'amélioration des plantes (LA 115) d'Orsay.



Fig. 3a - Développement d'embryons dans une anthère de tabac cultivée *in vitro*. (M. Tran Than Van) p. 376 de l'ouvrage : Plant tissue culture and its Biotechnological application, ed. W. Barz, E. Reinhard - Springer Verlag - Berlin Heidelberg - New-York.

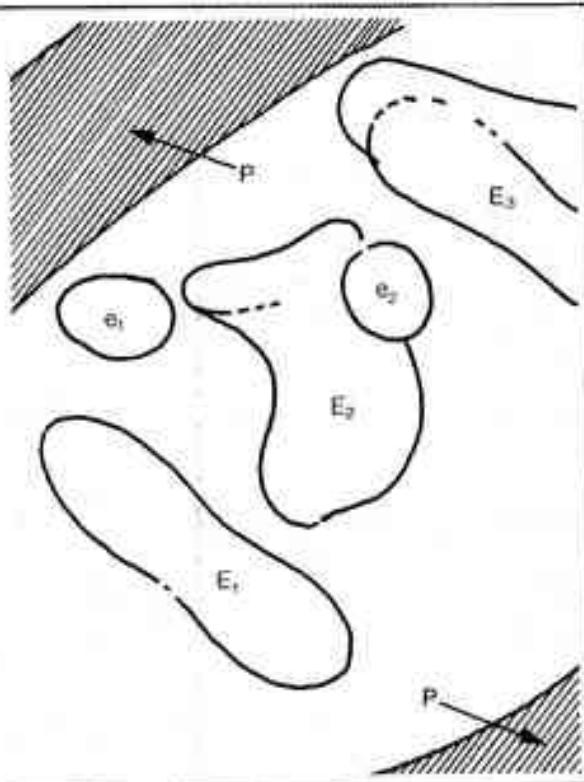


Fig. 3b - Schéma explicatif de la figure 3a :  
E<sub>1</sub> E<sub>2</sub> E<sub>3</sub> : trois gros embryos ;  
e<sub>1</sub> e<sub>2</sub> : embryos plus jeunes sphériques S ;  
P : placenta.

haploïdes sont obtenues. Une étude histologique du sac embryonnaire montre qu'elles proviennent généralement du développement de l'oosphère ou des antipodes (fig. 5a, 5b).

#### Les résultats actuels et leur intérêt

Pour un certain nombre d'espèces, on sait donc, actuellement, produire des plantes haploïdes par divers processus. Cependant, les taux de réussite de ces opérations sont encore souvent très bas et liés aux espèces et même aux génotypes.

Ainsi, dans l'androgenèse chez le Riz, le taux de plantes haploïdes obtenues par anthères mises en culture peut

varier selon les génotypes de 0 à 100 %, dans l'androgenèse chez le Maïs seul un ou deux génotypes ont donné des résultats positifs. Il semble en être de même pour la gynogenèse. Pour la production d'haploïdes par gémellité des plantules et par hybridation interspécifique, on a également démontré que l'on pouvait sélectionner certains génotypes dont l'aptitude était plus élevée.

Les taux de réussite qui sont encore souvent de l'ordre de un à cinq pour cent, sont en progrès constants et ces plantes haploïdes constituent un apport de matériel biologique d'une importance telle que de nombreux travaux portent sur l'amélioration des techniques. Les biologistes n'ont pas manqué de faire entrer les haploïdes dans leurs

programmes de recherche.

Les spécialistes de la différenciation cellulaire et de la morphogenèse ont trouvé dans les étapes de la réorientation d'une cellule sexuelle mâle vers un stade embryonnaire, une source d'analyses tout à fait exceptionnelles (rôle de l'axe du fuseau mitotique, rôle des organites cytoplasmatiques, importance de l'apparition des parois pectocellulosiques, etc.). De même, les premières étapes de la gynogenèse constituent une matière de choix pour comprendre la différenciation des cellules du sac embryonnaire, les rapports entre tissus maternels diploïdes et les territoires haploïdes ainsi que la différence entre le rôle inducateur de divisions et le rôle fécondant du gamète mâle.



Fig. 4a - Plantule sortant d'une anthère de Pétunia cultivée *in vitro* (photo C. Raquin, Orsay).

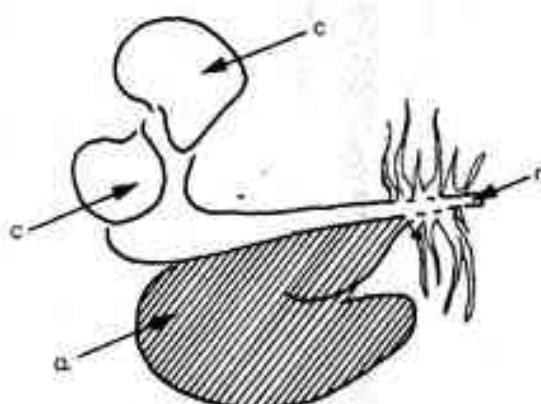


Fig. 4b - Schéma explicatif de la figure 4a : c - cotylédons ; r - radicule ; a - restes de l'anthère.



Fig. 5a - Sortie de plantules haploïdes gynogénétiques issues d'un ovaire d'orge non fécondé cultivé *in vitro*.

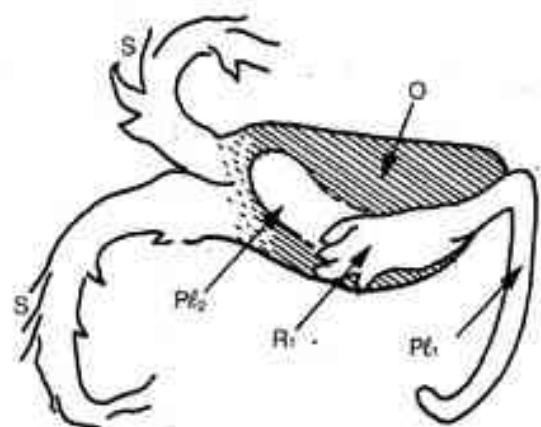


Fig. 5b - Schéma explicatif de la figure 5a. S : stigmate ; O : Ovaire ; Pl<sub>1</sub> et R<sub>1</sub> : Plantule et racines d'une première plante ; Pl<sub>2</sub> : 2ème ébauche de plante.

Les généticiens sont également preneurs de plantes haploïdes dans les programmes d'étude de la mutagenèse artificielle et d'hybridations somatiques par fusion de protoplastes ; ces hybridations sont, en fait, l'aggrégation, sans sexualité, de deux cellules parentales ; si les parents sont diploïdes, l'hybride résultant sera tétraploïde et ceci peut être gênant, mais si l'on part de parents haploïdes, on aboutit alors à un hybride diploïde. De même, l'obtention de l'homoygote parfaite, réalisée par autodoublement des haploïdes, constitue un matériel précieux pour l'analyse des interactions entre allèles, des dépressions liées à la consanguinité, ou de l'expression de la vigueur hybride.

Cette même opération d'haploïdisation suivie de doublement est largement exploitée par les sélectionneurs pour fixer rapidement les produits de leurs hybridations. Des lignées pures de blé, d'orge, de riz, issues de la régénération d'une cellule sexuelle mâle sont déjà cultivées et constituent des innovations variétales obtenues beaucoup plus rapidement que par toute autre méthode ; par exemple, alors qu'il fallait environ dix années pour créer une nouvelle variété de blé, l'haploïdisation *in vitro* réduit le délai à six ans, ce qui permet une bien meilleure adéquation de la variété aux exigences économiques et technologiques du moment (fig. 6).

Dans ce même ordre d'idée, les généticiens ont eu la curiosité, partant de lignées de riz, d'orge, de faire une haploïdisation puis de redoubler les chromosomes de la plante haploïde. Toutes les théories génétiques alors en vigueur permettaient d'attendre une identité entre l'haploïde doublé et la lignée pure d'origine. Ceci a effectivement été vérifié pour un certain nombre des plantes obtenues, mais, par contre, une proportion importante des nouvelles plantes était très différente. L'étude de leur descendance en autofécondation a révélé que les caractéristiques apparues étaient transmissibles. Cependant, l'analyse du comportement en croisement montre qu'on est en présence d'une variation héréditaire mais non mendéienne (5) : on a appelé épigénétique ce contrôle de la forme d'expression du gène.

Pour l'étude comparative de tels effets, une très belle expérience est actuellement en cours. Partant d'une lignée pure d'orge, sont comparés les quatre types de descendances suivants (fig. 7) : autofécondation de la lignée d'origine, autofécondation des haploïdes doublés androgénétiques, autofé-

condation des haploïdes doublés gynogénétiques, autofécondation des haploïdes doublés issus de croisement interspécifique. Quatre types de relations gènes-épigéniques sont ainsi établies dans un contexte génétique identique.

Dès maintenant, on a démontré que la gynogenèse entraîne l'apparition de mnémovariants mais avec une fréquence et une intensité très limitée comparée à ce qui apparaît en androgenèse. Le matériel végétal ainsi obtenu ouvre donc la possibilité d'analyses fines des signaux moléculaires qui sont à l'origine des modalités d'expression du code génétique.

Dans l'ensemble des très nombreuses expériences en cours, utilisant ces possibilités de division par deux du nombre chromosomal d'une plante, il faut citer encore celles qui concernent la recherche de variabilité pour des espèces polyploïdes : à partie d'espèces sauvages généralement allogamiques et diploïdes, la domestication a développé un grand nombre de formes cultivées polyploïdes possédant un système de reproduction stabilisateur (autogamie ou reproduction végétative). Simultanément, à mesure de l'accroissement de leur productivité, les formes cultivées ont perdu certaines de leurs qualités ancestrales (formes de résistance à des pathogènes, souplesse

d'adaptation, etc...). Il serait donc intéressant de réintroduire une part du polymorphisme initial, mais la barrière de la polyploidie et, parfois, des systèmes de reproduction, empêche ce type d'hybridation. Récemment, le retour d'un état polyploïde à l'état diploïde par les voies ci-dessus décrites, joint à des hybridations sexuées (ou somatiques selon les cas), avec des espèces ancestrales, a été proposé comme une stratégie très séduisante. De tels programmes ont immédiatement été mis en œuvre pour la Pomme de terre et pour la Lutèze.

**B**ien qu'il soit impossible de donner une vue exhaustive des recherches utilisant les plantes haploïdes, on perçoit très nettement que ce matériel biologique nouveau sera une source exceptionnelle d'innovations. D'ores et déjà des résultats marquants se sont fait jour aussi bien dans les domaines de la compréhension des différenciations cellulaires, des modalités d'expression des gènes et des relations entre l'épigénique et le code génétique, que dans celui des méthodes de sélection, grâce aux jeux stratégiques qui sont permis sur les structures homozygotes et sur les niveaux de polyploidie (fig. 7).



Fig. 6 - Plante haploïde de Piment obtenue par androgenèse (photo H. Bollon - Ets Clauze).

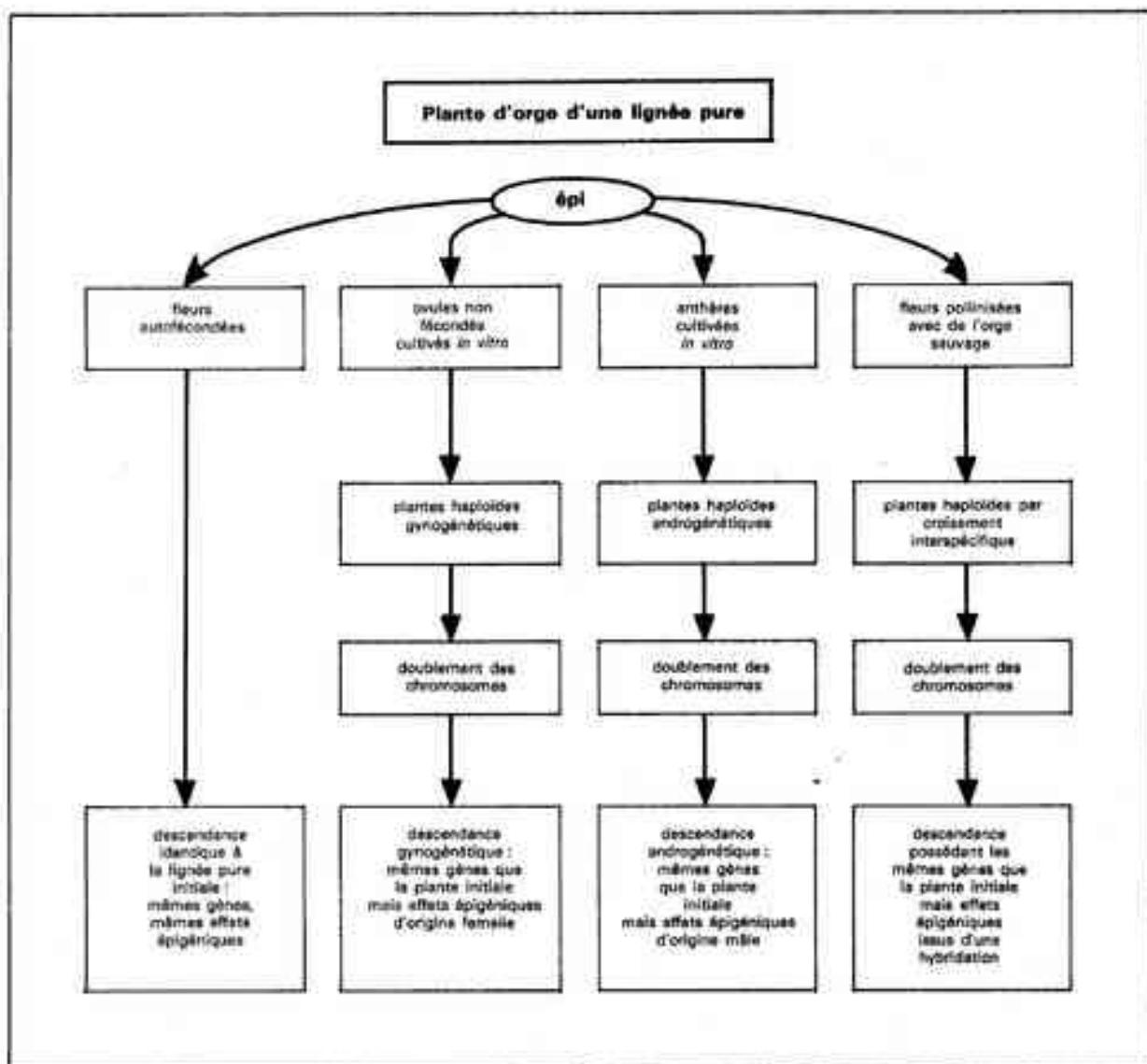


Fig. 7 - Les quatre types de descéndances mises en comparaison (H. San Nocum).



Fig. 8 - Essais de rendement de variétés de blé issues d'androgenèse (photo Y. Henry et J. de Buyser).

#### BIBLIOGRAPHIE DE L'AUTEUR

- (1) Collis G.B. and Legg P.D., 1974, The use of haploids in breeding allotetraploid species. In *Haploids in Higher Plants*, ed. K.J. Kash, pp. 231-247, University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada.
- (2) Koushki Y., 1979, Analyse Numérique de la variabilité observée dans les descéndances de lignée pure de riz (*Oryza sativa L.*) traitée par androgenèse in vitro. Thèse Docteur-Ingénieur, Université Paris-Sud, Orsay.
- (3) San Nocum L.H., 1976, Haploïdes d'*Hordium vulgare L.* par culture in vitro d'ovaires non fécondés. *Ann. Amelior. Plantes*, 26, 721-724.
- (4) San Nocum L.H. and Ahmadi N., 1982, Variability of doubled haploids from in vitro androgenesis and gynogenesis in *Hordium vulgare L.* In *Variability in plant regeneration from tissue culture*, ed. Praeger Publishers, pp. 273-282, New-York (USA).
- (5) Silé M., 1976, La notion de programme génétique chez les végétaux supérieurs. II. Aspect expérimental : obtention de variétés par culture de tissus in vitro sur *Lactuca sativa L.* *Ann. Amelior. Plantes*, 26, (4), 523-547.
- (6) Truong L., 1977, Variabilité des plantes issues d'androgenèse in vitro et tentative d'application directe au sélecteur de cette variabilité et de la mutagenèse par voie haploïde chez le Riz (*Oryza sativa L.*). Thèse de 3ème cycle, Laboratoire Amélioration des plantes, Université Paris-Sud, Orsay.

#### BIBLIOGRAPHIE COMPLÉMENTAIRE PROPOSÉE PAR LE CDST

En raison du grand nombre de références publiées chaque année (>80), cet article ne fait pas l'objet d'une bibliographie standard. Le CDST reste à votre disposition pour vous fournir une bibliographie personnalisée. Pour les lecteurs désirant effectuer eux-mêmes une bibliographie au terminal, le CDST recommande la stratégie de recherche suivante : **HAPLOID/ ET/ (VEGETAL OU 370 # / CIF OU 380 # / CH)**.  
 370 et 380 sont les sections de PASCAL concernant les plantes :  
 - 370 : Biologie et physiologie végétales ;  
 - 380 : Sciences agronomiques. Productions végétales.  
 Nombre de références approximatif : 80 par année.  
 (Le signe / indique la présence d'une truncature, on recherche tous les mots commençant par la racine indiquée :  
 Exemple : POLARIS/ → POLARISATION, POLARISE, POLARISEE, etc...).

## La spectroscopie laser

Mis au point il y a une vingtaine d'années, les LASER possèdent maintenant de très nombreuses utilisations. Dans ce premier article seuls seront présentés les nouveaux phénomènes observables grâce à la forte intensité régnant dans les faisceaux LASER. Dans le prochain numéro nous verrons comment contrôler presque parfaitement la longueur d'onde de ces LASER.

Bernard CAGNAC

Tout le monde a entendu parler des LASER, ces nouvelles sources lumineuses mises au point il y a une vingtaine d'années en appliquant les idées d'Einstein sur l'interaction des atomes et des ondes lumineuses. De ces LASER sortent des rayons lumineux fins, directs et très brillants, auxquels on a trouvé de nombreuses utilisations techniques et scientifiques.

En fait, l'intérêt des LASER comme outils de recherche a considérablement augmenté au cours des dix dernières années, depuis que l'on sait fabriquer des LASER à colorants, dont on peut faire varier la longueur d'onde, pour l'accorder à chaque problème particulier, ce que ne permettaient pas les premiers LASER. Cette possibilité est particulièrement importante en spectroscopie ; et c'est elle qui a permis le développement de la spectroscopie LASER.

En effet, la spectroscopie étudie les échanges d'énergie entre atomes et ondes lumineuses ; et ceux-ci se produisent pour des valeurs bien particulières de la longueur d'onde lumineuse, du fait qu'ils se font par absorption ou émission de photons, ces « grains de lumière » dont l'énergie  $h\nu$  est proportionnelle à la fréquence  $\nu$  ( $h$  est la fameuse constante de Planck (1). Un même atome peut se trouver dans différents états où il emmagasine des valeurs différentes de l'énergie :  $E_1$ ,  $E_2$ ,

(1) La constante de Planck relie la longueur d'onde d'une onde à son potentiel  $\psi = h\nu / (8\pi c \cdot m^2)$ .

■ Bernard Cagnac, professeur à l'université Pierre et Marie Curie, est responsable d'une équipe au sein du Laboratoire de spectroscopie hertzienne (LA 18) de l'École normale supérieure de Paris.

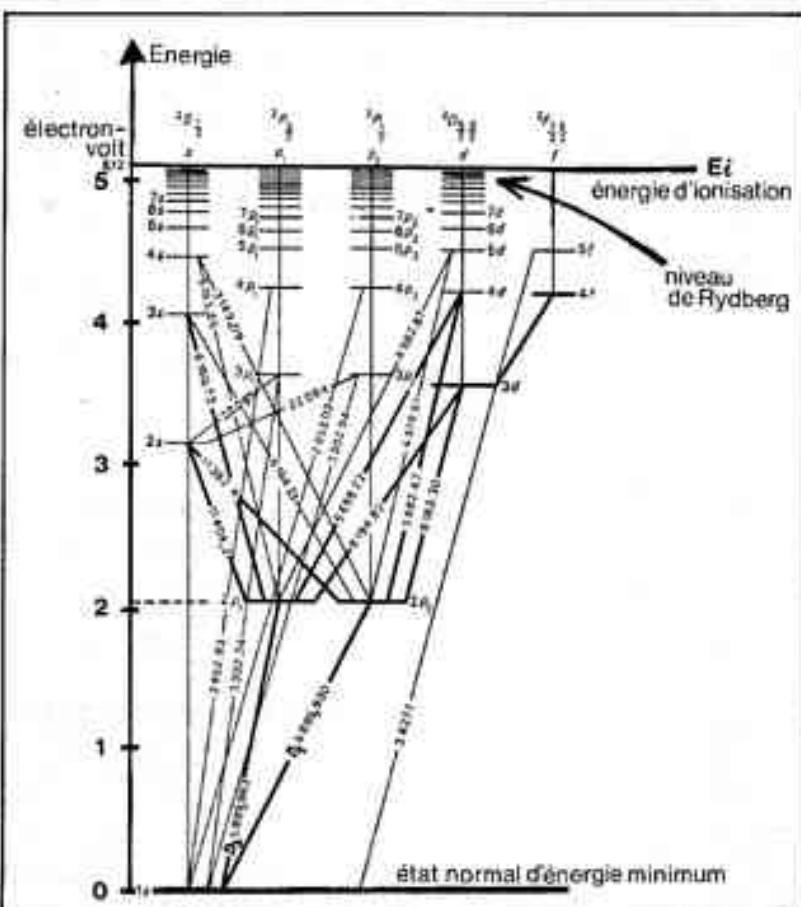


Fig. 1 - Diagramme énergétique de l'atome de sodium. L'axe vertical des énergies est ici gradué en électron-Volts. L'origine correspond à l'état normal de l'atome. Un apport d'énergie de 5,12 eV permet d'arracher un électron : c'est l'énergie d'ionisation. Les divers états d'énergie de l'atome sont représentés par les petites barres horizontales. Pour faciliter la clarté, on les a répartis dans plusieurs colonnes verticales (qui correspondent, chacune, à d'autres propriétés de l'atome, indiquées par les symboles  $^2S_{1/2}$ ,  $^2P_{3/2}$ , etc...). On remarque que les niveaux d'énergie se serrent dans le haut de chaque colonne, juste en-dessous de l'énergie d'ionisation : ce sont les niveaux de Rydberg, correspondant à de grands nombres quantiques. Les transitions radiatives entre niveaux d'énergie sont figurées par des traits obliques sur lesquels est inscrit la longueur d'onde en Angströms. L'énergie du photon correspondant est représentée par la différence de hauteur entre les deux barres horizontales.

$E_1, \dots$  : cet atome peut effectuer la transition entre les deux états caractérisés par les énergies  $E_1$  et  $E_2$ , par exemple, en absorbant ou en émettant l'énergie nécessaire sous la forme d'un photon  $h\nu = E_2 - E_1$ , appartenant à une onde lumineuse de fréquence  $\nu$  bien déterminée. Ainsi, en mesurant les fréquences  $\nu$  (ou les longueurs d'ondes  $\lambda = c/\nu$ ) émises ou absorbées par les atomes, on obtient des renseignements précis sur leurs différents états énergétiques (fig. 1).

## *Spectroscopie d'émission et d'absorption – Avantages des sources LASER*

Dans les mesures spectroscopiques les plus simples, on recueille la lumière émise par les atomes excités dans une décharge électrique ou dans une flamme et on analyse les différentes longueurs d'onde qui la composent ; c'est la spectroscopie d'émission. Mais on peut aussi étudier les atomes qui sont dans leur état normal (d'énergie minimum), en l'absence de décharge et de flamme, en les irradiant avec une source lumineuse externe et en notant pour quelles longueurs d'onde ils absorbent la lumière de cette source ; c'est la spectroscopie d'absorption. L'emploi des LASER a apporté un renouveau considérable à la spectroscopie d'absorption, pour deux raisons différentes que nous allons développer.

Le premier avantage tient à la très forte intensité lumineuse que l'on obtient dans les faisceaux LASER. Ce n'est pas que les LASER produisent des puissances lumineuses supérieures à celles des sources lumineuses conventionnelles, leurs ordres de grandeur sont en fait comparables. Mais la lumière produite par un LASER est toute entière rassemblée dans un faisceau lumineux très fin et très directif (alors que celle d'une source conventionnelle est dispersée dans toutes les directions de l'espace) ; et cette concentration de l'énergie lumineuse dans un faible volume conduit localement à une intensité lumineuse extrêmement élevée.

Le deuxième avantage est lié à la sélectivité en longueur d'onde : un LASER émet généralement sur une longueur d'onde unique ; alors que la puissance lumineuse d'une source courante se trouve au contraire répartie entre un certain nombre (voire un très grand nombre) de longueurs d'onde, ce qui diminue son intensité lumineuse « utile » pour une expérience donnée à longueur d'onde déterminée. En définitive l'intensité lumineuse utile dont on

dispose dans un faisceau LASER est couramment un million de fois plus importante que dans un faisceau lumineux ordinaire. Et ceci permet de réaliser de nombreuses expériences qui étaient impossibles dans les conditions ordinaires.

De plus, on est capable de contrôler la longueur d'onde unique émise par un LASER avec une marge d'incertitude (ou largeur en longueur d'onde) qui est mille fois plus petite que celle d'une source lumineuse conventionnelle. Il en résulte une précision bien supérieure des mesures spectroscopiques. Mais nous renvoyons à un prochain numéro pour la description de ces mesures de haute précision. Et, dans la suite de cet article, nous verrons les possibilités ouvertes par la forte intensité des faisceaux LASER.

L'augmentation considérable de l'intensité lumineuse utile, disponible grâce aux LASER, a permis en effet d'étendre facilement le champ d'étude de la spectroscopie à un grand nombre de phénomènes qui étaient auparavant très difficiles sinon impossibles à observer.

### *L'excitation par échelon*

C'est une technique déjà ancienne de la spectroscopie, mais dont les possibilités d'application étaient restées très limitées. Elle consiste à porter des atomes dans un état d'énergie très élevée. P.

(fig. 2) et produisant deux excitations successives  $E_1 \rightarrow E_2 \rightarrow E_3$  avec deux ondes lumineuses de fréquences différentes  $h\nu_1 = E_2 - E_1$  et  $h\nu_2 = E_3 - E_2$ .

La difficulté du processus tient au fait que l'état intermédiaire  $E_2$  est un état excité de durée de vie brève  $\tau_2$  (après un temps très bref, de l'ordre de  $\tau_2$ , l'atome retourne spontanément à l'état fondamental  $E_1$  en réémettant un photon ; c'est le phénomène de fluorescence). Pour que le processus ait un rendement satisfaisant, il faut que l'atome dans l'état  $E_2$  ait une probabilité importante d'absorber un photon  $h\nu_2$ , pendant ce bref intervalle de temps : c'est-à-dire que l'intensité lumineuse doit être très élevée. C'est l'emploi des LASER qui a permis en fait le développement de la technique d'excitation par échelon. Dans les expériences courantes les deux photons successifs  $h\nu_1$  et  $h\nu_2$  sont fournis par deux LASER différents ; mais on peut aussi combiner un photon LASER avec une excitation produite par une autre source : dans de récentes expériences effectuées au Laboratoire pour l'utilisation du rayonnement électromagnétique (LURE) à Orsay, le premier photon  $h\nu_1$  est fourni par un LASER tandis que le deuxième  $h\nu_2$  est un photon beaucoup plus énergétique (dans la zone intermédiaire entre l'ultra-violet et les rayons X) issu du rayonnement synchrotron.

### Les transitions multiphotoniques

Ans les transitions multiphotoniques, on additionne ancora l'énergie de plusieurs photons. Mais, dans ce cas, l'atome absorbe simultanément les énergies des photons sans passer dans un état excité intermédiaire. Ce processus est schématisé sur la figure 3 dans le cas de deux photons ( $E_2 - E_1 = 2\hbar\nu$ ) ; mais il est possible de la produire avec un nombre quelconque  $n$  de photons, ( $E_2 - E_1 = n\hbar\nu$ ). Dans le service de physique atomique du Commissariat à l'énergie atomique par exemple, on produit couramment les phénomènes d'ionisation par absorption simultanée d'une dizaine de photons.

Toutes ces transitions multiphotoniques peuvent utiliser les photons  $h\nu$ , tous égaux, provenant du même LASER. Il est aussi possible d'irradier les atomes simultanément avec les faisceaux lumineux issus de deux LASER distincts et d'observer des transitions multiphotoniques utilisant des photons différents provenant des deux LASER (cas (b) de la figure 3).

Lorsqu'on étudie l'interaction onde-atomes, on développe habituellement les calculs au premier ordre seulement

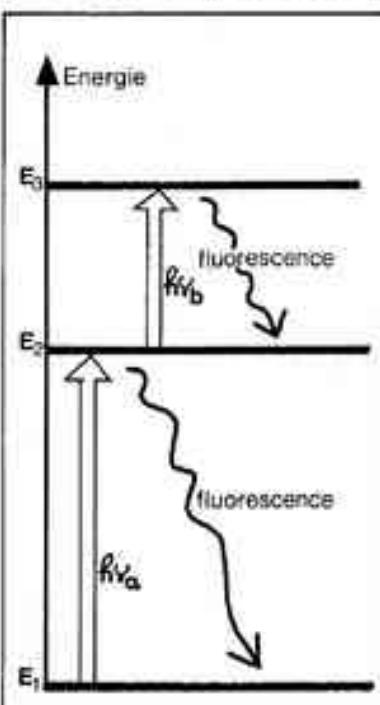


Fig. 2 - Diagramme énergétique d'une excitation par échelon (l'atome reste pendant un temps très court dans l'état intermédiaire  $E^{\pm}$ ).

de la théorie des perturbations et ces processus multiphotoniques sont interdits. Mais si l'on développe les calculs aux ordres plus élevés de la théorie des perturbations, on trouve à l'ordre  $n$  la possibilité des processus à  $n$  photons. Bien sûr ces processus ont des probabilités beaucoup plus faibles que les processus à un photon ; il faut, pour les observer, des intensités lumineuses très fortes. Ceci explique qu'il ait fallu attendre les premiers LASER des années 1960 pour observer ces processus multiphotoniques prévus théoriquement dès 1930.

#### L'étude des états de Rydberg

C'est une conséquence commune des deux techniques que nous venons de décrire, permettant de produire des états atomiques très excités. Les états de Rydberg sont des états atomiques correspondant à des nombres quantiques très grands et dont les énergies sont, par suite, très proches de l'énergie d'ionisation : ces énergies sont représentées sur la figure 1 par les traits horizontaux très serrés, dans le haut de chaque série verticale de niveaux d'énergie.

Dans ces états atomiques très particuliers, l'électron excité se trouve à une distance moyenne très grande du noyau de l'atome et il pénètre très peu à l'intérieur du « cœur » formé par le noyau et tous les autres électrons (fig. 4). On peut alors, en première approximation, considérer l'atome A comme formé d'un « cœur » (un ion A<sup>+</sup> dont la dimension reste voisine de l'Angström) entouré par un électron très lointain à des centaines, voire des milliers d'Angströms. Il s'agit alors d'un système relativement simple, ayant beaucoup de points communs avec un atome d'hydrogène et sur lequel il est facile de vérifier des lois systématiques en fonction du nombre quantique principal  $n$ . On peut ainsi étudier des atomes correspondant à des valeurs de  $n$  supérieures à 100, et pour lesquels la distance de l'électron excité dépasse le micron ; c'est-à-dire que ces atomes ont une dimension presque macroscopique (avec un bon microscope optique on voit des objets d'un micron).

On sait techniquement réaliser des écrans percés de minces fentes dont la largeur est de l'ordre du micron. On peut envoyer un jet d'atomes à travers un tel écran ; et l'on peut aussi exciter les atomes par irradiation LASER avant qu'ils ne traversent cet écran. Lorsqu'un atome absorbe les photons nécessaires pour l'exciter dans un état de Rydberg (avec  $n \approx 100$ ), il devient très gros ; et il se trouve dans la même situation que la balle de la fable, per-

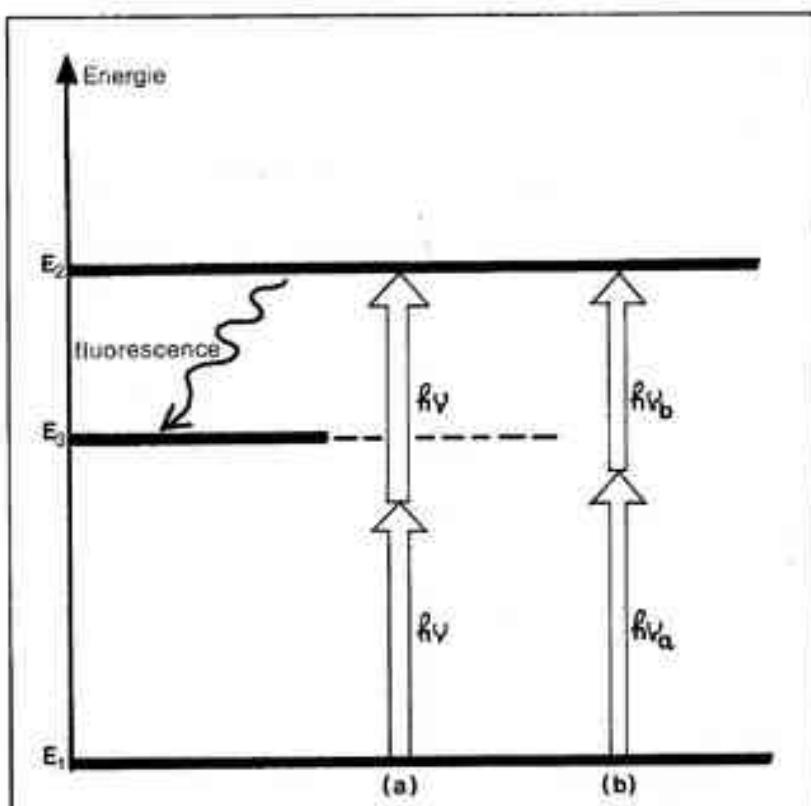


Fig. 3 – Diagramme énergétique de transitions à deux photons :  
a) utilisant deux photons du même LASER  $E_2 - E_1 = 2h\nu$   
b) utilisant deux photons de deux LASER différents  $E_2 - E_1 = h\nu_a + h\nu_b$   
(Par opposition avec l'excitation par échelons, de la figure 2, il n'y a pas d'état atomique intermédiaire).

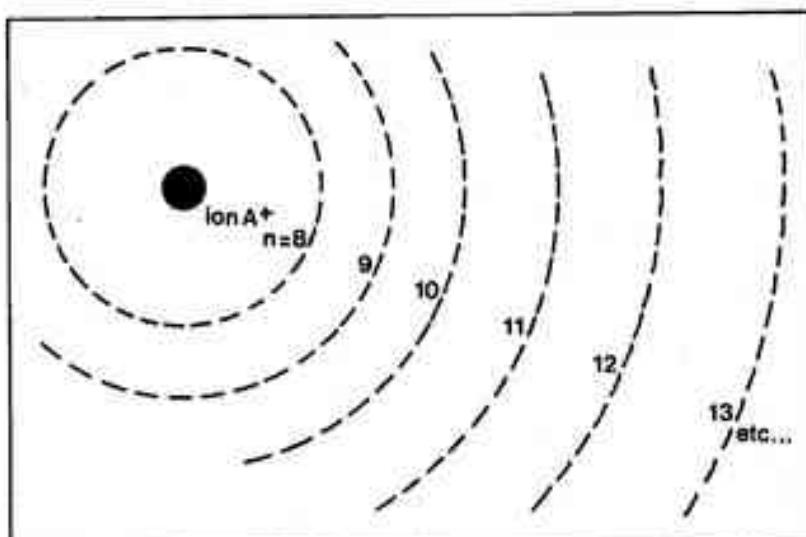


Fig. 4 – Représentation imagée des états de Rydberg de l'atome A. Un état de Rydberg est caractérisé par une « position » très éloignée d'un des électrons de l'atome. Dans un modèle simplifié, on peut alors représenter l'atome A par un cœur assez petit, formé par l'ion A<sup>+</sup> (c'est-à-dire un atome A ayant perdu un électron), autour duquel un électron tourne à grande distance. La figure indique les dimensions relatives du cœur et de différents cercles sur lesquels l'électron peut tourner. Chacun de ces cercles est numéroté à l'aide du nombre quantique principal  $n$  caractéristique de chaque état atomique. On peut montrer que les rayons  $r(n)$  de ces cercles varient comme le carré du nombre quantique :  $r(n) = n^2 r_0$  (la dimension du cœur étant égale à quelques  $r_0$ ). A l'échelle de cette figure, les cercles correspondant aux nombres quantiques  $n$  supérieurs à 100 ont des rayons de plusieurs mètres. On montre aussi que les énergies correspondant à ces états de Rydberg sont données par la formule approchée :  $E(n) = E_1 - \frac{1}{n^2}$   
(où  $E_1$  est l'énergie d'ionisation indiquée sur la figure 1).

due par sa gourmandise et devenue trop grosse pour passer à travers les fentes du grenier : on observe effectivement que le jet d'atomes, dans l'état de Rydberg, ne traverse plus l'écran percé de fentes ; l'expérience a été réalisée au laboratoire de spectroscopie hertzienne de l'École normale supérieure.

#### *La spectroscopie des atomes artificiels, de très courte durée de vie*

**L**es noyaux de ces atomes sont fabriqués dans des réactions nucléaires en bombardant des noyaux naturels avec des protons, par exemple, à la sortie de puissants accélérateurs. Les nouveaux noyaux ainsi obtenus sont instables et se désintègrent spontanément, au bout d'un temps plus ou moins long : c'est la raison pour laquelle on ne les trouve pas normalement dans la nature.

Dans les expériences courantes en spectroscopie d'absorption, la probabilité d'excitation de chaque atome particulier est généralement très faible. Mais comme le nombre total des atomes présents dans l'échantillon étudié est extrêmement élevé, la lumière produit les atomes excités en nombre suffisamment élevé pour permettre leur observation. Les atomes artificiels instables sont obtenus en très petit nombre et leur observation n'est possible que s'ils sont pratiquement tous excités ; c'est-à-dire qu'il est indispensable de les irradier avec la forte intensité lumineuse d'un faisceau LASER.

De telles expériences ont été réalisées au CERN par une équipe mixte appartenant à deux laboratoires du CNRS situés à Orsay spécialisés l'un en physique nucléaire (Laboratoire René Bernas), l'autre en spectroscopie (Laboratoire Aimé Cotton). Elles ont permis de mesurer les données spectroscopiques de plus d'une dizaine d'isotopes dans le cas du sodium ou du potassium et d'une trentaine d'isotopes dans le cas du rubidium ou du cézium. De ces données spectroscopiques, on peut déduire certains paramètres caractéristiques des noyaux correspondants (moments cinétiques, magnétiques ou quadrupolaires) ; la connaissance systématique de longues séries de noyaux isotopes est un test précis pour la vérification des modèles nucléaires.

#### *L'observation d'un seul atome*

**C**es expériences sur les noyaux artificiels ont bien démontré la possibilité d'observer, grâce aux LASER, un très petit nombre d'atomes. Cette possibilité a été

poussée à sa limite ultime, jusqu'à l'observation d'un seul atome. L'expérience portait en réalité sur un seul ion, enfermé dans un « piège à ions ». En appliquant une tension électrique appropriée entre des électrodes de formes spéciales, on parvient en effet à maintenir des ions enfermés dans un tout petit volume.

par les pièges à ions. Cet emprisonnement des ions pendant de longues durées permet d'envisager diverses mesures de haute précision, qui intéressent un certain nombre de laboratoires, en Allemagne, aux États-Unis et en France (à l'Université de Marseille, et au laboratoire de l'horloge atomique à Orsay).

#### *Les expériences LIDAR*

**L**a technique LIDAR est une autre manière d'observer la localisation dans l'espace d'atomes ou molécules ; il s'agit là de ceux qui sont au loin dans l'atmosphère ; et cette technique est une transposition, dans le domaine des ondes lumineuses et de la physique atomique, de la technique RADAR qui utilise les ondes radio en navigation. C'est pourquoi le mot LIDAR a été formé en remplaçant les deux premières lettres du mot « radio » par celles de la lumière « light ».

Ces expériences LIDAR sont en fait de véritables expériences de spectroscopie LASER réalisées à distance, puisqu'on choisit une longueur d'onde accordée à celle d'une transition atomique ; l'écho de lumière est formé par les photons de fluorescence réémis par les atomes après absorption de l'onde LASER. Ou bien encore dans certains cas la longueur d'onde est choisie seulement voisine de la transition atomique : on observe un phénomène de diffusion de lumière, renforcé par la proximité de la transition.

Ces expériences utilisent à la fois la très forte puissance lumineuse (de l'ordre du megawatt dans des impulsions de courtes durées) et la directivité du faisceau LASER (améliorée encore par l'utilisation d'un télescope) qui permettent de réaliser une intensité lumineuse suffisante à plusieurs dizaines voire centaines de kilomètres. Le retard avec lequel on reçoit les photons-échos indique la distance des atomes ou molécules, sélectionnés par le choix de la longueur d'onde.

La technique LIDAR s'applique aussi bien à la basse atmosphère qu'à la haute atmosphère pour des problèmes de pollution, ou des études de géophysique ; et elle s'est développée parallèlement dans plusieurs pays ; en France, au Laboratoire d'aéronomie du CNRS (Paris VI et Verrières).

#### *L'excitation d'états moléculaires*

**C**'est une autre application où les LASER rendent de grands services. Un état moléculaire est en effet déterminé à la fois par

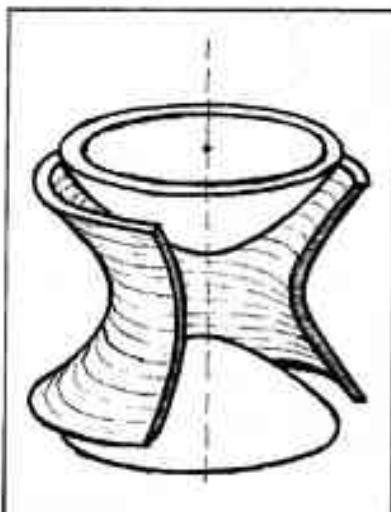


Fig. 5 - Piège ou trappe à ions. Les pièges à ions sont le plus souvent formés par des structures métalliques en forme d'hyperboloides de révolution, parce que cette forme particulière permet un calcul simple et rigoureux des mouvements périodiques des ions au centre du piège. Pour la clarté de la figure on a découpé un quart de l'hyperbolide de révolution à une seule nappe qui forme l'électrode externe. Ceci permet de mieux montrer les deux électrodes internes qui forment un hyperbolide de révolution à deux nappes. Ces deux électrodes internes sont portées au même potentiel ; mais on applique une différence de potentiel périodiquement variable entre ces deux électrodes internes et l'électrode externe. C'est ce qui permet d'obtenir le confinement des ions au centre du piège.

me au centre de la structure ainsi construite : c'est ce qu'on appelle un « piège » ou une « trappe » à ions (fig. 5). Ces ions peuvent être véritablement visualisés grâce à une irradiation LASER résonnante : les ions absorbent les photons du LASER, et deviennent alors lumineux puisqu'ils réémettent dans toutes les directions de l'espace des photons de fluorescence. Grâce à la forte intensité du faisceau LASER, un seul ion peut absorber puis réémettre des dizaines de millions de photons par seconde ; et il y a assez de photons réémis pour impressionner l'œil ou une plaque photo. C'est ainsi qu'une équipe de l'Université de Heidelberg a pu fixer sur la plaque photographique « l'image » d'un seul ion : petit point lumineux au centre du piège. Cette expérience illustre à la fois les possibilités offertes par les LASER et

## D'OU VIENT LA DIRECTIVITE DES FAISCEAUX LASER ?

Les LASER les plus simples dans leur principe sont les LASER à gaz puisque l'émission de lumière se produit dans un gaz rarefié par une décharge électrique, exactement comme dans les tubes fluorescents utilisés pour l'éclairage ou pour les enseignes lumineuses. Il faut seulement que le tube fluorescent, rectiligne, soit terminé à ses deux extrémités par des fenêtres de bonne qualité optique ; et on le place, conformément au schéma, entre deux miroirs qui sont perpendiculaires à l'axe du tube.

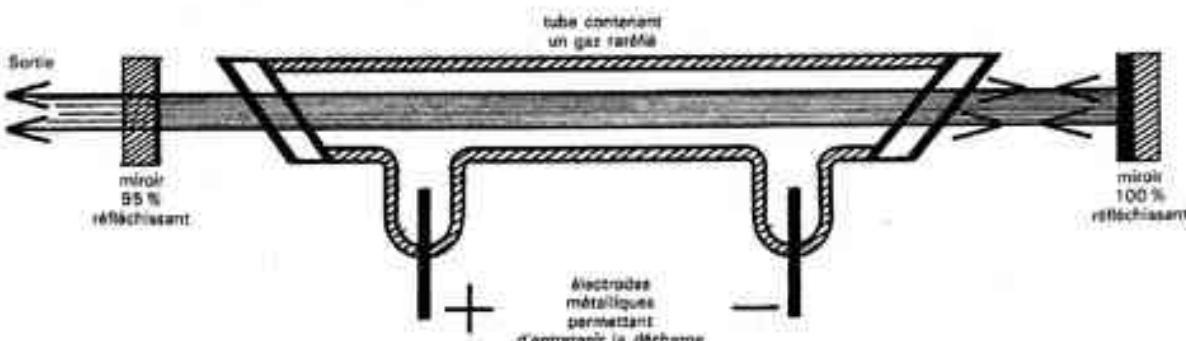
Dans ces conditions, la lumière émise dans la direction de l'axe du tube fluorescent est renvoyée à l'intérieur du tube et le traverse à nouveau en sens opposé, jusqu'à rencontrer l'autre miroir qui la renvoie à nouveau à l'intérieur du tube, etc... La superposition d'un grand nombre de faisceaux lumineux, allers et retours, produit à l'intérieur du tube une onde lumineuse de très forte intensité

qui favorise le phénomène d'émission induite dans la direction de l'axe du tube.

Ce phénomène d'émission induite (ou stimulée) a été découvert par Einstein en 1917. Lorsque les atomes ont été portés par la décharge électrique dans un état d'énergie élevée, ils peuvent revenir à un état d'énergie inférieure en rendant l'énergie excédentaire sous forme d'un photon dont l'énergie  $h\nu$  est ainsi bien déterminée (voir figure). Mais cette émission d'énergie lumineuse peut se faire de deux manières différentes :

- elle peut se produire spontanément après un certain temps aléatoire (mais toujours assez court) et le photon correspondant est envoyé au hasard dans n'importe quelle direction de l'espace ;
- elle peut être provoquée ou induite par une onde lumineuse préexistante si celle-ci a exactement la même fréquence  $\nu$  ; et le nouveau photon induit est alors envoyé dans la même direction que l'onde qui a provoqué son émission : c'est-à-dire que le photon induit (ou stimulé) vient renforcer l'onde lumineuse préexistante.

Pour que le LASER fonctionne, il faut que le deuxième phénomène d'émission induite l'emporte nettement sur le premier phénomène d'émission spontanée. Les deux miroirs indiqués sur le schéma facilitent la chose mais ne suffisent pas : il faut aussi que les conditions d'excitation des atomes dans la décharge répondent à des exigences bien précises (et produisent « l'inversion des populations » des deux niveaux d'énergie concernés). Si ces conditions sont réunies, le plus grand nombre des photons est produit par émission induite dans la direction de l'axe du tube, perpendiculairement aux miroirs. Un des deux miroirs n'est que partiellement réfléchissant, et permet ainsi la sortie du faisceau lumineux.



l'énergie électrostatique de liaison des électrons (comme dans un atome), mais aussi par l'énergie de vibration et de rotation des noyaux qui composent la molécule. Une transition entre deux états électroniques est donc remplacée par un très grand nombre de transitions voisines entre différents états de vibration-rotation ; et on montre que la somme des probabilités de toutes ces transitions voisines a le même ordre de grandeur que la probabilité d'une seule transition atomique. Les transitions moléculaires ont ainsi des probabilités beaucoup plus faibles que les transitions atomiques ; mais la forte intensité des faisceaux LASER permet de compenser aisément ce handicap.

L'utilisation des LASER a, en outre, le grand intérêt de permettre l'excitation d'une molécule dans un état de rotation-vibration particulier ; ce qui permet ensuite d'étudier l'évolution de cette molécule vers d'autres états de rotation-vibration, dans ce qu'on appelle les phénomènes de relaxation rotationnelle ou vibrationnelle.

Ce type d'étude a été développé, en particulier, dans le Laboratoire de photophysique moléculaire d'Orsay et dans le Laboratoire de spectroscopie moléculaire de l'Université Paris VI. Il faut s'attendre, dans les prochaines années, à une forte contribution de la spectroscopie LASER à la photochimie.

### La diffusion Raman cohérente

On sait qu'une autre technique fort utilisée pour l'étude des molécules est celle de la diffusion Raman, parce que le changement de longueur d'onde observée dans ce processus de diffusion de lumière nous renseigne sur les propriétés de la molécule diffusante. La figure 6 rappelle le principe du processus Raman : on appelle  $E_1$  et  $E_2$  les énergies de deux états de rotation-vibration d'une molécule ; lorsqu'on irradie cette molécule avec une source lumineuse très intense à la fréquence  $\nu$  quelconque, on obser-

ve l'émission de lumière aux nouvelles fréquences  $\nu_R$  telles que  $h\nu_R = h\nu + (E_2 - E_1)$

Les transitions Raman sont en fait des transitions à deux photons dans lesquelles la molécule simultanément absorbe un photon  $h\nu$  de l'onde incidente et réemet spontanément un photon  $h\nu_R$ . En fait, ces processus de diffusion Raman ont des probabilités très faibles de se produire et l'intensité lumineuse observée aux nouvelles fréquences  $\nu_R$  ne présente qu'une fraction extrêmement faible de l'intensité lumineuse incidente. C'est pourquoi les LASER ont grandement facilité l'observation de la diffusion Raman.

Lorsque l'intensité LASER est extrêmement forte et dépasse un certain seuil, il se produit un phénomène nouveau qui augmente considérablement l'importance de la diffusion Raman : l'onde Raman formée, à la fréquence  $\nu_R$ , atteint un niveau suffisant pour provoquer l'émission induite d'autres photons  $h\nu_R$  comme à l'intérieur d'un LASER (cf. le premier encadré). C'est-à-dire que dans le processus à deux photons représenté sur la figure 6a, l'émission du photon  $h\nu_R$  n'est plus spontanée maintenant, mais stimulée par une onde. Cette émission Raman stimulée a tous les caractères d'une émission LASER, intensité et directivité, et elle peut être utilisée pour produire certaines longueurs d'onde infrarouge difficiles à produire d'une autre manière.

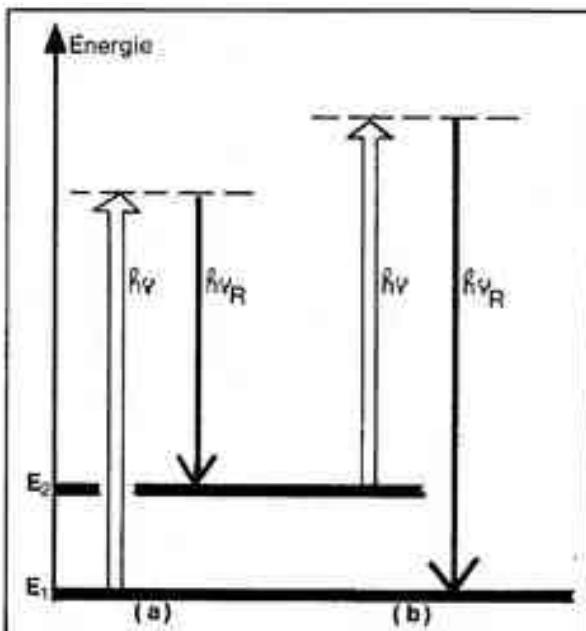


Fig. 6 - Diagramme énergétique de la diffusion Raman.  
 a) diffusion Stokes : la molécule effectue la transition du niveau inférieur  $E_1$  vers le niveau supérieur  $E_2$  ; et la fréquence Raman  $\nu_R$  est inférieure à la fréquence  $\nu$  du faisceau lumineux incident.  
 b) diffusion Anti-Stokes : la molécule effectue la transition inverse ; et la fréquence Raman  $\nu_R$  est supérieure à la fréquence  $\nu$  du faisceau incident.

Malheureusement cette émission Raman stimulée ne peut guère être utilisée pour des mesures spectroscopiques, parce que le seuil au-delà duquel elle se produit correspond à des irradiations trop intenses, où beaucoup d'autres phénomènes parasites se produisent et perturbent les molécules. Pour les besoins de la spectroscopie, on utilise d'autres processus multiphotoniques dérivés du processus Raman qui ont l'air plus complexes, mais qui sont en fait plus faciles à contrôler.

Nous présentons pour terminer le processus qui est le plus utilisé et qui est appelé « Diffusion Raman Anti-Stokes Cohérente », plus connu sous les initiales CARS (Coherent Anti-Stokes Raman Scattering). Ce processus est produit à l'aide de deux LASER, à deux fréquences distinctes  $\nu_a$  et  $\nu_b$ , et est schématisé sur la figure 7. Sous la stimulation des deux ondes LASER, la molécule absorbe l'énergie  $2h\nu$  de deux photons du premier LASER, et simultanément réemet la même énergie sous forme d'un photon  $h\nu_a$  rendu à la deuxième onde LASER, et d'un photon complémentaire :

$$h\nu_R = 2h\nu_a - h\nu_b$$

Ce processus à quatre photons produit une nouvelle onde de fréquence  $\nu_R$  dont la direction est rigoureusement déterminée. Au cours de ce processus, la molécule ne change pas d'énergie : la conservation de l'énergie est donc toujours assurée par l'échange des pho-

tons et elle autorise le processus à se produire pour n'importe quelles valeurs des fréquences  $\nu_a$  et  $\nu_b$ , sans relation avec les niveaux d'énergie de la molécule. Cependant la probabilité de ce processus est très fortement augmentée lorsque l'écart des deux photons LASER  $h(\nu_a - \nu_b)$  est très voisin d'un écart d'énergie  $E_2 - E_1$  interne à la molécule (fig. 7). On observe donc un renforcement considérable de l'onde émise à la fréquence  $\nu_R$  lorsque :

$$h(\nu_a - \nu_b) = E_2 - E_1$$

On fait varier continûment la fréquence  $\nu_a$  et on mesure l'écart d'énergie  $(E_2 - E_1)$  en notant la valeur de  $\nu_b$  qui donne le maximum d'intensité de l'onde  $\nu_R$ . L'un des intérêts du processus CARS est qu'il se produit à l'intersection de deux faisceaux LASER très fins, c'est-à-dire dans un petit volume parfaitement localisé. En déplaçant ce point d'intersection à l'intérieur d'un milieu où se produit une réaction chimique (flamme par exemple), on peut contrôler en chaque point la densité des molécules et leur température. Cette technique a été mise au point à l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA) à Chatillon-sous-Bagnoles.

**A** la fin de ce tour d'horizon, nous espérons que le lecteur sera bien convaincu de la variété des voies nouvelles qui se sont ouvertes en spectroscopie grâce aux

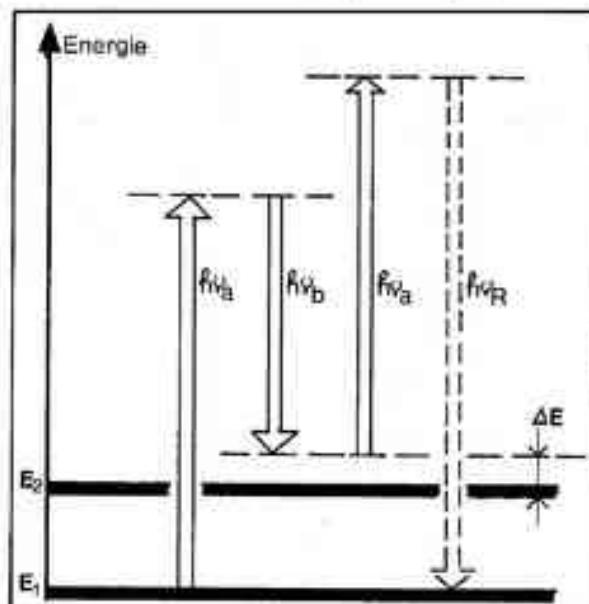


Fig. 7 - Diagramme énergétique de la diffusion Raman Anti-Stokes Cohérente (CARS). Dans ce processus à quatre photons (deux absorbés  $h\nu_a$  et deux émis  $h\nu_b$  et  $h\nu_R$ ) l'énergie de la molécule n'est pas modifiée. Cependant la molécule est mise en jeu (ce processus ne pourrait pas se produire dans le vide) ; et l'intensité de l'onde produite à la fréquence  $\nu_R$  augmente considérablement lorsque l'écart d'énergie  $\Delta E$  diminue et tend vers zéro.

## LES LASER ACCORDABLES A COLORANTS

On a rappelé dans le premier encadré le principe de fonctionnement des LASER à gaz : dans ce cas les atomes ou molécules simples, qui sont excités par la décharge, ne peuvent émettre des photons qu'à certaines longueurs d'onde, assez précise, correspondant à la différence de deux niveaux d'énergie (voir figure 1) ; et il est impossible de faire varier la longueur d'onde de manière continue sur une large gamme.

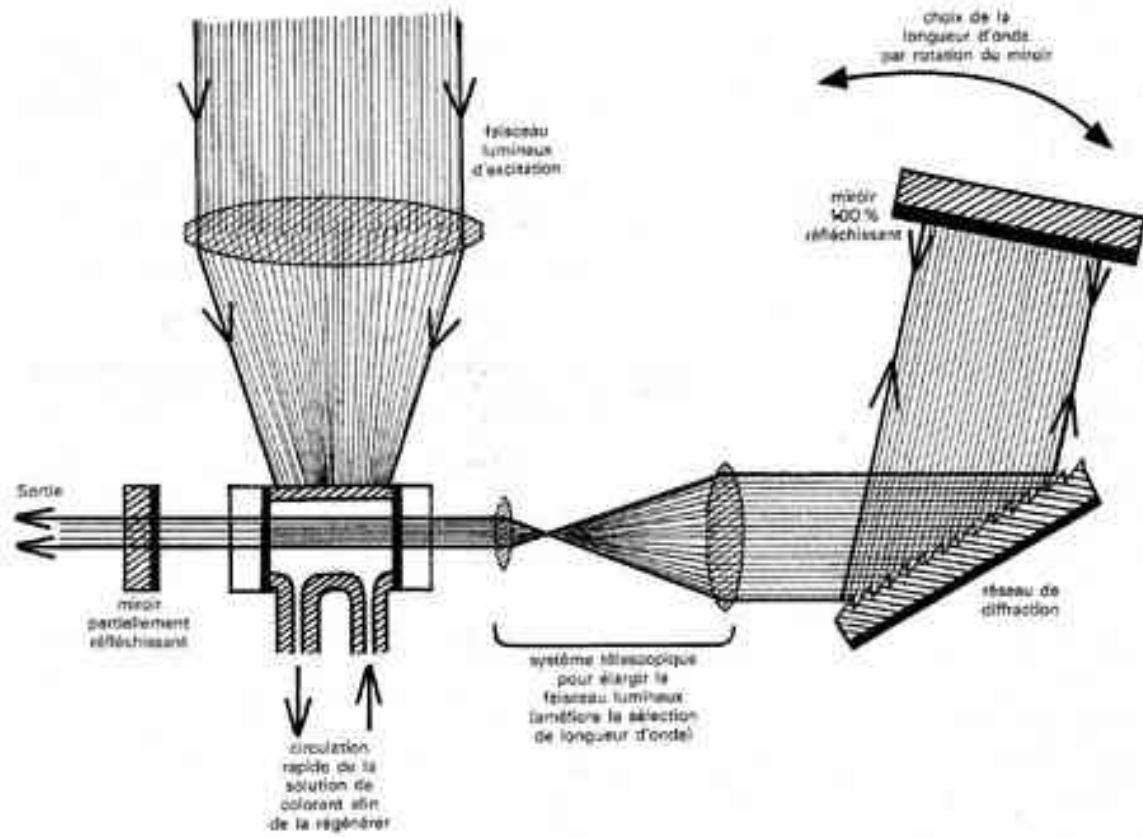
On obtient cette possibilité d'accord continu en remplaçant les atomes ou molécules simples par des molécules plus grosses, de structures assez complexes, analogues à celles qui sont utilisées pour fabriquer les colorants chimiques. Mais ces molécules sont fragiles et

seraient généralement détruites par l'application d'une décharge électrique ; de plus les propriétés de ces molécules sont souvent liées à leur dissolution dans un solvant liquide (eau, alcool...) ; on excite donc ces molécules de colorants vers leurs niveaux d'énergie supérieurs en les irradiant avec une lumière très intense ; ce peut être celle d'une simple lampe flash, mais c'est encore mieux en utilisant un autre LASER (de longueur d'onde fixe) car on peut facilement concentrer toute son énergie dans le petit volume utile du colorant.

Les molécules de colorants excitées réémettent de la lumière dans une gamme continue de longueur d'onde (dont la largeur peut varier entre 100 et

300 Angströms). Il faut alors favoriser l'émission induite sur une seule longueur d'onde de cette gamme. C'est pourquoi on interpose entre les deux miroirs un système dispersif (prisme, réseau de diffraction, filtre de Lyot ou autre interféromètre) qui disperse les diverses longueurs d'onde dans des directions différentes et n'en renvoie donc qu'une seule dans l'axe du tube de colorant.

Ceci explique le schéma de LASER à colorant que l'on a choisi de représenter ici, et qui utilise comme élément dispersif un réseau de diffraction. En modifiant l'angle d'inclinaison du miroir par rapport au réseau, on change la longueur d'onde favorisée, sur laquelle se produit l'émission LASER.



LASER ; et, de fait, nous avons assisté, en moins de quinze ans, à un renouvellement complet de ce champ de recherche, qui est sans doute loin d'être terminé.

Rappelons que nous avons volontairement limité cette revue aux nouveaux phénomènes observables grâce à la forte intensité régnant dans les faisceaux LASER.

Mais une autre propriété très impor-

tante des LASER est la possibilité de contrôler leurs longueurs d'onde avec une marge d'incertitude mille fois plus petite que celle des sources lumineuses conventionnelles. Cette propriété conduit aussi à de nombreuses applications pour la spectroscopie de haute résolution. Nous manquons de place pour en parler ici, mais nous compléterons cette lacune dans un prochain numéro.

### STRATEGIE DE RECHERCHE PROPOSEE PAR LE CDST

Le sujet étant très vaste pour fournir une bibliographie standard, l'ensemble des références sera recherché à l'aide des descripteurs :  
**LASER ET (SPECTROMÉTRIE OU SPECTROSCOPIE) ET (EXCITATION SÉLECTIVE OU MULTIPHONIQUE OU SATURATION ABSORPTION OU SPECTROSCOPIE SANS EFFET DOPPLER OU SPECTROMÉTRIE SANS EFFET DOPPLER)**  
 Nombre de références approximatif : 650.

## Les fresques du désert de Gobi

Pour la première fois en Occident, la Chine envoie plus de 800 m<sup>2</sup> de relevés des magnifiques fresques murales de Dunhang. Ces relevés, réalisés par des spécialistes de l'Institut de recherche chinois installés à Dunhang depuis plus de trente ans, sont grandeur nature et en couleurs.

**S**ituée à l'extrême ouest de la Grande Muraille, à l'ouest du fleuve jaune, Dunhang fut l'une des quatre commanderies instituées par l'empereur Wudi de la dynastie des Han (140-87 avant J.C.). Sa situation géographique est très importante. Porte occidentale de la Chine, elle est aussi un lieu de passage unique sur le plan stratégique et commercial vers les trois autres routes qui longent le désert en direction des pays d'Occident. Cette situation a fait de Dunhang un site cosmopolite, véritable réceptacle où se brassèrent les idées venues de l'ouest avant leur pénétration en Chine.

Il existe dans la région de Dunhang plusieurs sites rupestres : Mogao Ku, Xiqianfo Dong, Yulin Ku, Shuixia Ku. Ce sont des ensembles de grottes, creusées par l'homme qui sont ornées de peintures et de sculptures bouddhiques. Le plus célèbre site est celui de Mogao Ku, appelé aussi « grotte des Mille Bouddhas ». Situées à vingt kilomètres de la ville actuelle de Dunhang, ces grottes sont taillées dans la falaise de Mingsha, « sable chantant », face au Mont Sanwei, « trois périls ». Au pied des grottes serpente une rivière saisonnière nommée Dachuan, « grande

source », qui arrose une petite oasis verdoyante et luxuriante. Vue du haut de la falaise, elle ressemble à une algue perdue au milieu d'un océan de sable. C'est là que, du quatrième au quatorzième siècles, vécurent les moines artistes et artisans, pour orner les nombreuses grottes superposées qu'ils creusèrent dans la falaise, longue de 1 600 mètres.

A son apogée, sous la dynastie des Tang, Dunhang comptait plus de mille grottes ornées, mais au cours des siècles, les intempéries et le vandalisme ont provoqué de nombreuses dégradations. Aujourd'hui, il ne reste que 496 grottes dont un grand nombre sont en bon état de conservation. Elles comprennent 45 000 mètres carrés de peintures murales, plus de deux mille statues polychromes, ainsi que cinq constructions de bois des époques Tang et Song. Si l'on alignait les peintures murales bout à bout, elles constitueraient une galerie de vingt-cinq kilomètres de long.

Réalisées sur une période de mille ans, elles montrent les différentes étapes d'une longue évolution des conceptions esthétiques et de l'idéologie dans le temps que l'on peut diviser en trois périodes.

### La première période

**D**urant la première période, qui s'étend de 396 à 581, Dunhang fut dominée successivement par les Liang du Nord, les Wei du Nord, les Wei de l'Ouest et les Zhou du Nord : dynasties constituées par des ethnies non Han, avant la réunification de la Chine par les Sui.

L'art des grottes de Dunhang de cette période correspond à la phase d'élaboration de l'art bouddhique en Chine. Les sujets représentés sont les histoires bouddhiques, la mythologie traditionnelle chinoise, les portraits des donateurs et des motifs décoratifs.

### CHRONOLOGIE DES PEINTURES MURALES DE DUNHANG

	Dates	Dynasties
Première Période	396 - 439 439 - 534 535 - 566 567 - 581	Liang du Nord Wei du Nord Wei de l'Ouest Zhou du Nord
Seconde Période	581 - 618 618 - 907	Sui Tang
Dernière Période	907 - 960 960 - 1 038 1 038 - 1 227 1 227 - 1 368	Cinq Dynasties Song Xia de l'Ouest Yuan

□ En collaboration avec le Ministère du Patrimoine Chinois et l'Institut de Dunhang, un chercheur du CNRS (LA 184) Pierre Colombe et Rinnie Tang du Muséum national d'histoire naturelle présentent une exposition sur la Chine : Les fresques du désert de Gobi, du 19 février au 17 août 1983, au Muséum national d'histoire naturelle, jardin des plantes, salle d'exposition de la galerie de zoologie, 36, rue Geoffroy Saint-Hilaire, 75005 Paris. Ouvert tous les jours sauf le mardi de 10 à 17 h 30.

Le thème principal dans les peintures de cette époque est centré sur les extraits du *Jakata* relatant les Vies antérieures de Bouddha. Celui-ci en effet, avant d'atteindre le stade de Bouddha, vécut 547 vies, dans un corps d'homme ou d'animal.

Pour illustrer ces histoires, les peintres ont utilisé une composition en bande continue dont le sens de lecture est variable. Les plus anciennes ne comprennent que quelques scènes ; par la suite, elles deviennent de plus en plus complexes, atteignant, dans la plus longue, jusqu'à 86 scènes successives. Le sacrifice du prince pour sauver une tigresse affamée, l'histoire du roi des cerfs sauvant un noyé, les cinq cents bandits convertis au Bouddhisme, ...

Les thèmes mythologiques de la Chine traditionnelle montrent les personnages du Roi père d'Orient, de la Reine mère d'Occident et du couple « Fuxi et Nuwa ». Ils apparaissent dans les compositions à côté d'éléments bouddhiques, d'origine indienne, tels que la Perle Muni, le Roi Asura...

Ces fresques reflètent l'influence de l'art gréco-bouddhique dans l'art chinois où dominent les éléments de symbolisme taoïste. Variées dans leurs formes, elles témoignent d'une imagination riche, d'un style dynamique, et inaugurent un art bouddhique propre à la culture chinoise.

#### *La seconde période*

**A**cette époque l'art de Dunhuang atteint son apogée. Son style, à la fois réaliste et poétique, témoigne de l'imagination des artistes. Les compositions grandioses, réalisées dans une gamme de couleurs très riche, reflètent une Chine prospère.

Les principaux sujets traités sont tirés de divers canons bouddhiques : les Sutras. Plusieurs grandes peintures, représentant les paradis bouddhiques, sont des œuvres d'une somptuosité et d'une imagination débordante. L'art bouddhique ne prêche plus ni l'austérité, ni l'endurance, mais exalte le bonheur qui règne dans le paradis bouddhique auquel les fidèles sont sensés avoir accès, à l'expiration de leur vie. Les représentations de musiciennes et de danseuses, ainsi que l'architecture du paradis, s'inspirent des fastes de la cour.

A côté des scènes bouddhiques, les sujets historiques et la vie quotidienne sont également représentés : envoyés impériaux, défilés militaires, caravanes, groupes de minorités ethniques et personnages de différentes classes sociales de l'époque.



Les Devas, grotte 272. Dynastie des Liang du Nord (397-439). Les Devas sont des divinités faisant partie du Panthéon bouddhique. Ils occupent un rang élevé, immédiatement après les Bouddhas et les Bodhisattvas. En écoutant l'enseignement du Bouddha, les Devas ont le cœur rempli de joie. Leurs gestes expriment, ici, le bonheur qui les comble en entendant le Loi Bouddhique. (Photo P. Colombe).



L'empereur Wu, des Han, grotte 323, Dynastie des Tang (618-907). L'empereur Wu (140-87 av. J.C.) de la dynastie des Han, donne sa bénédiction à l'ambassadeur Zhang Qian, qui part dans les contrées occidentales. Ce voyage est à l'origine de l'ouverture de la Route de la Soie. (Photo P. Colombe).

### *La dernière période*

**A**cette époque, la Route de la Soie est progressivement délaissée en raison du développement de la voie maritime et Dunhuang perd son importance séculaire de centre d'échange commercial et culturel entre la Chine et l'Occident. La création artistique subit, dans la cité, les conséquences de cette dégradation. Durant les cinq dynasties et le début de la dynastie des Song, les gouverneurs de la famille des Zhao créent une Académie de peinture dans la région. De nombreux artistes sont appelés pour décorer de nouvelles grottes.

Ces « artistes-fonctionnaires » ont, malgré leur habileté, un style académique conventionnel. Il y a recrudescence de portraits de donateurs, portant témoignage des diverses populations qui vivaient dans la région.

Les dernières peintures, datant du XIV<sup>e</sup> siècle, sont d'inspiration laïque. La dynastie des Yuan, fondée par les Mongols venant de steppes, a inspiré aux artistes chinois, un retour à la sobriété. Les peintures de Dunhuang de cette époque sont moins colorées et certaines compositions sont entièrement basées sur la maîtrise du dessin, telle l'image du Bodhisattva Kuanyin à mille bras.

A la fin du XIV<sup>e</sup> siècle, la région est délaissée par la nouvelle dynastie au pouvoir : les Ming.

### *Technique de la peinture murale à Dunhuang*

**A**Dunhuang, les peintures murales ornent toute la surface intérieure des grottes creusées par l'homme, au cours des siècles, au flanc d'une falaise alluviale très friable, composée de lits de galets et de poches de sable. Depuis mille ans, le front de la falaise, subissant une érosion mécanique, particulièrement intense en zone aride, a reculé de plusieurs mètres, entraînant la destruction partielle ou totale de nombreuses grottes. En effet, si l'on compte aujourd'hui 496 grottes ornées, en bon état de conservation, plus d'un millier étaient dénombrées sous la dynastie des Tang (618-907).

Avant d'exécuter les peintures murales, les parois ont été entièrement recouvertes de mortier. Celui-ci est un mélange d'eau, d'argile, de boue de rivière et de matières végétales ou animales - paille hachée, poils d'animaux, fumier - destiné à les renforcer (on retrouve la même technique dans les cités rupestres en Inde et en Asie Cen-

trale, là où des conditions analogues ont exigé un même processus de fabrication). Le mortier est appliqué à la truelle sur la surface à peindre, en plusieurs couches superposées. La première couche, fortement appliquée sur la paroi, assure l'adhérence et la cohésion de l'ensemble et donne de l'épaisseur au support. La surface est gardée crépue pour recevoir la deuxième couche. Celle-ci est un enduit plus mince dont on lisse la surface avec un tampon humide, lorsqu'il est sec à 80 %.

La dernière couche, passée à la brosse, est un mélange de kaolin, de craie pulvérisée et de colle animale, donnant de l'élasticité au support, évitant ainsi les craquelures de surface provoquées par le séchage. En outre, cet apprêt forme une pellicule isolante qui protège les couleurs de la détérioration causée par le salpêtre qui, par capillarité, remonte à la surface du mortier. A l'époque des Wei (439-556), les peintres ajoutèrent à ce dernier enduit, un peu d'oxyde de fer pour obtenir une teinte de fond rouge.

Avant d'être peintes, les figures sont généralement esquissées au charbon de bois ou tracées au stylet, puis reprises à l'ocre rouge ou à l'encre de Chine. Parfois, la technique des feuilles perforées, employée chez nous pour la fresque, a été utilisée.

Les colorants utilisés, en majorité d'origine minérale, parfois végétale ou animale, sont :

- le blanc : provenant du blanc de plomb (ou blanc de céruse) ; il est souvent employé en couche de fond. On peut aussi observer un blanc sacré très fin, obtenu par broyage de la nacre de coquillages d'eau douce.
- le bleu : dérivant de l'indigo et de l'azurite (carbonate de cuivre).
- le rouge : qui présente, selon la matière colorante utilisée, plusieurs nuances : rouge-orangé s'il provient du litharge (protoxyde de plomb), rouge vermillon, s'il provient du cinabre (sul-

fure de mercure). Le carthame (plante cultivée comme colorant) et les terres colorées offrent également une gamme variée de rouges.

- le jaune : vif s'il provient de l'orpiment (sulfure naturel d'arsenic) ; la gomme-gutte et les terres donnent différentes nuances de jaunes.

- le vert est donné par la malachite (carbonate basique naturel de cuivre).

- le noir est de l'encre de Chine, fabriquée à partir de la suie recueillie après calcination de certains bois, os d'animaux... ; elle est utilisée pour le dessin des contours définitifs des figures et pour les textes inscrits dans des cartouches, véritables légendes explicitant les scènes représentées.

Dans l'ensemble, les couleurs ont gardé leur fraîcheur et leur vivacité d'origine, à l'exception toutefois de certains rouges décolorés par la lumière. Le blanc de plomb, utilisé comme sous-couche, surtout à l'époque des Wei, pour donner plus de profondeur aux rouges et aux roses (chair des personnages) a provoqué l'oxydation de ces couleurs dont certaines ont pris une teinte presque noire. Pour la même raison, le blanc de plomb a élargi et accentué, par rapport au tracé original, les traits ocrés destinés à souligner le relief des visages et la musculature des corps. Les couleurs, finement broyées, préparées à l'eau et à la colle animale ou à la résine, sont appliquées avec des pinceaux en poils d'animaux.

Ces peintures murales sont l'œuvre de générations d'artistes, moines et laïcs, qui se sont succédées, dix siècles durant, dans le monastère rupestre des Mille Bouddhas. Leur exécution, considérée comme un acte de dévotion, était précédée d'un certain nombre d'exercices de piété qui étaient prescrits et d'une préparation spirituelle.

*Extraits du catalogue « Chine, fresques du désert de Gobi ».*

#### • Chine, fresques du désert de Gobi, Editions du CNRS.

Le catalogue de l'exposition, édité par le CNRS, est en vente :

- au Muséum national d'histoire naturelle, salle d'exposition de la galerie de zoologie - 36, rue Geoffroy-Saint-Hilaire, 75005 Paris. Prix : 80 F ;
- par correspondance au prix de 98,85 F pour la France et 120,75 F pour l'étranger. Les chèques sont à libeller à l'ordre de « Exposition Chine », Muséum national d'histoire naturelle - 36, rue Geoffroy-Saint-Hilaire - 75005 Paris.

• Mardi 17 mai, visite réservée aux membres du CNRS. Une visite commentée par les commissaires de l'exposition est proposée à tous les membres du CNRS, le mardi 17 mai à partir de 10 heures du matin.

## Les Editions du CNRS

Ces ouvrages sont disponibles chez votre libraire habilité ou à la librairie du CNRS,  
295, rue Saint Jacques - 75005 Paris - Tél. : 326.56.11.  
Ils peuvent être consultés tous les jours, sauf samedis et dimanches,  
de 9 h à 12 h et de 13 h 30 à 17 h 30.

### Sciences physiques pour l'ingénieur

Filtrage, modélisation et identification de système linéaire stochastique à temps discret. Gérard Favier. Techniques de filtrage, de réalisation et de commande au sens de Kalman : historique, évolution, liens entre différents algorithmes ; notamment deux familles d'algorithmes : à factorisation, rapide présentation des algorithmes proche de la programmation, nouveaux algorithmes. - 16 x 24 / 448 p. / broché / 24 F. / 54 tabl. - Prix : 90 F.

### Sciences de la terre, de l'océan, de l'atmosphère et de l'espace

Le Shati, lac pléistocène du Fezzan, Libye. Ce volume regroupe, sous la direction de N. Petit-Maire, les articles multidisciplinaires de G. Aumassip, L. Blanc-Vernet, P. Carbonel, G. Delibrias, J. Gaillard, C. Gaven, C. Hillaire-Marcel, M. Icole, N. Petit-Maire, J. Riser, J.C. Rosso, E. Schulz et L. Soulis, illustrés par J. Casanova et M. Decobert. Ces recherches de terrain et de laboratoire sont toutes centrées sur l'étude détaillée d'un vaste paléolac saharien.

Il est établi que, dans une région aujourd'hui hyper-aride située par 27°30' de latitude Nord, un lac d'environ 2 000 km<sup>2</sup> a existé au Pléistocène. Il était alimenté par l'aquifère du Continental intercalaire, dont le niveau variait dans le temps, mais aussi par le ruissellement. Sa profondeur était de l'ordre d'une cinquantaine de mètres, avec des oscillations de six à quinze mètres. Il était peuplé d'une faune très dense de Mollusques (*Cerastoderma*



Dépôts de rivage à Mollusques du grand lac pléistocène moyen. (Le Shati, lac pléistocène du Fezzan, Libye).

*glaucum*, *Melania tuberculata*, *Hydrobia* sp.), d'Ostracodes (*Cyprideis W.S.*) et de Foraminifères (*Ammonia beccarii*, *Protelphidium parallum*, *Criboelphidium articulatum* et *C. guntheri*, *Rossalina globularis*, *Lamellodiscorbis* et *Vahvulinaria*) qui pose le problème de l'introduction d'espèces d'origine marine à environ 800 km de la côte la plus proche. La flore lacustre est représentée par une Charophyte (*Lamprothamnium* sp.). La salinité des eaux, estimée d'après les données écologiques et les valeurs isotopes stables du carbone et de l'oxygène, était variable mais toujours dans la gamme des eaux saumâtres (3 à 10 ‰), leur température devait avoisiner 20°C. Vingt-deux datations isotopiques Th/U, effectuées sur les coquilles des Mollusques lacustres, s'étaient sur environ 70 000 ans autour d'un pic très net à 130 000 B.P. La grande majorité des dates se situe avant l'optimum climatique de 125 000 B.P. (Eémien), lors de la transition entre les stades isotopiques 6 et 5e du 110 océanique. Quelques dates traduisent l'existence d'épisodes humides mineurs, un peu plus récents (figure). Les

industries préhistoriques sont représentées, sur les bordures lacustres, par un Acheuléen tardif à grands bifaces et par un ensemble à petits bifaces (ca. 7 cm de long) peut être légèrement postérieur ; ces données archéologiques appuient les résultats des datations isotopiques. Par ailleurs, un Levalloiso-Moustérien caractéristique a été trouvé en place dans des dépôts à coquilles d'eau douce (*M. tuberculata*, *Lymnaea natalensis*, *Corbicula africana*, *Caelatura lacolint*, *Bulinus truncatus*) localisés, à l'Est du grand lac saumâtre à cardiums, dans de petites dépressions indépendantes, proches du débouché d'oueds importants ; celles-ci ont probablement été inondées à des périodes du Pléistocène supérieur postérieures au grand épisode lacustre.

Ces recherches constituent un apport nouveau à la connaissance du Sahara central, tant du point de vue spatial que temporel : elles constituent en effet la première donnée datée isotopiquement sur la paléoclimatologie de ce désert au Pléistocène moyen. 21 x 29,7 / 128 p. / 9 tabl. / 26 fig. / 20 pl. / broché - Prix : 98 F.

Faune de Madagascar. 59/1. Crustacés amphipodes gammuriens, familles des acanthonotozomatidae à gammariidae, Michel Ledoyer. Premier outil d'étude de cette faune, description de 9 formes et 195 espèces dont 46 considérées comme nouvelles, regroupement, illustrations, clés et caractères de comparaison avec les espèces proches, signification écologique. 19 x 27 / 608 p. / broché / 15 tabl. / 226 pl. fig. - Prix : 350 F.

Rappel : Faune de Madagascar 54 - Prix : 125 F.

Arctica 1978 - Colloque international CNRS / n° 585 - VII<sup>e</sup> congrès international des bibliothèques nordiques - Septembre 1978 - dir. : Jean Malaurie. L'Arctique sous ses différents aspects : sciences de l'homme, de la vie, de la terre (notamment anthropologie, géographie, histoire de l'exploration), sciences de l'information (automatisation des bibliothèques, création de réseaux, éditions de catalogues, bibliographies, film, musées). (86 communications dont 43 en anglais). 21 x 29,7 / 584 p. / broché / 6 fig. / 1 cart. / 2 tabl. dépliants h.t. - Prix : 430 F.

Aménagement et pratiques urbaines. Rêves et réalités de la ville moyenne. Ouvrage collectif. Le mythe et la réalité dans la politique d'aménagement des villes moyennes ? Les pratiques et le vécu des habitants et le discours mythique de lieu où il fait bon vivre ? 21 x 29,7 / 172 p. / broché / 18 fig. / 28 tabl. / 11 cart. - Prix : 90 F.

Cahiers de l'observation du changement social - volume XIV (Alsace). Erstein : G. Herberich, C. Lemoine, C. Regnier, U. Salci - La Canardière (Strasbourg) : J.B. Marie. Erstein : forte population ouvrière, monde agricole encore présent, mouvements migratoires récents et importants dans une cité longtemps à l'écart du développement : modifications ? (structures démographiques, mobilités professionnelles et sociales, modes de vie, appareil scolaire...). - La Canardière (Strasbourg) : grand ensemble ayant déjà une histoire (réalisé entre 1957-1964) : connaissance possible des éléments de structuration développés et disparus (à travers : jeunes, vie associative, groupements religieux). 16 x 24 / 336 p. / broché / 1 fig. / 21 tabl. / 1 cart. - Prix : 60 F.



Arctica 1978.

Cahiers de l'observation du changement social - Volume XVI (Lyon). Valbenoîte (Sainte Etienne) : André Vant, Croix Luizet (Villeurbanne) : Bernard Meuret, Croix Rousse (Lyon) : Bernard Bensoussan. Valbenoîte : du quartier éclaté au quartier investi : conduites sociales (passage du quartier passagier en quartier usinier puis éclaté), clivages idéologiques et sociaux, rôle des formes d'encadrement, des centres sociaux dans la recherche d'une identité par les couches sociales moyennes.

Croix Luizet : sociographie des réseaux sociaux : articulations réseaux-associations, leur géographie évolutive, essai d'explication du système social local.

Croix Rousse : comment un espace local devient-il ou redevient-il un quartier ? Recours, enjeux pour le constituer ? 16 x 24 / 232 p. / broché / 3 fig. / 4 tabl. / 2 cart. - Prix : 35 F.

Cahiers de l'observation du changement social - Volume XVII (équipe du Nord), responsable : F. Stankiewicz. Economie informelle (travail noir, activités domestiques et ensemble des autres activités communautaires) : hétérogénéité, fonctionnement et pertinence de cette notion, approche économique : cas des chômeurs, approche juridique : travail noir, approche sociologique : évolution du système des échanges pour une collectivité villageoise (Erve-linghem - Lille). 16 x 24 / 276 p. / broché / 26 tabl. - Prix : 50 F.

Cahiers de l'observation du changement social - Volume XVIII (équipe de Paris), Pierre-Michel Menger, Dominique Pasquier. Culture et sociabilité dans une ville moyenne : cercles et réseaux (mondains, militants, philanthropiques, politiques), marché de l'art local (incidence de la sociabilité sur la pratique et la consommation picturale), transformations contemporaines

de la vie musicale. 16 x 24 / 158 p. / broché / 1 tabl. - Prix : 30 F.

Atlas linguistique et ethnographique du Languedoc occidental / volume II : Xavier Ravier. Parlers occitans centraux : les plus représentatifs du protosystème et de diasystème du gallo-romain méridional, lexiques : monde animal, agricole (attelages, véhicules). 34,5 x 51 / 320 p. / relié / 305 cart. / 3 pl. fig. - Prix : 690 F.

Rappel : *Atlas linguistique et ethnographique de Languedoc occidental/vol. I* - prix : 530 F.

La genèse du texte : les modèles linguistiques. Préface : Antoine Culioli. Les avant-textes littéraires : un nouveau champ de recherche, confrontation des problèmes de genèse textuelle avec une méthodologie linguistique, étude linguistique de brouillons empruntés aux avant-textes de trois écrivains : H. Heine, M. Proust, Lautréamont. 16 x 24 / 176 p. / broché / 11 tabl. / 4 fac-sim. - Prix : 85 F.

Annuaire de l'Afrique du nord - Tome XIX/1980. Ouvrage collectif. Etudes : politique de l'emploi-formation au Maghreb (1970-1980), questions d'actualité : événements de Gafsa, revendications culturelles berbères en Algérie, actualités culturelles et scientifiques : cinéma et télévision algériens, tourisme, œuvre de Jean Poncet, colloques et réunions scientifiques. 16 x 24 / 1404 p. / relié / 13 fig. / 245 tabl. - Prix : 480 F.

La politique de l'emploi-formation au Maghreb (1970-1980), Chantal Bernard. Restructuration de l'appareil productif, redistribution de la population active (le système productif utilise-t-il bien les compétences ?), pertinence des politiques par rapport à la logique du développement, conséquences des mutations opérées sur la mobilité sociale. 16 x 24 / 476 p. / broché / 12 fig. / 157 tabl. - Prix : 85 F.

Parents, habitants, citoyens. Meylan banlieue grenobloise, Alexis Ferrand. Approche quantitative : tendances et structure du peuplement, ségrégation socio-spatiale, comportements électoraux, transformations de la sociabilité et rôle contemporain des associations, l'habitant : solidarités de voisinage, garde et logement des enfants, rapports mère-fille. 17 x 24 / 224 p. / dos collé / 3 fig. / 18 tabl. / 1 cart. - Prix : 50 F.

Les variations journalières et hebdomadaires de l'activité intellectuelle de l'élève. Monographies françaises de psychologie/n° 59, François Testu. Quand faut-il apprendre et utiliser les

connaissances ?, analyses des variables propres à l'élève (âge, sexe, niveau scolaire), des variables d'environnement (nature de la tâche, répartition de l'enseignement). 16 x 24 / 124 p. / broché / 26 fig. / 37 tabl. - Prix : 65 F.

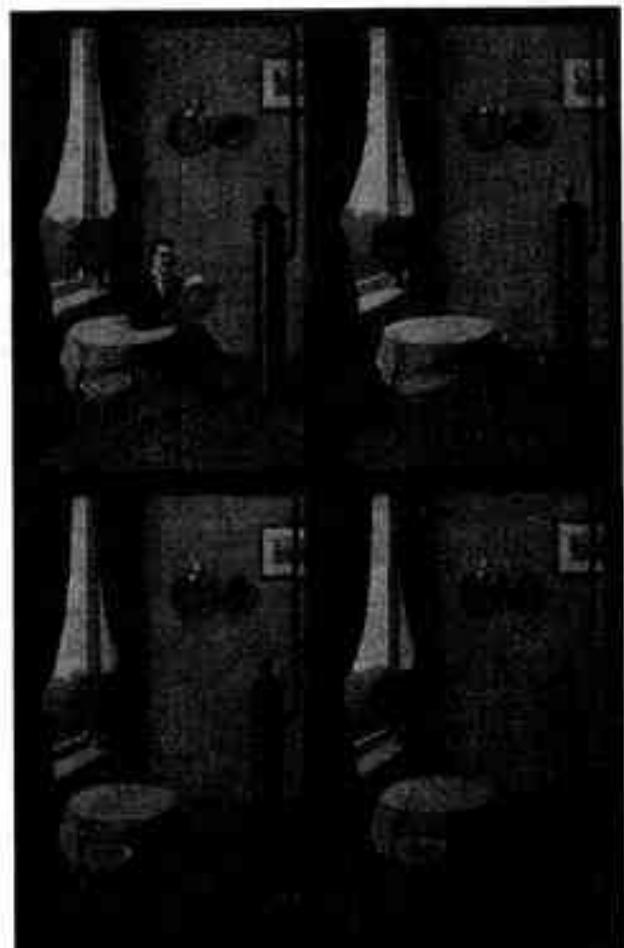
Gallia préhistoire, fouilles et monuments archéologiques en France métropolitaine - tome 25 - fasc. I/1982. Ouvrage collectif. Situation, configuration, historique des sites, inventaire et étude des vestiges (faune, flore, outils, gravures), descriptions, relevés, datations, bibliographies. 22 x 27,5 / 244 p. / broché / 85 fig. / 22 tabl. / 14 phot. / 3 cart. / 47 pl. fig. phot. - Prix : 245 F.

La presse face au surréalisme (1925 à 1938). Elyette Guiol-Benassaya. Originalité de la démarche : la réception du Surréalisme à travers la presse quotidienne de l'entre-deux guerres, double intérêt : compréhension du Surréalisme et rôle de la presse face à un mouvement d'avant-garde littéraire et artistique, rapports presse/surréalisme : le scandale, la récupération des valeurs marchandes et la vulgarisation des idées et de la morale. 16 x 24 / 272 p. /

broché / 7 fig. / 34 tabl. / 10 phot. - Prix : 105 F.

Crise agraire et conscience créole au Pérou. Jean Piel. La structure agraire définie dès fin 16ème (système latifundiste) explique l'ancienneté et la gravité de la crise, ses symptômes (fin 18ème-20ème) : banditisme rural, jacqueries indiennes, révoltes, grèves, ses effets dans la conscience de l'élite politique et intellectuelle créole : redécouverte du monde indien, politique indigéniste. 16 x 24 / 132 p. / broché / 5 fig. / 2 tabl. / 1 cart. / 4 pl. - Prix : 67 F.

Le coutumier bourguignon glosé - (fin du XIVème siècle). Michel Petitjean et Marie-Louise Marchand - dir. : Josette Metman. Édition critique du principal coutumier bourguignon antérieur à la rédaction officielle de la coutume, fondée sur deux manuscrits : Beaune B.M. n° 24, Paris B.N. n° 1230, gloses latines se référant au droit romain, éclairage nouveau sur la genèse des coutumes et l'enseignement du droit coutumier médiéval. 16 x 24 / 108 p. / relié / 4 pl. h.t. - Prix : 260 F.



René Magritte - *L'Homme au Journal* - 1927.

Oeuvres de Pinel. Edition et transcription par Monique Rollin et Jean-Michel Vaccaro ; (corpus des luthistes français). Germain Pinel, un des plus grands luthistes de la jeunesse de Louis XIV, maître de luth du roi-enfant, participation aux grands ballets de cour, son rôle de compositeur de la musique du roi, mise à jour de son œuvre inédite jusqu'ici ; la tablature en regard de la transcription interprétative met en lumière un important chapitre de l'évolution du langage musical. 24 x 31 / 44 p. de texte / broché / 201 p. de musique - Prix : 140 F.

Recherches sur le XVIII<sup>e</sup> siècle/Tome 5. Dir. : André Robinet, table ronde Juin 1981. Rencontre franco-italienne consacrée à la philosophie du XVII<sup>e</sup> siècle. Descartes, Leibniz, Perrault, Locke, Charron, G. de Cordemoy, Bacon, Böhme, Spinoza. (15 communications dont 2 en italien). 16 x 24 / 132 p. / broché - Prix : 60 F. Rappel : Recherches sur le XVIII<sup>e</sup> siècle/Tome 4 - Prix : 70 F.

Eugène Baudin (1843-1907) - Approche de l'école moderne de peinture lyonnaise (1863-1925). Colette et Etienne Bidon. La vie et l'œuvre d'Eugène Baudin (peintre-photographe) : avènement de l'école moderne de peinture lyonnaise, évocation permettant de revivre un combat esthétique encore très proche de nous, en fin d'ouvrage : notices sur les protagonistes, tableau replaçant écoles, artistes, événements en France et à Lyon. Co-édition : Editions du CNRS, Presses universitaires de Lyon. 15,5 x 22,5 / 272 p. / dos collé / 1 tabl. / 49 pl. phot. - Prix : 90 F.

Summa Aurea - Guillaume d'Auxerre, Liber secundus/Tomus II. Jean Ribailly. Recueil de questions composé par Guillaume d'Auxerre durant la 1<sup>re</sup> moitié du XIII<sup>e</sup> siècle, deux versions : la recension brève dite primitive et la recension longue (état définitif du texte), édition critique par Jean Ribailly du livre II, deuxième partie : du tractatus XII ou tractatus XXV, texte latin. Co-édition : Editions du CNRS - Collégio Bonaventura. 16 x 24 / 208 p. / broché - Prix : 319 F.

Rappel : Liber primus - Prix : 189 F. Liber secundus, tomus I - Prix : 321 F.

Censure et lumières dans l'Espagne de Charles III. Lucienne Domergue. Approche descriptive d'un système d'oppression à la fin de l'ancien régime (1756-1788) : la censure, son fonctionnement, l'idée que s'en faisaient gouvernements et auteurs, son évolution et

# E. Baudin

## Approche de l'Ecole moderne de peinture lyonnaise



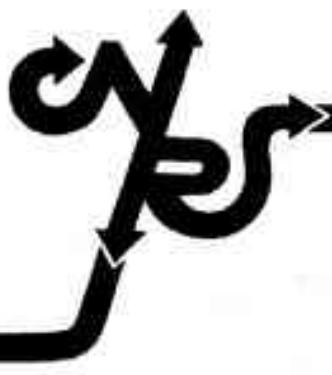
celle des sentiments du public. 16 x 24 / 228 p. / broché - Prix : 80 F.

La France de Philippe Auguste - Le temps des mutations. Colloque international CNRS/N° 604. Actes du colloque Paris septembre-octobre 1980 - dir. Robert-Henri Bautier. Philippe Auguste : personnalité, entourage, son image pour les contemporains, celle de son règne, son époque (le domaine royal devient la France) : institutions nouvelles, transformations de la société, des villes, des campagnes, de l'économie, du domaine artistique et culturel (naissance de l'université de Paris). 16 x 24 / 1036 p. / relié / 32 fig. / 6 tabl. / 11 cart. / 23 pl. h.t. phot. fig. - Prix : 450 F.

Les harpons magdaléniens. XVII<sup>e</sup> supplément à *Gallia préhistoire*, Michèle Julien. Étude synthétique d'une série d'instruments en bois de cervidé de la fin du Paléolithique supérieur, d'abord considérés dans une perspective fonctionnelle et technologique, les harpons sont ensuite replacés dans la séquence chronologique du magdalénien, à la lumière des nouvelles décou-

vertes et des moyens modernes de datation. (résumé anglais, allemand). 22 x 28 / 298 p. / broché / 121 fig. / 61 tabl. / 2 cart. / 8 pl. phot. h.t. - Prix : 235 F.





Les Editions du CNRS publient des ouvrages de très haut niveau en sciences exactes et naturelles ou en sciences humaines.

Si vous désirez recevoir régulièrement la documentation gratuite consacrée aux ouvrages que publient les Editions du CNRS, entourez d'un cercle le numéro de la ou des sections qui vous intéressent.

Il s'agit d'une inscription (ou de la modification d'une inscription (joindre l'étiquette du dernier envoi))

#### SCIENCES EXACTES ET NATURELLES

- 1 mathématiques et modèles mathématiques
- 2 informatique, automatique, analyse des systèmes, traitement du signal
- 3 électronique, électrotechnique, optique
- 4 mécanique, énergétique
- 5 physique théorique
- 6 physique nucléaire et corpusculaire
- 7 astronomie et environnement planétaire
- 8 physique atomique et moléculaire
- 9 structure et dynamique moléculaire, chimie de coordination
- 10 physico-chimie des interactions et des interfaces
- 11 chimie et physico-chimie des matériaux solides
- 12 physique de la matière condensée - physique des solides
- 13 physique de la matière condensée - cristallographie
- 14 géophysique et géologie interne, minéralogie
- 15 géologie sédimentaire et paléontologie
- 16 océanographie et physique de l'atmosphère
- 17 synthèse organique et réactivité
- 18 chimie organique biologique et chimie thérapeutique
- 19 physico-chimie des polymères et des molécules biologiques
- 20 biochimie
- 21 biologie cellulaire
- 22 biologie des interactions cellulaires
- 23 pathologie expérimentale et comparée
- 24 thérapeutique expérimentale, pharmacologie
- 25 physiologie
- 26 psychophysiologie et psychologie
- 27 biologie et physiologie végétales
- 28 biologie animale

#### SCIENCES HUMAINES

- 29 écologie
- 30 agriculture
- 31 alimentation
- 32 archéologie historique
- 33 archéologie préhistorique
- 34 architecture/urbanisme
- 35 arts graphiques/peinture/sculpture
- 36 cinéma/photo/théâtre/spectacle
- 37 danse/musique
- 38 droit
- 39 économie
- 40 éducation
- 41 ethnologie
- 42 études africaines
- 43 génie
- 44 géographie
- 45 histoire
- 46 histoire médiévale
- 47 linguistique
- 48 littérature
- 49 philosophie
- 50 politique
- 51 psychologie
- 52 sciences religieuses
- 53 sociologie
- 54 information

Je désire recevoir le catalogue annuel

nom et prénom  
(en capitales)

titre ou  
fonction

n° et rue

pays

code postal et ville

Publicité - promotion, ventes et librairie, 295, rue Saint-Jacques - 75005 Paris

# Editions du CNRS

15 quai Anatole France, 75700 Paris

LE COURRIER DU  
**CNRS**

