Le courrier du CNRS 54

Auteur(s) : CNRS

Les folios

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

52 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 54, 1984-01

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

Consulté le 16/12/2025 sur la plate-forme EMAN :
https://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148

Présentation

Date(s)1984-01
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 pages52
Notice créée par Valérie Burgos Notice créée le 05/10/2023 Dernière modification le 10/12/2024

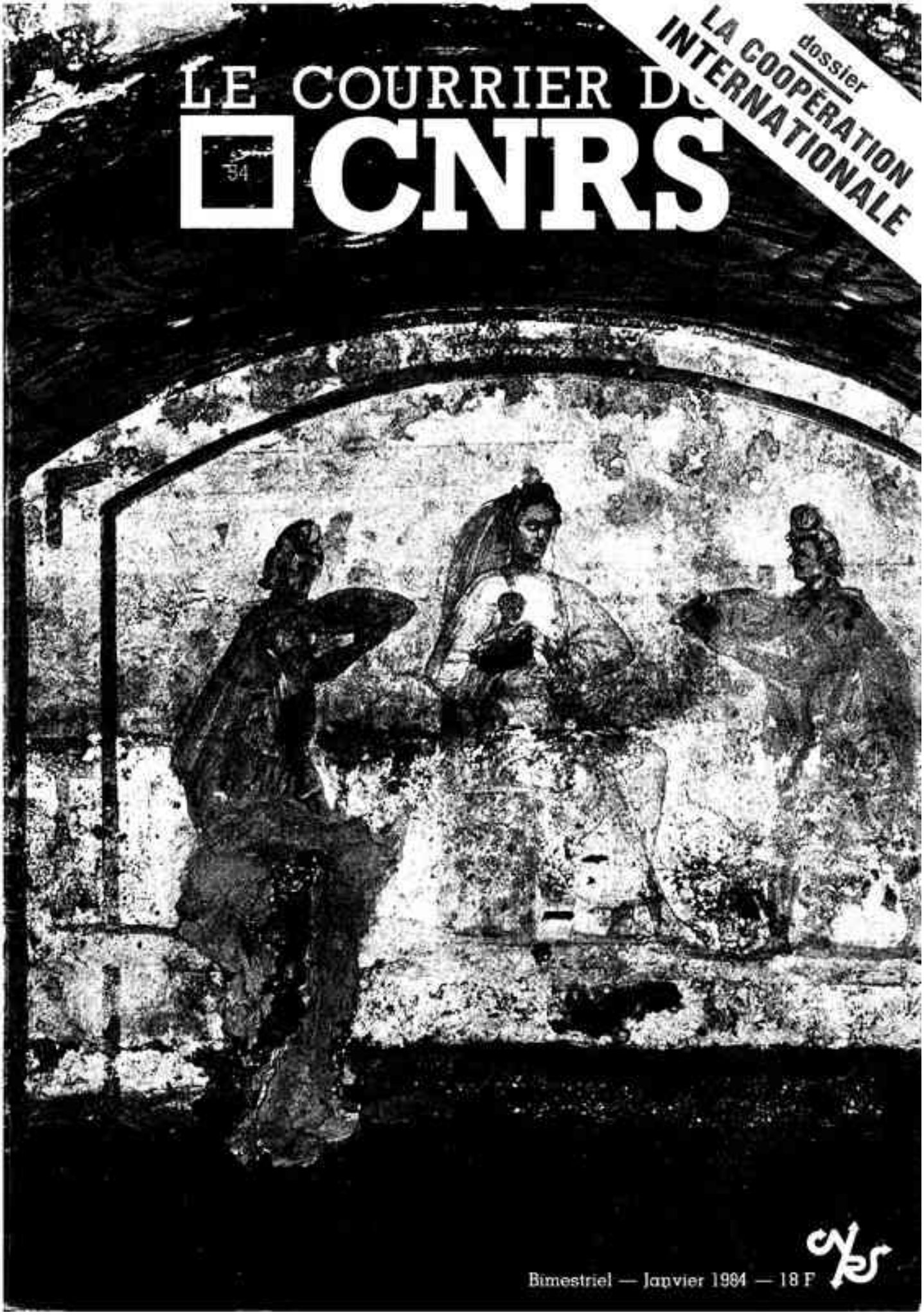
Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

LE COURRIER DU CNRS

34

dossier

LA COOPÉRATION INTERNATIONALE



Bimestriel — Janvier 1984 — 18 F

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

Evry Schatzman, médaille d'or du CNRS

La Médaille d'or du Centre national de la recherche scientifique a été décernée pour l'année 1983, à Monsieur Evry Schatzman.

Monsieur Evry Schatzman est né le 16 septembre 1920 à Neuilly-sur-Seine. En 1939, il entre à l'Ecole normale supérieure. En 1945, il est agrégé de physique et entre au CNRS comme chargé de recherche. Docteur ès-sciences en 1946, il institue, en 1954, à la demande de M. André Danjon, la première chaire d'astrophysique de France, à la Sorbonne où tous les astrophysiciens théoriciens français seront ses élèves ou les élèves de ses élèves. A partir de 1960, il se consacre à sa charge de professeur à la Faculté des sciences de Paris puis à l'université de Paris VII.

En 1976, M. Schatzman est nommé directeur de recherche titulaire au CNRS et travaille à l'observatoire de Meudon, dans le laboratoire d'astrophysique fondamentale (LA 173 du CNRS) qu'il quitte en 1978 pour rejoindre l'observatoire de Nice. Il est également visiteur au Laboratoire de radio-astronomie de l'Ecole normale supérieure de Paris.

L'œuvre de M. Evry Schatzman représente l'une des contributions les plus importantes et les plus originales dans l'approche et la résolution de grands problèmes fondamentaux. Il est particulièrement remarquable que plusieurs des « prédictions » théoriques que ses collaborateurs et lui-même avaient formulées ont été vérifiées par des travaux ultérieurs. A titre d'exemple, on peut citer :

– l'explication du débit d'énergie des naines blanches (1944). Les naines blanches ayant une très grande densité, la forte gravité de ces étoiles attire les éléments lourds à l'intérieur, l'hydrogène flottant à la surface, sans attendre les régions centrales où il se consumerait très rapidement ;

– explication du chauffage de la couronne solaire par ondes de choc et prédiction de la présence de mouvements ondulatoires dans l'atmosphère solaire trouvés quelques années plus tard par Evans et Michard (1951) ;

– prédiction du caractère double des novae et du caractère thermonucléaire de l'explosion des novae ordinaires. Depuis, toutes les novae qui ont été observées appartiennent à un système d'étoiles doubles ;

– effet d'écran des électrons sur les réactions nucléaires (1947) : première description de ce processus fondamental ;

– mise en évidence des grands nuages de matière interstellaire par les fluctuations spatiales du rougissement des étoiles bleues (1947) ;

– identification du graphite comme agent absorbant et polarisant dans la matière interstellaire (1954) ;

– prédiction du rayonnement radio des étoiles éruptives (1958) confirmée quelques mois plus tard à Jodrell Bank ;

– rôle du champ magnétique dans la perte de moment angulaire des étoiles (1959) ;

– mécanisme d'accélération des rayons cosmiques par la traversée de l'onde de choc (1963), processus maintenant admis par tous les spécialistes ;

– calculs des contraintes observationnelles (abondance des éléments, flux de rayonnements gamma) requises par un univers symétrique (matière-antimatière) (1970). Conclusion sur le caractère hautement improbable de ce modèle d'univers ;

– rôle de la diffusion turbulente dans les zones réputées stables des étoiles ; détermination des paramètres du mélange turbulent dans le soleil (1978). Explication des anomalies d'abondance du lithium, du bérilium et de l'hélium dans le soleil, et du faible flux de neutrinos solaires (1980).

Parmi les nombreux ouvrages de vulgarisation écrits par Monsieur Evry Schatzman, citons d'abord, l'*Astrophysique générale* (1959), rédigée en collaboration avec Monsieur J.C. Pecker puis : *Origines et évolution des mondes* (Albin Michel 1957), *Les planètes naissent aussi* (Del Duca 1962), *Structure de l'Univers* (Hachette 1968), Réflexion critique : *Science et société* (Lafont 1971).

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

CNRS
Délégation du Siège
Service documentaire
Dépôt des archives, Bâtiment 19
1, avenue de la Terrasse
91198 Gif-sur-Yvette
Tél : 01 69 82 39 17

CNRS
Dépot des archives
de la Délégation Paris Limitrophes
Bâtiment 19
1, avenue de la Terrasse
91198 Gif-sur-Yvette

LE COURRIER DU CNRS 54
Bimestriel - Janv-Fév. 1984

Distinction	2	Evry Schatzman, médaille d'or du CNRS 1983	
	4	Le mot du Président du Conseil d'Administration	Claude Fréjacques
Editorial	5		Pierre Papon
La coopération internationale	6	Le CNRS et la coopération internationale	Jean-François Miquel
	11	Collaboration franco-brésilienne en catalyse	Roger Fréty
	13	Les glaces de mer : la France et le programme international Mizex	Jean-Claude Gascard
Entretien	15	« Un chercheur est avant tout un créateur »	Pierre Joliot
A la découverte	19	L'accélérateur national Saturne et son programme expérimental	Pierre Radvanyi
Point de vue	24	L'intérieur du soleil et la sismologie solaire	Evry Schatzman
A la recherche	32	La bioaccumulation des métaux, processus physiologique normal et conséquence de la pollution	Roger Martoja, Micheline Martoja
Au-delà des frontières	38	La peinture des catacombes : histoire d'une recherche	Jean Guyon
Le point	42	La biologie des populations d'oiseaux marins	Pierre Jouventin
Matériaux	48	Fer, fontes et aciers. Des matériaux traditionnels aux matériaux nouveaux.	Gilles Pomey
	51	Conducteurs ioniques : stockage de l'énergie et véhicule électrique	Robert Collongues
Exposition	55	CNRS 84, images de la recherche : la communication	

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

Directeur de publication : Guéry 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 Cruzon, Bernard Dorny, Elisabeth Gordon, James Hélot, Daniel Jacquot, Gérard Lilamand, Jacqueline Mirabel, Maryvonne Tissier, Janine Roedet, Jean Tavitzki.

Revue bimestrielle comportant cinq numéros par an. Bulletin d'abonnement p. 27-30. Les intertitres et les chapeaux 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, 12-14 rond-point des Champs-Elysées – 75008 Paris. Réalisation : ALLPRINT, 8 rue Antoine Chantin – 75014 Paris.
C.P.A.D. 303 – ISBN 2-222-03454-X – ISSN 0153-985 X. © Centre national de la recherche scientifique.

Page 1 de couverture : Cimetière « Aux deux lauriers » : paroi de fond de la chambre 69. Détail : Adoration des mages. (Cliché PC AS, Lau E 01) – voir p. 38. Page 4 de couverture : Colonie de manchots à aigrettes vue d'hélicoptère aux Kerguelen. (Cliché P. Jouventin). Voir p. 42.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

LE MOT DU PRESIDENT DU CONSEIL D'ADMINISTRATION

L'année 1983 aura été un grand cru pour la recherche au Centre National de la Recherche Scientifique : participation à la découverte des bosons Z^0 et W^0 au CERN – Première de la réalisation d'un laser à électron libre auprès de LURE à Orsay – Analyse du rôle des oncogènes dans les processus de cancérisation – pour ne citer que quelques-unes des recherches les plus marquantes. Les résultats de nos chercheurs ont été reconnus sur le plan national et international par des grands prix de l'Institut et par des grands prix internationaux : Prix Ampère, Prix Joffé, Prix Charles Léopold Meyer, Prix Griffuel... attribués à nos chercheurs. Ils sont la justification de notre action qui est d'abord de faire une recherche originale au plus haut niveau international.

Le Comité National, dans sa nouvelle composition, associant l'ensemble du personnel au « jugement des pairs » dans les sections, a bien fonctionné dans son analyse de la qualité des formations et des chercheurs, apportant un démenti expérimental aux craintes des esprits chagrins.

1984 verra l'adoption du nouveau statut des personnels, qui reconnaît officiellement la notion de métier de la recherche et assure la stabilité de l'emploi. Il doit conduire en contrepartie à une mobilité accrue thématique, géographique et public-privé. Cette mobilité sera un des critères essentiels pris en compte au moment du passage dans le corps des directeurs de recherche.

Les statuts des chercheurs et des enseignants-chercheurs ont été bâtis pour permettre des échanges aisés. L'enseignement à temps partiel par des chercheurs du CNRS dans les Universités est explicitement prévu. Je ne saurais trop vous inciter à y participer activement. Cela vous permettra de connaître les étudiants, de participer aux conseils sur le campus universitaire et vous sera utile autant que vous serez utiles.

Le statut des ITA reconnaît leur activité essentielle dans les fonctions de la recherche et élargit leurs missions. La création d'un corps d'assistants-ingénieurs, d'un corps d'ingénieurs de recherche et de postes fonctionnels devrait permettre d'assurer à chacun un déroulement de carrière satisfaisant.

Nos nouvelles missions se développent : dans le domaine de l'information, le Centre de documentation scientifique et technique met en place de nouvelles publications plus adaptées aux besoins des utilisateurs et une grande exposition sur le thème de la communication est prévue pour cette année. (voir page 55).

Dans le domaine de la coopération internationale, nos actions en faveur des pays en voie de développement sont fortement accrues et nos bourses docteurs-ingénieurs leur sont désormais ouvertes. Le développement des relations inter-européennes sera un de nos autres axes prioritaires. (voir page 6).

L'extension des actions de valorisation de la recherche est essentielle et pour notre pays et pour assurer l'avenir du CNRS. Une première filiale industrielle a été créée : MIDIROBOTS ; de nouveaux Groupements d'Intérêt Public vont suivre. Des laboratoires communs avec de grandes entreprises ou des organismes publics de recherche s'établissent. Le nombre de contrats industriels s'accroît et vous êtes encouragés à servir de consultants dans les sociétés françaises. D'une manière générale, c'est tout un réseau de relations qui est établi par des accords-cadres avec les organismes de recherche plus spécialisés et avec les principales entreprises. Ce réseau doit nous ouvrir largement sur l'extérieur et permettre à l'ensemble du système de recherche français d'être plus efficace.

Nous avons beaucoup de travail devant nous. Retroussons nos manches. Bon courage pour 1984 !

Frejacques

Claude FREJACQUES

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

La science et la technologie ont eu de tout temps une dimension internationale, car la circulation des idées, la diffusion des découvertes scientifiques et des innovations technologiques ne s'arrêtent pas aux frontières des Etats. L'idée que l'internationalisme de la découverte et des techniques constitue un atout décisif, au-delà des considérations de prestige, dans les relations entre les nations, est désormais acquise. De plus les pays industriels ont progressivement pris conscience que la réflexion prospective qu'ils mènent sur les sciences et les techniques devrait nécessairement intégrer la dimension internationale des problèmes que celles-ci posent à la fois aux sociétés indutrielles et aux pays du Tiers-Monde.

Par ailleurs, l'évolution elle-même de la science, qui demande des moyens accrus de recherche dans tous les domaines, et particulièrement dans les domaines de pointe, a rendu nécessaire un effort collectif de recherche. C'est ainsi qu'après la réussite exemplaire du CERN ont été créés des centres internationaux comme l'Institut Laüe-Langevin (ILL), l'Institut de radio-astronomie millimétrique (IRAM) par exemple.

Le CNRS, lieu privilégié de réflexion car il développe son action dans l'ensemble des disciplines, occupe une position centrale dans le dispositif national de la recherche de notre pays ; il est de ce fait un acteur actif de la coopération scientifique internationale.

La création d'une direction des relations et de la coopération internationales, il y a un an, a marqué la volonté de l'organisme d'accroître le rôle qu'il peut mener dans ces deux directions.

Au sein de la direction des relations et de la coopération internationales, une cellule de prospective a initié un large travail d'identification et d'évaluation des coopérations déjà établies entre les départements scientifiques et une vingtaine de pays. Dans une seconde étape, elle apportera un véritable appui « prospectif » à la réflexion de l'ensemble de la direction du CNRS en analysant plus finement les tendances de la recherche internationale.

Placée auprès de la direction générale, la direction des relations et de la coopération internationales est chargée de définir la politique internationale du CNRS, de suivre sa mise en œuvre et d'en assurer la cohérence. En 1984, le CNRS développera son action dans deux directions : l'extension de la coopération européenne, la mise en œuvre d'une politique de collaboration avec les pays du Tiers-Monde.

La priorité que le CNRS souhaite accorder au développement des relations avec nos partenaires européens participe de l'idée, qui a fait son chemin, que la recherche scientifique peut être pour l'Europe l'élément fondamental d'une stratégie qui vise à transformer nos sociétés et à les aider à faire face aux défis auxquels ils sont confrontés. Les échanges entre laboratoires européens, s'ils existent, sont encore insuffisamment développés. Il faut que les scientifiques prennent l'habitude d'aller travailler dans les laboratoires des pays voisins. C'est pourquoi le CNRS étudiera tout particulièrement les conditions les plus appropriées à l'extension des échanges de chercheurs postdoctoraux entre les laboratoires européens. Dans certains domaines, des coopérations thématiques pourront s'engager dans le cadre des accords bilatéraux que le CNRS a conclus avec la plupart de ses homologues européens, certaines d'entre elles pourront s'intégrer dans les programmes soutenus par les communautés européennes.

L'action du CNRS tendra ainsi à s'insérer dans la politique de la France qui a pour objectif d'aider à la naissance d'un véritable espace scientifique et technologique européen.

La coopération avec les pays du Tiers-Monde est une dimension importante de notre action internationale. Il nous faut dans ce domaine innover : lancer de véritables actions concertées avec nos partenaires, former des scientifiques dans nos laboratoires. Pour donner plus de force et de cohérence à sa politique, le CNRS a procédé à une restructuration organique en créant en 1983 un comité de coopération avec les pays en voie de développement présidé par M. Claude Fréjacques, Président du conseil d'administration et ouvre, pour l'année universitaire 1984/1985, un programme de bourses de docteurs ingénieurs qui accentuera les efforts d'accueil et de formation de boursiers étrangers dans les laboratoires du Centre dans de meilleures conditions. Dix pays ont été sélectionnés provisoirement dans un premier temps. Une mention particulière doit être faite de la Chine avec laquelle la collaboration doit être exemplaire.

Ce numéro du Courrier du CNRS accorde une large place à la politique internationale menée par le CNRS. Par la suite, des informations « internationales » paraîtront régulièrement, dans cette publication. Cela témoigne de notre souci de faire de la coopération internationale un élément important de la politique scientifique du CNRS.

Pierre PAPON

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

Le CNRS et la coopération internationale

Les relations internationales, un élément-clef de la politique scientifique du CNRS : définition des priorités, nouveaux objectifs, nouvelles méthodes.

Jean-François MIQUEL

La Direction des relations et de la coopération internationales (DRCI) existe depuis un an. Elle est l'aboutissement de l'action menée depuis de nombreuses années au sein du CNRS qui a amplement démontré, dans ses résultats, la nécessité d'une politique scientifique internationale. Celle-ci va des actions individuelles de chercheurs et ingénieurs, jusqu'à la participation française aux grands instruments internationaux ; c'est un effort considérable qui est déployé à travers le monde.

Cet article n'est ni une démonstration de cette puissance, ni un exposé exhaustif de nos actions. Il vise d'abord à souligner la nécessaire évolution de nos méthodes puis à proposer quelques solutions aux problèmes qui se posent dans les affaires internationales au niveau des départements scientifiques, des laboratoires, des chercheurs du CNRS et y mettre en évidence la dimension internationale de la recherche scientifique.

La DRCI se situe alors au croisement « pays-disciplines ». Elle développe et maintient des contacts pris par les chercheurs, elle est le traducteur de méthodes et des attitudes propres à chaque pays, elle intègre toutes les disciplines pour présenter l'ensemble à nos partenaires. Sa démarche ne peut être comprise qu'en régime dynamique : la finalité étant de laisser entre les mains des scientifiques eux-mêmes l'exécution de programmes montés en puissance pour en conserver la mémoire et participer à l'évaluation des résultats sous l'angle des relations internationales.

□ Jean-François Miquel est directeur des relations et de la coopération internationales (DRCI) au Centre national de la recherche scientifique, 15 quai Anatole France, 75700 Paris.

Les chercheurs, les départements scientifiques et la DRCI

La coopération internationale commence au laboratoire ; que cherche-t-on à ce stade ? Accélérer le mouvement de la recherche, promouvoir son savoir-faire, acquérir un nouveau savoir-faire. On se retrouve en position de donneur ou d'accepteur, le plus souvent les deux.

Viennent ensuite, ou plutôt devraient venir naturellement, les échanges à long terme où l'on se répartit les tâches dans un intérêt commun.

On voit bien la montée en puissance en terme de science, que ce processus recèle. On voit bien aussi la nécessaire réflexion sur un programme commun, sa présentation à des commissions respectives dans les deux pays, son acceptation et son classement ; enfin en parallèle de l'évolution scientifique, l'intérêt pour chacun des organismes nationaux d'être en accord avec les priorités scientifiques annoncées et avec la politique de relations étrangères générales entre ces pays.

On retrouve là, d'une manière consciente et affichée, mais aussi parfois sous-jacente et diffuse, les caractéristiques des relations internationales dans l'activité de recherche : un sujet scientifique d'intérêt commun, bien structuré, croisé avec les intérêts nationaux des partenaires.

Au niveau des départements scientifiques, c'est d'abord la responsabilité de consulter les experts pour l'évaluation du projet. Les critères de classement sont nombreux, variables, parfois contradictoires, et l'aspect international difficile à intégrer. Le choix se ramène souvent à une évaluation des laboratoires et des individus qui proposent la coopération et l'on utilise alors les jugements des commissions du Comité national.

S'y ajoute au fil des ans, la renommée acquise par certains chercheurs en ce qui concerne la réussite de leurs coopérations ; des appréciations sur leur « savoir collaborer » et sur la satisfaction exprimée par les collègues étrangers.

Ces derniers critères peuvent paraître subjectifs et leur valeur faible, mais heureusement, les indicateurs objectifs de réussite des coopérations internationales ne manquent pas. Le premier d'entre eux, le plus sûr, est : que « l'arbre est jugé à ses fruits », c'est-à-dire, le jugement porté par la communauté internationale sur les publications issues de la collaboration ; il reste le premier et le vrai critère ; il situe une étape et doit être utilisé pour la poursuite de la coopération ; la collaboration reconnue internationalement peut-être soutenue par d'autres organismes.

Au cours de la collaboration des indices permettront de prévoir quelle importance on pourra accorder à cette coopération et les chances de voir sortir des résultats. C'est l'intensité de cette collaboration qui est mesurée en nombre et en durée de séjour des chercheurs et ingénieurs. Ces critères doivent être maniés avec précaution en fonction de la discipline et du programme. Cependant une coopération uniquement basée sur de courtes missions aura moins de chance de se développer que celle qui prend appui sur des échanges à long terme de chercheurs.

Le rôle de la DRCI se concentre alors sur l'établissement des négociations avec le Conseil de recherche ou l'Académie des pays associés portant sur la dimension de la coopération : nombre de chercheurs et de missions, éventuellement sur son calendrier. Elle devrait s'étendre à des dossiers permettant aux commissions d'évaluation des

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

Le télescope Canada-France-Hawaii après l'achèvement du montage (cliché CFH).

LES GRANDS EQUIPEMENTS INTERNATIONAUX

Outre sa participation à de très grands équipements de recherche créés au niveau européen (du type des installations du CERN ou de l'ESO), le CNRS se trouve à l'origine directe (investissements, construction, fonctionnement) des quatres principaux équipements suivants :

– L'Institut Laue-Langevin (ILL) créé en 1967, qui associe le Kernforschungszentrum de Karlsruhe (RFA), le CNRS et le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) depuis 1974, le Science and Engineering Research Council de Grande-Bretagne. Il s'agit d'un réacteur à très haut flux (diffusion des neutrons) utilisé par les chercheurs européens (principalement physiciens, chimistes, biologistes).

– La Société du télescope Canada-France-Hawaii, créée en 1974, par accord entre le CNRS, le CNRC (Canada) et l'Université d'Hawaii (Etat-Unis) a permis la construction et la mise en service d'un télescope de 3,60 m. de diamètre au sommet du Mauna Kea (4200 m.) sur la grande île d'Hawaii. Cet instruments est actuellement réservé à l'usage des astronomes des trois pays concernés.

– L'European incoherent scatter scientific association (EISCAT) créée le 30 décembre 1975, par accord entre le CNRS et la Max Planck Gesellschaft (MPG) de la République fédérale d'Allemagne, le Science research council (SRC) de la Grande-Bretagne, le Norges almenvitenskapelige Forskningsrad (NAF) de la Norvège, le Staten Naturvetenskapeliga Forningsrad (SNF) de la Suède et la Suomen Akatemia (SA) de la Finlande pour la construction et le fonctionnement d'un sondeur à diffusion incohérente en zone aurorale (trois stations : émission-réception en UHF et VHF à Tromsöe en Norvège, réception en UHF à Kiruna en Suède et à Sodankyla en Finlande).

– L'Institut de radio-astronomie millimétrique (IRAM) créé en 1979 par accord du CNRS et de la Max-Planck Gesellschaft (RFA) associe également l'Instituto geografico national d'Espagne par voie d'accord particulier, pour la construction et la mise en service d'un grand télescope de 30 mètres de diamètre (Pico de Veleta, Espagne) et celle d'un interféromètre (3 antennes de 15 m. de diamètre chacune) sur le plateau de Bure en France.

deux partenaires de porter un jugement sur le résultat.

Les accords bilatéraux

Il faut rappeler ici que le CNRS a déjà signé avec les organismes correspondants dans quelques trente pays des accords bilatéraux. Ces accords portent sur des échanges calculés en mois/chercheurs. Bien que les relations internationales aient toujours existé, c'est depuis quinze ans qu'elles ont pris dans chaque organisation, l'ampleur que l'on connaît aujourd'hui. Cela est dû d'une part à la prise de conscience dans tous les pays de l'importance de la recherche dans l'économie et d'autre part à la facilité et la rapidité des voyages aériens qui ont joué, là comme ailleurs, un rôle déterminant.

Les accords bilatéraux ont été à la base de l'action internationale au niveau des laboratoires. Ils supposent un engagement en terme de disponibilité et souvent de crédits de fonctionnement des laboratoires d'accueil. Certains ont ainsi construit des relations solides se poursuivant sur des années et associant à la coopération la formation réciproque par des échanges de jeunes chercheurs, souvent sur des bourses du Ministère de l'Education Nationale, du Ministère des Relations Extérieures ou des gouvernements des pays partenaires.

La collaboration internationale commence quand deux laboratoires coopérants présentent une fiche-programme à leurs organismes respectifs ; après évaluation par les départements scientifiques et classement, une commission mixte décide des attributions.

On est ainsi arrivé à la notion de programmes, étape logique et qui concrétise des échanges réguliers ayant atteint une maturité et un certain volume

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

associant souvent plusieurs laboratoires de chaque pays. A ce stade le département scientifique concerné négocie un programme triannuel, nomme un responsable du programme et ajoute aux budgets de mission et de séjour des crédits de recherche.

Les actions thématiques programmées Europe, Etats-Unis et Tiers-Monde en sont des exemples. Elles seront désormais conduites par un co-

Programmes spécifiques ou intégrés

Certains sujets qui intéressent particulièrement le CNRS et un organisme étranger donnent lieu à des programmes spécifiques (financement de thèmes prioritaires).

Dans ce numéro du Courrier du CNRS, dans la rubrique « coopération internationale », on décrit le fonctionnement et la finalité d'une coopération entre le Brésil et la France dans le domaine de la catalyse, qui fonctionne depuis un an sur cette base, le département de chimie en assurant la maîtrise.

La procédure utilisée pour établir un programme spécifique peut se résumer de la façon suivante :

– Ils portent d'abord sur quelques pays, qui ont été choisis parce que les contacts existent déjà et que les deux communautés veulent travailler ensemble.

– Au CNRS, un département scientifique ou un programme interdisciplinaire revendique la maîtrise d'œuvre.

– La DRCI entame les négociations avec le partenaire étranger et les éventuels copartenaires (français ou multinationaux).

– Le financement suppose une participation du partenaire. Au CNRS, le département et la DRCI s'engagent sur des sommes de même grandeur et choisissent le coordinateur CNRS du projet.

– Un « Groupe pays » est chargé de l'évaluation d'utilité ; le département saisit la section correspondante du Comité national sur l'intérêt scientifique du projet.

Identification des coopérations

On espère toujours qu'un premier contact au cours d'un congrès, qu'une discussion où l'on découvre la complémentarité des approches va devenir la base d'une coopération.

Cette graine est fragile, elle doit être protégée pour germer et grandir, arrosée pour porter des fruits. C'est de divers côtés qu'une coopération doit être suivie, elle met toujours en jeu des intérêts contradictoires. Il est donc nécessaire, tôt dans le processus, d'y accorder des soins attentifs, aussi bien au laboratoire et dans le département scientifique correspondant que dans les réunions bilatérales. Pour cela des études en profondeur doivent être faites.

Le nombre des coopérations bilatérales est de plusieurs milliers : il est donc tout à fait nécessaire d'informatiser les renseignements les concernant afin de permettre aux départements scientifiques un accès rapide. Pendant l'année 1983, la DRCI a entrepris plusieurs expériences d'accumulation de données, de leur traitement, de leur exploitation.

Une première enquête portant sur la coopération avec 16 pays (contrastés par leur taille, leur richesse, leur degré

2 CELLULE EVALUATION ET PROSPECTIVE (CEP)

La cellule évaluation et prospective de la DRCI créée en mai dernier, a pour tâche de constituer des bases de données et de les exploiter pour fournir aux diverses instances du CNRS une image de l'évolution de la recherche dans le monde.

La première base de données concerne : l'identification des demandes de coopération formulées par les chercheurs dans le cadre des accords bilatéraux, les ordres de mission à l'étranger et la fiche de coopération internationale fournie annuellement par les formations. Elle contient :

– l'identification de la formation CNRS (département, discipline, code, nom, ville)
– l'identification de la formation d'accueil (pays, ville, nom, organisme de rattachement)
– le thème de recherche
– les noms des coopérants et des responsables de coopération
– la durée des séjours
– le type d'activité
– les organismes participant à la coopération
– les publications en commun
– les résultats autres que publications
– les noms des responsables scientifiques et autres du pays d'accueil rencontré.

Ces données permettront la recherche des critères d'évaluation de la qualité d'une coopération. Il est nécessaire de fournir au Comité national et aux départements scientifiques des critères spécifiques portant sur l'intérêt des deux partenaires internationaux à une recherche en commun.

Les autres bases en cours de constitution concernent les tendances internationales dans les domaines placés comme prioritaires au CNRS et particulièrement ceux pour lesquels un groupe de prospective a été créé.

Deux méthodes sont utilisées :

– le choix par quelques spécialistes (les chercheurs d'un laboratoire par exemple) de plusieurs centaines de publications.

Les critères d'analyses varient en fonction des disciplines. Ils se rapportent au laboratoire d'où est issue la publication, à son université, au pays, à la revue...

– on s'adresse à une population qui représente à l'échelon du pays une sous-discipline, par exemple : les membres d'un comité de prospective, la totalité d'une commission du Comité national etc... On demande alors à chaque individu d'identifier dans une période donnée quelques publications internationales (à l'exception de son propre pays bien évidemment) qui, de l'avis de chacun des individus, a marqué l'avancement de la science. Un traitement identique au précédent donne les éléments de corrélation.

Ces nouvelles données apporteront une aide à la réflexion des groupes de prospective en soulignant les points d'émergence de nouveaux concepts ou de nouvelles méthodologies dans le monde et permettront de situer les chercheurs d'un groupe dans l'ensemble de la population mondiale de la discipline.

La CEP n'est qu'un système de coordination et de compatibilité, les études sont assurées sur contrats par les chercheurs eux-mêmes (11 études en cours à ce jour dont les meilleures, sur avis du Comité national seront publiées). Les chercheurs et les groupes ayant des intérêts et compétences méthodologiques en ce domaine sont priés d'envoyer leurs propositions à l'attention de Q. Kieu-CEP-DRCI-.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

Pompe solaire du village de Sarwal (Bihar, Inde). Programme franco-indien ASVIN (applications solaires dans les villages de l'Inde). (© CNRS-Cliché P. Amado).

d'avancement scientifique et technologique) a été lancée. Mille fiches environ sont rentrées à ce jour et leur traitement commencera début 84 pour aboutir à une étude sur ces pays, qui sera publiée. Pour assurer ce suivi et l'étendre, un questionnaire sera inclus de manière systématique dans la demande annuelle de crédits des formations.

On souhaite pouvoir, par corrélation, mesurer les engagements réciproques avec chaque pays, par sections du Comité national, par sous-disciplines, par villes françaises ou étrangères, etc... de suivre année après année l'évolution de ces coopérations. Plusieurs pays ayant reçu les premiers éléments de nos études, souhaitent s'associer et proposent d'adopter des méthodes proches permettant des échanges d'information.

Une informatisation des missions est également en cours. L'ensemble des opérations administratives sera traité dans les administrations déléguées. Toutefois la DRCI conserve la totalité de l'information nécessaire à l'établissement de la politique scientifique internationale. Ce programme se déroule en coopération avec plusieurs organismes français sous la coordination du Ministère des relations extérieures, le CNRS étant responsable de la mise au point expérimentale de la méthode. Ces fiches mission seront évidemment corrélées avec les fiches coopération.

Une troisième enquête porte sur la présence et l'activité des chercheurs étrangers dans nos laboratoires. Celle-ci a eu un excellent taux de réponses et reprend des études similaires menées dans le département des sciences physiques pour l'ingénieur. Outre l'intérêt scientifique, il y a là, nous l'espérons, un moyen d'améliorer les conditions de séjour dans notre pays des jeunes boursiers étrangers.

Ces études ont été commencées par la Cellule d'évaluation et de prospective de la DRCI, en collaboration avec le LPRAI (Laboratoire de prospective réactionnelle et d'analyse de l'information) d'Aix-En-Provence et le LAAS (Laboratoire d'automatique et d'analyse des systèmes) de Toulouse. Cette cellule est tournée vers l'identification et l'évaluation des tendances de la recherche internationale et travaille, par ailleurs, en liaison avec des groupes de prospectives (voir encadré ci-contre).

Le CNRS et le Tiers-Monde

Fort de 24 000 chercheurs, ingénieurs, techniciens et administratifs, le CNRS élargit tout d'abord le champ des connaissances ; ces connaissances comportent un savoir-faire qui peut et doit être valorisé.

Avec le Tiers-Monde, qui représente les trois quarts de l'humanité et d'où émergent les Nouveaux Pays Industrialisés qui deviennent, dans certaines disciplines, de véritables partenaires scientifiques, une action volontariste de grande ampleur est nécessaire pour que la recherche fondamentale apporte sa contribution au développement. Ces pays ne peuvent plus être considérés comme des « terrains d'études » pour les sciences de la terre, de la vie et de l'homme ; leur attente et leurs demandes sont autres, notamment pour la formation de leurs cadres ainsi que pour la création et le développement de leurs propres infrastructures, selon leurs priorités et leurs contraintes nationales.

Les problèmes inhérents au développement se posent à travers le monde en termes économiques et sociaux, et aussi technologiques dont les solutions nécessitent les apports de la recherche. Par exemple, la maîtrise de la santé, de l'eau, de la production végétale et animale, de l'énergie, des moyens de communication, etc... suppose l'adaptation à chaque cas particulier des technologies existantes ou la recherche de nouvelles technologies.

La notion de recherche et de technologie adaptée ne s'improvise pas, elle s'apprend par le dialogue du besoin et du savoir faire. C'est bien de cela dont il s'agit et tous les chercheurs de terrain, y compris ceux de la recherche de base, le vivent dans leur travail. Il ne manque pas d'excellents exemples de formation optimisée dans ce sens. Les chercheurs étrangers qui viennent préparer une thèse ou en stage dans nos laboratoires du département des sciences physiques pour l'ingénieur, travaillent sur des sujets en apparence éloignés en terme de complexité. Le problème ne se trouve pas là en effet : la rigueur de la mesure, l'imagination dans la recherche des solutions restent les bases de tous les travaux.

Tout d'abord, comment se présente le problème pour le CNRS et quelle forme peut prendre une contribution concrète et pragmatique de notre structure aux problèmes du développement ?

– La formation : enseigner les méthodologies de saisie des données, de la mesure, de la construction des modèles et de leur utilisation sont des actes scientifiques. Former par la recherche, reste la base de notre action. Les sujets choisis comme objet de cette recherche doivent être adaptés à chaque cas.

– L'identification : c'est d'abord le choix en commun avec nos partenaires des méthodes à développer. C'est aussi l'identification du savoir-faire au CNRS. C'est ainsi l'adéquation entre ces objectifs et ce savoir-faire. On remarque que de nombreuses équipes du CNRS, réputées par le caractère « pointu » de leur recherche, n'hésitent pas à transposer leur expériences sur des sujets d'apparences plus modestes mais rapidement utilisables.

– L'évaluation : elle doit faire l'objet d'une réflexion menant à de nouveaux concepts. L'évaluation de la recherche est un art difficile et malgré tous les efforts de quantification des données, rien n'a encore été trouvé de mieux que le « jugement des pairs ». Dans de nombreux pays avancés, la tendance est d'élargir cette pratique à la communauté internationale, de sortir du cadre national pour une analyse enrichie par la « diversité des regards » : cette notion est essentielle pour le développement. Outre le « regard » des intéressés

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

qui, bien qu'évident, n'a pas toujours été pris en compte, il y a aussi l'expérience des hommes de terrain (ORSTOM, GERDAT, INSERM, BRGM, etc...) des groupes spécialisés de type intégré (Banque Mondiale, FAO, UNESCO, OMS, etc...) possédant de solides traditions d'analyse critique des projets, de l'exécution et du résultat final en matière de développement. L'apport de la recherche se situe en amont de l'action, mais amène la notion de jugement scientifique et utilitaire. Ce dernier point étant nouveau dans notre débat, nouveau car il s'agit d'une échelle de temps courte, les retombées d'un développement pouvant se voir dès la fin du projet et son succès étant directement mesuré par l'adoption ou le refus de la méthode proposée. On est loin des découvertes fondamentales dont les applications sont imprévisibles et lointaines.

Simultanément avec le jugement des pairs assuré par le Comité national, il convient de soumettre le projet, l'avancement des travaux et les résultats à l'avis d'un groupe d'experts des conditions locales en termes sociaux économiques et géographiques. Le Comité national poursuivant son travail de définition de la qualité de la recherche, le « Groupe pays » se prononçant sur l'adéquation aux besoins et sur l'utilité.

– La spécificité de notre action est indispensable. Nous ne pouvons pas coopérer avec tout le monde et si la « structure CNRS » prend un départ dans ces domaines c'est parce que les chercheurs et ingénieurs du CNRS sont en relations avec les pays en développement depuis longtemps.

Voici quelques exemples de collaborations internationales avec des pays du Tiers-Monde :

– Dans le département des sciences de la terre, océan, atmosphère, espace, l'action spécifique programmée « Afrique » aide une dizaine d'équipes (structuralistes, altérologues, quaternaristes) à des recherches en Afrique de l'Ouest et au Sahara. Une coopération avec l'ORSTOM devra être développée, afin de coordonner et d'augmenter l'efficacité des actions. Ce programme sera progressivement situé dans une action interdisciplinaire.

– Dans le département sciences de l'homme et de la société, en plus des nombreuses équipes travaillant déjà efficacement et de longue date avec les pays en voie de développement, une action thématique programmée spécifique « Politiques et stratégies de développement dans le Tiers-Monde » a été lancée. Les réponses d'offres sont nombreuses (67) ce qui démontre l'intérêt des chercheurs de ce secteur, que l'on retrouve dans chaque action de développement.

– Enfin le département des sciences de la vie est également omniprésent dans les pays en voie de développement. Dans les zones tropicales et semi-tropicales c'est à travers l'écologie, la parasitologie, les bases scientifiques de la production animale et végétale que ces actions sont les plus importantes en étroite liaison, le plus souvent avec d'autres organismes (INSERM, INRA, ORSTOM).

Depuis 1983, un programme mobilisateur du Ministère de l'industrie et de la recherche accorde un soutien à l'ensemble de ces projets. La Communauté économique européenne lance de son côté des actions spécifiques.

Le programme mobilisateur du Ministère de l'industrie et de la recherche « Recherche scientifique et innovation technologique au service du développement du Tiers-Monde » a été institué par la loi d'orientation et de programmation, concrétisant ainsi la priorité reconnue à la coopération scientifique et technologique avec les pays en développement. Ce programme accorde son soutien à l'ensemble des collaborations internationales citées précédemment.

Création d'un comité de coopération avec les pays en voie de développement :

Dès juillet 1982, a été mis en place au CNRS, un Comité de coopération avec les pays en développement. Une décision du Directeur général du CNRS, en date du 25 mars 1983, a confirmé la constitution de ce comité en élargissant sa mission et sa composition. Ce comité est l'organe de base qui permet de concrétiser le programme établi entre le Ministère de l'industrie et de la recherche et le CNRS dont le but est de promouvoir « la coopération au service du développement du Tiers-Monde ». Il se réunit périodiquement, deux ou trois fois par an, et il a pour rôle :

– d'établir un inventaire et de maintenir des actions conduites au CNRS ayant un rapport avec les pays en développement. Cet inventaire sera établi avec le souci de distinguer les actions de recherche menées par les formations dans le cadre de leurs programmes, des actions de coopération engagées à la demande ou à l'initiative des pays en développement. Une attention particulière sera portée aux problèmes de formation des chercheurs originaires des pays en développement,

– de veiller à l'harmonisation des orientations avec le programme mobilisateur du Ministère de l'industrie et de la recherche,

– de proposer pour le CNRS une politique distinguant les différents types d'action,

– de promouvoir les relations avec les autres organismes français et les organisations internationales qui s'intéressent au développement.

Le comité, qui est présidé par M. Claude Fréjacques, Président du conseil d'administration du CNRS, est constitué par les directeurs scientifiques du CNRS ou leurs représentants, les directeurs de programmes ou leurs représentants, le directeur de la programmation et de la prévision budgétaire, des personnalités extérieures au CNRS et notamment un représentant du Ministère de l'industrie et de la recherche, un représentant du Ministère de l'éducation nationale, et au moins un représentant du Ministère des relations extérieures, des experts selon la nature des questions traitées.

Politique de bourses envers les pays du Tiers-Monde

Les bourses de docteur-ingénieur (BDI) sont destinées à la spécialisation, dans les domaines relevant de l'ingénierie, de jeunes scientifiques originaires de ces pays, ayant effectué des études brillantes (notion d'excellence) dans les départements universitaires ou écoles supérieures à orientation technologique de leur pays d'origine ou éventuellement en France.

Les différents pays sont mis en compétition ; il n'y a pas de contingent de bourses réservé à tel ou tel partenaire et les bénéficiaires de ces bourses seront accueillis dans l'une des formations relevant du CNRS : laboratoires propres ou associés. Les thèses, préparées en 3 ans, seront dirigées par une équipe mixte de professeurs français et professeurs du pays d'origine du stagiaire (notion de cotutelle). Les objectifs de carrière professionnelle du stagiaire dans son pays d'origine seront pris en compte lors de la sélection des candidats, la thèse avec cotutelle et stratifiée permettant une réinsertion aisée au retour dans le pays d'origine.

La finalité de ces bourses est en effet de fournir, aux meilleurs jeunes scientifiques de ces pays, une formation française au niveau du doctorat.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

Collaboration franco-brésilienne en catalyse

Ce texte présente un axe prioritaire de la coopération entre le Centre national de la recherche scientifique et le Conseil national de recherche brésilien (CNPq) dans un domaine dont l'importance économique est indéniable : la catalyse.

Roger FRETY

La coopération franco-brésilienne, en catalyse, a démarré il y a une dizaine d'années grâce à quelques initiatives personnelles. Cette coopération s'avère d'autant plus importante que bien des développements de la chimie dans le domaine des matières premières, de l'énergie ou des substances à haute valeur ajoutée, reposent sur la mise au point de nouveaux catalyseurs.

Les catalyseurs sont des composés qui, sans apparaître dans le bilan final des réactions chimiques, en augmentent la vitesse – phénomène de catalyse – et favorisent éventuellement, de manière sélective, une réaction lorsque plusieurs sont en compétition. Ils agissent presque toujours en quantités petites par rapport aux quantités de produits formés.

On distingue catalyse homogène et catalyse hétérogène. Pour la première, catalyseur, réactifs et produits sont dans une même phase, le plus souvent liquide. En catalyse hétérogène, le catalyseur forme une phase distincte ; il se présente généralement sous forme solide et la réaction a lieu à sa surface.

Liée étroitement à l'industrie depuis cent cinquante ans, utilisée déjà sur une grande échelle pour les produits manufacturés depuis le début du siècle, la catalyse est maintenant fortement impliquée dans l'économie : de la performance – rendement, sélectivité... – d'un système catalytique dépendent la compétitivité d'un produit ainsi que l'exportation des technologies, des équipements et des catalyseurs eux-mêmes.

□ Roger Frety est maître de recherche à l'Institut de recherche sur la catalyse, 2, avenue Albert Einstein, 69626 Villeurbanne.

Quelques données numériques soulignent l'importance de l'enjeu économique : si le marché des catalyseurs « ne représente que » 8610 millions de francs en 1981 pour le monde occidental, dont 50,5 % pour le raffinage du pétrole, 5,2 % pour les pots d'échappement catalytiques, 23,3 % pour la chimie fine et la polymérisation et 21 % pour la pétrochimie et les engrais, le marché des produits issus de ces procédés catalytiques est supérieur de trois ordres de grandeur.

D'un point de vue stratégique, l'indépendance vis-à-vis des sources d'approvisionnement en énergie et en matières premières mais aussi en catalyseurs rend indispensable la recherche en catalyse. En effet, la catalyse constitue l'élément essentiel des futurs développements en matière de substituants au pétrole et de nouveaux domaines d'études : nouvelle chimie dérivée du gaz de synthèse $CO + H_2$ que celui-ci soit issu du charbon, des résidus pétroliers ou même de la biomasse et du méthanol à partir du gaz naturel ; conversion des produits lourds pétroliers en produits légers, chimie fine liée au développement de la catalyse moléculaire.

La coopération entre le CNRS et le CNPq brésilien s'est concrétisée il y a quelques années par la réalisation de deux thèses de docteur-ingénieur en France puis par le montage d'un petit laboratoire de catalyse à Rio de Janeiro et l'échange de chercheurs entre les deux pays. Dans ce cadre, un soutien du Ministère des affaires étrangères avait permis d'attribuer un poste de professeur coopérant au Brésil pendant six ans. Ceci a permis d'aider à la formation sur place de cinq chercheurs brésiliens qui ont soutenu leurs thèse entre 1975 et 1981.

Les premiers brésiliens formés en France ont cependant abandonné en 1979 et 1980 les activités liées à la catalyse. Sensiblement au même moment, pour dynamiser la chimie brésilienne, le CNPq a essayé de créer un Institut de chimie (dans lequel la catalyse devait être un thème important) et a consulté pour cela divers partenaires internationaux dont le département de chimie du CNRS. Par la suite, le CNPq a remplacé l'Institut de chimie par un programme d'appui à la chimie (PRONAQ) tout en continuant sa collaboration avec le CNRS. Le PRONAQ a mis et met en place divers sous-ensembles (substances naturelles, instrumentation, chimie du solide, catalyse...) dont la structure rappelle celle des GRECO français.

Le premier des sous-ensembles officiellement accepté et financé par la FINEP (financement d'études et de projets brésiliens) a été celui de catalyse désigné ci-après par PRONAQ-CAT.

Le programme brésilien PRONAQ-CAT a divers objectifs parmi lesquels le maintien et le développement du potentiel des laboratoires universitaires intéressés par la catalyse, la formation des divers personnels impliqués, la coordination des diverses recherches en cours et l'incitation des recherches inter-équipes, les études sur la réaction catalytique, la préparation et la caractérisation des catalyseurs.

A partir de 1982, le PRONAQ-CAT a donc englobé dans les groupes qui s'intéressaient à la catalyse, aussi bien ceux qui possédaient déjà des structures de recherche que ceux qui commençaient. Il a regroupé ainsi dix équipes travaillant dans le domaine de la catalyse hétérogène et trois groupes plus intéressés par la catalyse homogène et la chimie de coordination. Sur cet ensemble, sept groupes peuvent être considérés comme ayant une activité régulière dans la discipline et quatre d'entre eux possèdent un cours de spécialisation.

La carte du Brésil présentée page suivante permet de se faire une idée de

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

Fig. 1 – Groupes potentiels : Belem, Ribeirao Preto, Porto Alegre, Rio de Janeiro. Groupe PRONAQ juin 1983 : Natal, Campina Grande, Brasilia, Rio de Janeiro (IME), Rio de Janeiro (UFRJ-COPPE) (2 groupes ≠), Araraquara, Campinas (3 groupes ≠), Sao Carlos (2 groupes), Florianopolis, Sao Paulo. Centres de recherche avec groupes de catalyse : Salvador-Camaçari, Rio de Janeiro, Sao Paulo. Centres de recherche intéressés par la catalyse : Porto Alegre, Rio de Janeiro. Pôles pétrochimiques : Salvador, Sao Paulo, Porto Alegre. Pôle carbochimique : Porto Alegre.

la localisation de ces équipes ainsi que celle de centres pluridisciplinaires (instituts de recherches technologiques) travaillant pour partie en catalyse. Est également indiquée sur la carte la position des trois grands pôles pétrochimiques brésiliens. L'existence des pôles Nord (Bahia) et Sud (Porto Alegre) risque dans l'avenir de modifier un peu la hiérarchie des centres existants ainsi que leur type d'activité.

La coopération CNRS-CNPq a été jusqu'alors localisée essentiellement à Rio de Janeiro (IME-COPPE) et à Sao Carlos (département de génie chimique de l'Université fédérale) où se situaient les groupes dont les préoccupations en recherches étaient compatibles avec les axes de la catalyse au CNRS (possibilités d'études communes...). Mais des visites de stimulation, avec conférences, séminaires, cours... ont également eu lieu à Natal, Sao Paulo, Campinas, Porto Alegre, Belem, Araraquara, ainsi qu'une participation active aux actions de formation et de divulgation brésiliennes (séminaires brésiliens de catalyse organisés par l'Institut brésilien du pétrole, cours d'initiation à la catalyse du même organisme, participation à la rédaction d'un manuel de catalyse...)

En ce qui concerne plus spécifiquement la recherche, quelques thèmes prioritaires de coopération ont été retenus en catalyse hétérogène. Ils ont trait à :

– la chimie de l'éthanol (le Brésil est le premier producteur mondial d'éthanol ; il utilise ce combustible pour l'alimentation d'une flotte de plus de 600.000 automobiles, et pourrait, au travers de la chimie de l'éthanol créer un débouché supplémentaire à sa production).

– la chimie des huiles végétales (le Brésil, gros producteur d'oléagineux, fait des recherches en vue d'obtenir à partir des huiles végétales un combustible à propriétés similaires à celles du Diesel).

– la pétrochimie (le Brésil produit environ 50 % de sa consommation en pétrole),

– la carbochimie (le sud du Brésil est riche en charbon malheureusement à forte teneur en cendres).

Les catalyseurs concernés par ces diverses chimies sont surtout des catalyseurs hétérogènes métalliques et acides. En ce qui concerne la catalyse homogène, en phase de démarrage, les thèmes de recherche pourraient être centrés sur l'utilisation de l'éthanol comme matière première, sur la préparation des carbonyles des métaux du groupe VIII et la chimie des composés du niobium. Il convient de souligner que pour l'ensemble de ces programmes, la valorisation de ressources naturelles est une préoccupation majeure.

Dans le cadre de leur politique scientifique internationale le CNRS et le CNPq ont décidé de consacrer une grande partie de l'accord d'échanges au programme « catalyse ». En effet, les solides relations déjà établies, les intérêts mutuels des deux organismes incitaient à franchir une nouvelle étape dans la coopération. C'est ainsi qu'en 1983 cinq chercheurs français dans ce domaine ont passé au total cinq mois au Brésil pour une série de cours, séminaires et discussions sur les sujets de recherche dans divers laboratoires brésiliens. Côté brésilien, plusieurs chercheurs doivent également venir passer cinq mois en France (Lyon, Villeurbanne, Poitiers, Lille, Paris...) et enfin, un petit flux d'étudiants brésiliens (hors convention CNRS-CNPq) est également en voie d'établissement.

Ce programme de coopération appliqué à la catalyse est prévu pour au moins trois ans, avec un bilan précis des actions engagées à la fin de chaque année. Il est souhaitable qu'il puisse profiter au plus grand nombre de laboratoires brésiliens et français.

Dans un proche avenir, il est envisagé par le CNRS et le CNPq l'insertion du programme de catalyse dans un ensemble plus vaste appelé « programme intégré » qui ferait appel à d'autres disciplines, ainsi que la mise en place de thèses mixtes ou stratifiées en co-tutelle, la mise sur pied de stages techniques ou pratiques et de cours communs, le renforcement des actions communes de recherche et le déplacement de chercheurs de haut niveau pour plusieurs mois voire plusieurs années au Brésil et réciproquement.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

Les glaces de mer

Un effort international important est en cours dans lequel la recherche en océanographie tient une place essentielle. Dans ce contexte une meilleure compréhension des interactions océan-glace-atmosphère est nécessaire. Un nouveau programme international – le programme MIZEX – étudie l'évolution des zones marginales de la banquise.

Jean-Claude GASCARD

Les pays riverains de l'océan glacial arctique s'intéressent depuis longtemps à l'évolution saisonnière de la banquise pour des raisons économiques, sociales, politiques et stratégiques évidentes, et, dans l'hémisphère Sud, un ensemble beaucoup plus élargi de pays, dont la France, ont fusionné leurs efforts depuis près de 25 ans pour l'étude scientifique de l'océan antarctique (SCAR : Scientific Committee for Antarctic Research).

Dans bon nombre de pays s'est produite récemment une prise de conscience de la précarité des équilibres écologiques et socio-économiques liés à des fluctuations climatiques de notre planète. Un très grand effort est entrepris au plan international afin de connaître la dynamique du climat, dans la perspective, notamment, où la prédiction de certaines modifications climatiques permettrait d'élaborer une politique d'ensemble qui pourrait en prévenir les conséquences. Cet effort implique entre autres une forte contribution de la recherche en océanographie, étant donné le rôle de l'océan dans le maintien des équilibres climatiques. Dans ce contexte, une meilleure compréhension des multiples interactions entre les glaces polaires, l'océan et l'atmosphère est apparue récemment tout à fait nécessaire.

Pendant les années 1970 l'observation spatiale des glaces de mer, au moyen de radiomètres hyperfréquences (micro-ondes) embarqués sur des satellites à défilement en orbite terrestre, a permis un nouveau départ pour l'étude de ces glaces. Grâce à ces techniques on peut notamment observer, quel que soit l'état de l'atmosphère, l'évolution à quelques jours de l'extension globale de la banquise avec une résolution spatiale de l'ordre de 20 à 30 km, ainsi que la concentration en glace c'est-à-dire, de 0 % à proximité de l'océan libre, à 100 % au cœur du pack. On peut aussi distinguer divers types de glace : essentiellement les glaces annuelles de 2 à 3 m d'épaisseur en moyenne et les glaces pluriannuelles 2 à 3 fois plus épaisses. Dans l'Antarctique les glaces pluriannuelles sont peu répandues comparativement à l'Arctique. En d'autres termes chaque été austral les glaces de mer antarctiques disparaissent presque complètement contrairement aux glaces de mer arctiques, pendant l'été boréal. Chacun sait que notre planète présente une dissymétrie flagrante entre l'océan glacial Arctique au Nord entouré de continents et le continent Antarctique au Sud entouré de l'océan glacial Antarctique. C'est 20 à 25 millions de km^2 de la Terre qui sont, à notre époque sous l'emprise des glaces de mer chaque hiver austral et boréal.

Les constituants de l'ensemble « atmosphère - hydrosphère - cryosphère » qui gouverne les climats de notre planète ne sont pas simples à décrire et nous ignorons encore aujourd'hui l'importance relative de chacun de ces constituants. Ce que nous savons c'est que le caractère évolutif des glaces de mer s'interprète comme un signal climatique de première grandeur. Les études des paléoclimatologues, qui travaillent sur les sédiments marins par exemple, nous révèlent qu'au dernier âge glaciaire, il y a 18 000 ans, la banquise, en hiver, couvrait une surface deux fois plus importante qu'aujourd'hui. Les observations récentes, par télédétection satellitaire, révèlent des fluctuations et des anomalies importantes dans le cycle saisonnier des banquises non seulement à la limite des glaces de mer mais aussi à l'intérieur du pack (polynias). Ces fluctuations reflètent sans aucun doute des fluctuations de la dynamique du couplage océan-atmosphère.

Peut-on déduire de ces observations une compréhension des régimes extrêmes (glaciaires et interglaciaires) qu'a connus notre planète et fonder des hypothèses sur les causes probables ou possibles des oscillations climatiques ? Peut-on comprendre et prévoir dès à présent l'effet que l'augmentation continue du taux de gaz carbonique que nous observons actuellement dans l'atmosphère, pourrait avoir sur l'équilibre ou la dynamique des climats de la Terre ? Le progrès de nos connaissances en ces domaines, comme en bien d'autres, passe non seulement par l'observation et l'expérimentation mais aussi par un effort de modélisation des processus d'Interaction océan-glace-atmosphère (IOGA). Une première étape en ce sens a été franchie pendant les années 1970 dans le cadre du programme AIDJEX (1) notamment, qui se fixait pour but essentiel de rendre compte de l'évolution journalière d'un domaine de la banquise d'environ 100 km d'extension horizontale, situé au cœur du pack, là où la concentration de la glace est de 100 % et où l'océan peut être considéré comme un milieu peu perturbateur. Au contraire, les zones marginales de la banquise, où la concentration tend vers zéro sont des zones d'interactions complexes des trois milieux en présence et, le modèle « AIDJEX » n'étant plus applicable, il paraissait logique et nécessaire d'entreprendre un programme d'étude de ces zones. C'est le programme international MIZEX (2) en cours.

Ce programme d'étude a été lancé par six pays : la Norvège (Institut de Bergen), les Etats-Unis (Polar Research Institute de Seattle), la Grande-Bretagne (Scott Polar Institute de

□ Jean-Claude Gascard, maître de recherche au CNRS, Laboratoire d'océanographie physique (LA 175), Muséum national d'histoire naturelle, 43, rue Cuvier, 75231 PARIS Cedex 05.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

Un aperçu du champ de glace dans lequel a évolué le brise-glace allemand « Polarsten » au cours de la campagne préliminaire MIZEX en juillet 1983. Les caractéristiques de la banquise observée à cet endroit (glace pluriannuelle) répondent à des conditions d'été (Cliché Marie-Noëlle Houssais).

Cambridge), la République fédérale d'Allemagne (Institut Alfred Wegener de Bremerhaven), le Canada (Institut de Bedford), auxquels la France et quatre autres pays européens se sont joints en 1982 (la Suède, le Danemark, l'Islande et la Suisse).

Le programme MIZEX, pour des raisons logistiques notamment, se déroule dans l'Arctique entre le Spitzberg et le Nord-Est du Groenland. La participation française peut se résumer :

– à la prise en compte de l'effet de l'océan et de l'atmosphère sur le développement de la glace en traitant notamment du problème de l'advection de glace, de chaleur et de sel par les courants en surface et en profondeur, ainsi que de certains effets dynamiques de résurgence (upwellings) créés par la tension du vent à la discontinuité glace-océan, et de certains effets thermodynamiques comme la convection thermohaline (formation des eaux profondes) ;

– au développement des algorithmes permettant par télédétection de déterminer les paramètres physiques de la glace : extension, concentration, âge, épaisseur, albedo. C'est là une partie importante de la préparation à l'utilisation des instruments embarqués sur le satellite européen ERS 1 dont le lancement est prévu en 1988. La mise en œuvre de trois systèmes radars hyperfréquences (GHz) : Ramses (embarqué), Erasme (héliporté) et Varan (aéroporté) est une contribution importante de la France au programme de télédétection. Elle permettra notamment d'élaborer, pendant la durée de l'expérience (juin-juillet 1984), des images (mosaïques) d'un champ de glace de 100 par 100 kilomètres environ tous les trois jours.

A l'issue de ce programme, il sera possible d'améliorer sensiblement le modèle de simulation des glaces de mer pour le rendre opérationnel non seulement dans les secteurs à forte concentration en glace (AIDJEX) mais aussi dans les secteurs à faible concentration (MIZEX). Ceci impliquera notamment de coupler un modèle océanique et atmosphérique de circulation générale à un modèle de glace qui traite plus spécialement du taux de croissance de la glace sous l'effet des interactions avec l'air et l'eau. Il est envisagé dans une phase ultérieure de développer un programme d'étude et d'observation dans l'océan antarctique, en Mer de Weddell, et dans le secteur de la Terre Adélie, notamment, pour tester et améliorer ces modèles couplés.

Les équipes françaises impliquées dans le programme MIZEX se situent principalement à Toulouse, au Centre national d'études spatiales et dans le Groupe de recherche en géodésie spatiale, pour traiter les aspects de télédétection, sous la responsabilité de N. Lannelongue, et à Paris, au Laboratoire d'océanographie physique du Muséum national d'histoire naturelle (laboratoire associé Muséum/CNRS), pour traiter des interactions Océan-Glace-Atmosphère, sous la responsabilité de J.C. Gascard. Ce programme de recherche est soutenu par le CNRS/PIROCEAN, le CNES, le CNEXO, et la commission des Communautés européennes dans le cadre de son programme « climatologie », en accord avec le programme national d'étude de la dynamique des climats (PNEDC).

(1) AIDJEX : Arctic Ice Dynamic Joint EXperiment
(2) MIZEX : Marginal Ice Zone EXperiment

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

« Un chercheur est avant tout un créateur »

Pierre Joliot explique le rôle de la photosynthèse et l'importance de la bioénergétique cellulaire. Il décrit aussi la vie d'une équipe de recherche, celle qu'il anime, avec un constant souci de liberté.

Monique Mounier-Kuhn – Qu'est-ce que la photosynthèse, dont vous êtes l'un des principaux spécialistes français ?

Pierre Joliot – La réaction photosynthétique qui se produit au sein des plantes vertes et des algues se traduit par la fixation de gaz carbonique qui est converti en substances organiques et par la production d'oxygène. Une telle réaction nécessite un apport d'énergie qui est fourni par la lumière absorbée par le pigment vert des plantes, la chlorophylle. La réaction photosynthétique joue un rôle essentiel dans les équilibres énergétiques de la biosphère. Elle est la source de la totalité des matières organiques consommées par les êtres vivants ainsi que des combustibles. Elle assure la stabilité de la composition de l'atmosphère terrestre en renouvelant de manière permanente l'oxygène consommé par l'industrie humaine.

La réaction photosynthétique se déroule au sein d'organelles spécialisées : les chloroplastes, à l'intérieur desquels se trouve un réseau extrêmement dense de membranes. C'est au sein de ces membranes que s'opèrent les réactions primaires du processus photosynthétique, celles qui en particulier permettent la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique.

□ Pierre Joliot, professeur au Collège de France, membre de l'Institut et membre de l'Académie des Sciences des Etats-Unis, a reçu en 1982 la Médaille d'or du CNRS pour l'ensemble de ses travaux dans le domaine de la photosynthèse, dont il est l'un des principaux spécialistes français. Au CNRS depuis 1954, nommé Directeur de recherche en 1974, Pierre Joliot dirige le service de photosynthèse de l'Institut de biologie physico-chimique de Paris. Il a accompli une œuvre remarquable tant par son originalité que par son retentissement auprès de la communauté scientifique nationale et internationale.

M.M-K. – Votre enseignement au Collège de France porte sur la bioénergétique cellulaire. Quel est son rôle ?

P.J. – La bioénergétique cellulaire concerne l'étude du métabolisme énergétique des cellules vivantes. Dans ce domaine, une petite molécule, l'adénosine triphosphate ou ATP, joue un rôle essentiel. L'hydrolyse de cette molécule qui libère une quantité importante d'énergie est associée à la presque totalité des réactions ou phénomènes physiologiques qui consomment de l'énergie. Les processus les plus efficaces permettant la synthèse d'ATP se déroulent au sein d'appareils membranaires convertisseurs d'énergie tels que la membrane des bactéries, les membranes internes des mitochondries ou les membranes internes des chloroplastes. L'ensemble de ces appareils comporte des chaînes de transfert d'électrons et c'est aux dépens de l'énergie libérée lors de ces réactions d'oxydo-réduction que s'effectue la synthèse d'adénosine triphosphate.

C'est le grand mérite d'un savant anglais, Peter Mitchell, d'avoir proposé une théorie unificatrice : l'hypothèse chimiosmotique, qui souligne le rôle physiologique essentiel que jouent les membranes dans les mécanismes de conversion d'énergie. Mitchell a tout d'abord montré que le fonctionnement des chaînes de transfert d'électrons s'accompagnait d'une traversée d'ions hydrogène à travers les membranes. Ces transferts d'ions hydrogène s'accompagnent donc de la formation d'un gradient d'ions hydrogène et d'une différence de potentiel électrique transmembranaire. C'est l'énergie osmotique et électrique qui permet ultérieurement la synthèse d'adénosine triphosphate. Deux concepts fondamentaux ont donc été introduits par Mitchell. En premier lieu, les transferts d'électrons et de protons ont un caractère vectoriel lié à l'orientation asymétrique des édifices protéiques par rapport au plan de la membrane. En second lieu, l'intervention de formes d'énergies délocalisées ne rend pas nécessaire un contact direct entre les catalyseurs de la chaîne de transfert d'électrons et ceux impliqués dans la synthèse d'adénosine triphosphate.

L'appareil photosynthétique se distingue des autres appareils convertisseurs d'énergie par le fait que certaines réactions de transfert d'électrons sont directement déclenchées par la lumière. Certaines molécules de chlorophylle intégrées dans les centres photochimiques ont la propriété de céder un électron à une molécule voisine après avoir été portées dans un état excité par l'absorption d'un photon. C'est au cours de ces étapes photochimiques que s'effectue la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique.

M.M-K. – Vos travaux portent la marque d'une originalité reconnue par la communauté scientifique. Pouvez-vous expliquer votre méthode ?

P.J. – L'étude de systèmes aussi complexes que les appareils membranaires convertisseurs d'énergie peut et doit être abordée à différents niveaux d'intégration. Certains chercheurs s'attachent à décomposer l'appareil photosynthétique en sous-ensembles fonctionnels tels que les édifices protéiques

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

impliqués dans les transferts d'électrons ou dans la collection de l'énergie lumineuse, et cherchent ensuite à déterminer leur structure et leur fonctionnement.

En ce qui me concerne, j'ai choisi de travailler à un niveau d'intégration déjà très complexe, c'est-à-dire au niveau des structures intactes telles que les chloroplastes dont nous essayons de comprendre les mécanismes de fonctionnement. Nous cherchons donc à remonter du compliqué au plus simple, par opposition à une approche synthétique qui analyse les éléments à partir desquels serait reconstituée la structure complète.

Une part importante de mon activité a consisté à mettre au point des méthodes physiques très spécialisées, adaptées à l'étude des structures complexes présentes dans l'appareil photosynthétique.

Ces méthodes mettent à profit l'une des caractéristiques exceptionnelles de l'appareil photosynthétique : la possibilité de perturber instantanément le fonctionnement de cet appareil en modifiant l'illumination.

On peut par une illumination de très courte durée, de l'ordre de quelques nano secondes, déclencher les réactions primaires du processus photosynthétique, et étudier les perturbations provoquées par ce bref éclair dans la chaîne de transfert d'électrons.

M.M.-K. – Vous concevez et mettez au point, le plus souvent, les instruments de votre laboratoire.

P.J. – J'y consacre une part importante de mon activité, en collaboration avec Daniel Beal, ingénieur au CNRS, qui travaille dans notre équipe. La symbiose de nos compétences nous a permis de réaliser des percées technologiques qui nous ont ouvert de nouveaux domaines de recherche.

M.M.-K. – Votre contribution porte essentiellement sur l'analyse biophysique. Est-ce le seul type d'approche dans votre laboratoire ?

P.J. – Des progrès dans l'étude d'un problème aussi complexe que l'appareil photosynthétique ne peuvent être espérés qu'en mettant en œuvre simultanément, et si possible dans le même laboratoire, des méthodes très variées.

Ce que nous essayons de réaliser au sein de notre équipe, c'est une approche pluridisciplinaire. Certains chercheurs comme Bruce Diner, maître de recherche au CNRS, se consacrent à l'analyse biochimique de l'appareil photosynthétique. D'autres, comme moi-même, sont spécialisés dans l'analyse biophysique ; un groupe dirigé par Pierre Bennoun, maître de recherche au CNRS, a développé des méthodes génétiques extrêmement puissantes, qui permettent de perturber différents éléments de l'appareil photosynthétique, simplifiant ainsi son analyse. Enfin, Francis-André Wollman, en collaboration avec Jacqueline Olive, du Laboratoire de microscopie électronique de l'Institut Jacques Monod, analyse la structure des membranes photosynthétiques.

Tout progrès dans notre domaine doit donc faire appel à des méthodes de pointe, mais aussi et surtout à la coordination de ces méthodes. L'approche multidisciplinaire des systèmes membranaires me paraît indispensable. C'est la seule qui soit aujourd'hui compétitive.

J'ai choisi, personnellement, une approche très spécifique et je me suis rendu compte que, pour aboutir, il est nécessaire de collaborer avec des chercheurs dont les concepts et les méthodes diffèrent des miens.

M.M.-K. – Quels sont les espoirs de la photosynthèse pour les applications ? Je pense notamment aux progrès que l'on peut en attendre en agronomie et en production d'énergie, grâce à la biomasse.

P.J. – En ce qui concerne les applications, je serai à la fois réservé et optimiste. Il serait imprudent de trop vouloir justifier les recherches réalisées dans le domaine de la photosynthèse par des promesses qui me semblent prématurées, par exemple dans le domaine de la production d'énergie. La réaction photosynthétique ne représente généralement pas un facteur limitant. Le rendement maximum énergétique de la réaction photosynthétique est de l'ordre de 30 % ; lors d'une culture les rendements de conversion d'énergie lumineuse en énergie chimique sont le plus souvent inférieurs à 1 %.

Ceci ne veut pas dire que l'on ne peut pas réaliser, par voies génétiques, des modifications de l'appareil photosynthétique, qui contribueraient à une

LES TRAVAUX DE PIERRE JOLIOT

Les travaux de Pierre Joliot se caractérisent par un équilibre entre la recherche de l'innovation technologique et la poursuite d'objectifs de recherche fondamentale.

La photosynthèse se traduit chez les végétaux supérieurs par un bilan réactionnel apparemment simple : l'oxydation de l'eau et la réduction du gaz carbonique, la production de sucres ou hydrates de carbone et le dégagement d'oxygène. Pourtant, elle nécessite une succession de phases complexes faisant intervenir les transporteurs d'électrons de la chaîne photosynthétique, des enzymes membranaires et une série de réactions chimiques ou photochimiques. C'est principalement aux mécanismes primaires d'activation photochimique et de transferts d'électrons dans la chaîne photosynthétique que Pierre Joliot s'est intéressé dès l'origine de ses travaux.

Plus précisément, ses efforts ont porté sur l'étude de l'une des régions de cette chaîne, le système II, qui comporte une réaction photochimique et se trouve étroitement associée à l'émission d'oxygène par oxydation du donneur terminal, l'eau. Cette région est également le siège de phénomènes caractéristiques d'émission lumineuse : la fluorescence et la luminescence.

L'approche de Pierre Joliot a d'abord été méthodologique, mettant au point une méthode ampérométrique de mesure de l'émission d'oxygène dans les systèmes photosynthétiques. Cette méthode extrêmement performante, donnant en particulier la possibilité d'observer la réponse de l'appareil photosynthétique à un éclair isolé, a été exploitée par de nombreux laboratoires.

Grâce à l'outil qu'il s'était ainsi donné pour étudier l'émission d'oxygène, Pierre Joliot a pu montrer que plusieurs étapes réactionnelles étaient nécessaires à la libération d'oxygène. Ce travail a conduit à l'une des découvertes les plus fondamentales concernant le photosystème II : la remarquable périodicité d'ordre 4 des oscillations de la réponse d'oxygène à des éclairs brefs et saturants qui traduit l'accumulation sur un même intermédiaire de quatre charges positives, condition nécessaire à la production d'une molécule d'oxygène. La théorie des « 4 états » est à la base d'un très grand nombre de recherches leur apportant un principe unificateur indiscuté. Les recherches de Pierre Joliot se sont développées avec une clairvoyance toujours renouvelée dans l'approche tant expérimentale que conceptuelle : elles ont porté notamment sur le problème des unités photosynthétiques et leurs relations réciproques à l'intérieur des membranes, sur l'étude fonctionnelle des centres photochimiques II, ainsi que sur les réactions de transfert d'électrons qui leur sont directement associées.

La constante amélioration et la mise au point de différentes méthodes d'analyse biophysique du processus photosynthétique, en particulier dans le domaine de la spectrophotométrie rapide, ont constamment accompagné ses recherches.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

Réplique obtenue par cryodécapage. Image des membranes et du contenu matriciel d'un chloroplaste de feuille d'orge. On remarque la membrane qui enveloppe le chloroplaste et les sacs membranaires internes, allongés, porteurs de pigments chlorophylliens. (Laboratoire de physiologie cellulaire végétale – LA 40 – Orsay – © CNRS).

meilleure adaptation de la plante à l'environnement.

Il me parait plus important d'insister sur le fait que des progrès réalisés dans le domaine de la photosynthèse permettront très probablement de mieux comprendre le fonctionnement des appareils membranaires convertisseurs d'énergie qui jouent un rôle essentiel chez tous les êtres vivants sans exception. Des applications pratiques peuvent alors être espérées dans les domaines les plus divers, allant de la médecine à la biotechnologie sans exclure évidemment les applications dans le domaine de la production de l'énergie. Il me parait cependant prématuré et dangereux de tenter dès maintenant d'en dresser l'inventaire.

M.M-K. – Dans quels pays la recherche vous parait-elle la plus active dans votre domaine ?

P.J. – En bioénergétique cellulaire, l'Europe est très bien placée dans la compétition internationale. La position de la France me parait excellente, en particulier pour les recherches sur les étapes primaires de la photosynthèse. Cette recherche est bien représentée au CNRS et au CEA. Entre le laboratoire de photosynthèse du CNRS à Gif-sur-Yvette, notre équipe et les chercheurs du CEA, les liaisons sont étroites.

M.M-K. – Quelles observations vous inspire votre récent voyage en Chine ?

P.J. – Nous avons été invités, ma femme et moi, par l'Académie des Sciences, l'Academia Sinica, de la République Populaire de Chine, pour un voyage de trois semaines. Nous avons pu visiter plusieurs laboratoires spécialisés dans la recherche sur la photosynthèse, à Pékin, à Tsin-Dao, à Shangaï.

Nous avons noué des contacts tout à fait passionnants et pu apprécier les progrès considérables réalisés dans notre domaine, au cours des six dernières années. Il faut savoir que la recherche scientifique avait été très éprouvée par la période de la révolution culturelle. Ce qui se traduit actuellement par un « déficit » important dans l'encadrement scientifique.

Le gouvernement chinois fait, semble-t'il, un très gros effort en faveur de la recherche fondamentale ; les chercheurs choisissent désormais leurs thèmes de recherche en toute liberté. On peut estimer que dans quelques années, le niveau de recherche de bien des laboratoires chinois sera comparable à celui que l'on rencontre dans les pays développés.

Toutefois, un problème me tient à cœur : la place nettement insuffisante qu'occupe la France dans ce renouveau de la science chinoise. En effet, en raison de l'insuffisance du nombre de cadres scientifiques, les laboratoires chinois envoient de très nombreux jeunes chercheurs se former dans des laboratoires étrangers. Or, actuellement la France n'offre pas encore assez de bourses, ce qui met notre pays en position défavorable par rapport aux Etats-Unis et à l'Allemagne Fédérale, par exemple. Il faut le souligner : c'est maintenant que se forment les cadres qui vont diriger la recherche en Chine et lui donner un nouvel élan.

Si nous manquons ce rendez-vous, ce passage des chercheurs chinois dans les laboratoires français, nous courons un sérieux risque, à long terme, pour les possibilités d'une coopération scientifique féconde entre la France et la Chine.

Pour la vitalité de la recherche, l'interaction entre les hommes, entre les équipes et entre les laboratoires français et étrangers est essentielle.

M.M-K. – Pour vous, qu'est-ce qu'un chercheur ? Comment concevez-vous l'animation d'une équipe de recherche ?

P.J. – Ma conception de l'animation d'une équipe de recherche est directement liée à ma conception du chercheur.

Un chercheur est avant tout un créateur et la création scientifique est un acte individuel.

Mais l'évolution de la recherche et l'extraordinaire complexité des problèmes que nous étudions fait qu'un chercheur isolé n'a que peu de chances d'être compétitif.

Dans notre domaine de recherche, cette évolution est relativement récente : j'ai pu, il y a une vingtaine d'années, travailler presque isolé et d'une manière efficace.

Aujourd'hui, une telle situation est révolue. Je le regretterais presque, mais il faut en prendre acte.

Animer une équipe de recherche, c'est tenter de concilier ce qui peut apparaitre inconciliable : respecter le caractère individuel de la recherche, tout en intégrant les individus au sein d'un ensemble, en établissant des collaborations interdisciplinaires.

Pour le moment, cet équilibre est à peu près réalisé à l'intérieur de notre groupe : les jeunes chercheurs sont totalement responsables de leur travail, mais tous les chercheurs s'appuient les uns sur les autres, tant sur le plan conceptuel que sur le plan méthodologique.

Les collaborations au sein de notre équipe sont nombreuses mais très variables. Tout le problème, c'est de maintenir cet équilibre instable : éviter d'une part que le système ne se fragmente en de petites unités indépendantes les unes des autres, et, d'autre part, qu'une forte personnalité ne s'impose d'une manière trop directive.

Le profil psychologique des chercheurs composant une équipe est primordial : un excès d'ambition personnelle peut annuler les possibilités de coopération. Il y a une quizaine d'années j'assurais entièrement la direction scientifique de notre équipe. Maintenant, cette direction scientifique m'échappe dans bien des domaines dans lesquels je ne suis pas suffisamment compétent. Mon rôle essentiel, c'est l'animation et la coordination bien plus que la direction proprement

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

dite. Je suis bien sûr en charge de certains domaines, notamment la création de technologies et de méthodologies nouvelles, mais ceci ne représente plus qu'un des volets de notre activité.

Nous tendons à encourager la diversification des compétences en cherchant à garder une cohérence des problèmes étudiés. Il faut qu'il y ait suffisamment de préoccupations communes pour que la nature individualiste des chercheurs soit fécondée par la recherche collective. Mais les laboratoires peuvent fonctionner selon un schéma différent du nôtre : il n'y a pas une structure unique, idéale, de laboratoire.

L'un des vices du système français est de vouloir toujours définir un seul type d'organisation que l'on essaie d'appliquer et de généraliser. Par exemple, au CNRS, certaines incompréhensions ont sans doute été liées au fait que les conditions de travail idéales d'un physicien et celles d'un biologiste sont radicalement différentes. Il faut donc éviter que le physicien n'impose au biologiste sa structure de travail et inversement.

Gardons à l'esprit qu'à chaque domaine de recherche doit correspondre une certaine organisation « sociale ».

M.M.-K. – Quelles ont été les étapes de votre carrière ?
Quelles sont les personnalités et les institutions qui vous ont aidé ?

P.J. – Ma carrière est assez typique de celle d'un chercheur français : elle est marquée par une exceptionnelle stabilité. Je suis entré à l'Institut de biologie physico-chimique, il y a 25 ans... et je ne me suis déplacé que d'une dizaine de mètres, au même étage ! C'est un reproche que l'on fait à la recherche française : la stabilité y est parfois excessive. Mais je n'ai pas le sentiment d'en avoir souffert.

J'ai eu la chance de travailler dans un Institut dont l'organisation est, à mon avis, remarquable, car il laisse à tous les laboratoires qui le constituent une grande indépendance. Cette « décentralisation » du pouvoir est un facteur tout-à-fait positif.

J'ai eu une autre chance : celle de travailler, au début de ma carrière, sous la direction de René Wurmser qui laissait un maximum d'autonomie à tous les chercheurs, y compris les plus jeunes. Dès que je suis entré dans ce laboratoire, j'ai eu l'impression d'être le maître d'œuvre de mon travail. La personnalité des différents chercheurs pouvait ainsi s'épanouir en toute liberté.

En ce qui concerne les institutions, indépendamment de l'Institut de biologie physico-chimique dont je viens de parler, c'est le CNRS qui m'a offert des conditions de travail proches de l'idéal : j'ai pu me consacrer entièrement à ma recherche sans en être détourné par des tâches extérieures. Un autre élément très important lié à la fois au CNRS et à mon « patron », René Wurmser, c'est le fait que je n'ai pas été placé trop tôt dans une atmosphère de grande compétition.

On dit volontiers que le système français n'est pas assez compétitif ; il faut voir aussi les avantages qu'offre une atmosphère où la compétition n'est pas trop sévère, pour favoriser l'épanouissement des jeunes chercheurs. On peut alors prendre le temps d'aborder des sujets à « haut risque » qui exigent plus de temps pour déboucher sur des résultats concrets.

Pendant les deux premières années de ma carrière, je n'ai produit que peu de publications scientifiques ; mais cette période d'initiation m'a permis de choisir des « créneaux » de recherche plus spécifiques et plus originaux, qui m'ont ensuite placé dans une situation favorable par rapport à la compétition internationale.

Une atmosphère de compétition permanente imposée trop tôt à de jeunes chercheurs peut conduire à une stérilisation de leur recherche, en les forçant à choisir des sujets dont on est sûr qu'ils vont donner des résultats à court terme : de tels sujets n'apportent généralement rien sur le plan conceptuel.

M.M-K. – Vous évoquez volontiers l'environnement intellectuel de vos jeunes années.

P.J. – De l'enseignement de mes parents, je retiendrai avant tout que la pratique de la recherche doit se rapprocher le plus possible d'une activité artistique et qu'il faut privilégier surtout l'originalité et la créativité. Entre la création artistique et la création scientifique qui est une sorte de jeu passionnant, il y a beaucoup de points communs.

Dans la vision qu'on a de la science, actuellement, on a trop tendance à mettre en lumière l'aspect logique. La création implique avant tout une intuition, c'est-à-dire une aptitude à une association de concepts et de faits expérimentaux qui se produit hors de toute logique. Celle-ci ne vient qu'après, pour vérifier, confirmer ou réfuter.

M.M-K. – Issu d'une famille de physiciens, vous êtes devenu biologiste. Pourquoi cette vocation ?

P.J. – Le terme de « vocation » s'applique mal à ce choix : je suis entré dans ce métier sous la pression du milieu scientifique qui m'entourait, parce que c'était la voie naturelle. Cette notion de vocation, je ne l'ai découverte qu'en commençant à travailler : je n'ai été convaincu de l'extraordinaire intérêt du métier de chercheur que lorsque j'ai commencé à le pratiquer.

M.M-K. – Mais pourquoi la biologie ?

P.J. – C'est un choix dans lequel mes parents, surtout mon père, ont eu un rôle déterminant. Mon père, qui était physicien nucléaire, a travaillé à une époque où la physique nucléaire était encore une science relativement « légère ». Le temps qui s'écoulait alors entre la conception d'une expérience, sa réalisation et son interprétation était relativement court. Ce qui donnait au chercheur la possibilité de laisser librement s'exprimer sa créativité.

Mon père m'a fortement conseillé de me tourner vers la biologie : il pensait que seul ce domaine de recherche scientifique pouvait encore offrir des conditions de travail et de liberté comparables.

Force est de constater que les aspects pluridisciplinaires des recherches, les moyens techniques à mettre en œuvre, l'informatique, l'électronique..., tout concourt à rendre les sciences de plus en plus « lourdes », donc plus coûteuses. Et on risque de leur faire perdre cette spontanéité qu'avaient toutes les sciences à leurs débuts. La biologie n'y échappe pas : c'est une évolution irréversible.

Comment conserver une part de créativité suffisante sans franchir un seuil de dépenses inacceptable pour la société ? C'est le grand problème de la science future.

Entretien réalisé par
Monique Mounier-Kuhn

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

DERNIERE HEURE
Voir page 23

L'accélérateur national Saturne et son programme expérimental

Dans cet article, l'auteur présente l'accélérateur national Saturne : son fonctionnement, son programme expérimental nucléaire et hors physique nucléaire ainsi que les nouveaux développements prévus.

Pierre RADVANYI

Le nouvel accélérateur Saturne fonctionne maintenant depuis environ cinq ans. Il est national à double titre : d'abord, parce que le Laboratoire national Saturne (LNS), créé au début de 1978 sur le site de Saclay, est géré et financé conjointement par l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3) du CNRS et par l'Institut de recherches fondamentales (IRF) du commissariat à l'énergie atomique (CEA), et, d'autre part, parce que viennent y travailler des équipes de toute la France. Son objectif est la physique des énergies intermédiaires, c'est-à-dire le domaine charnière entre la physique du noyau et la physique des particules. Le laboratoire est doté d'équipements lourds, notamment de spectromètres magnétiques – les SPES – qui constituent une de ses originalités. Le programme expérimental prend maintenant de l'ampleur en se diversifiant.

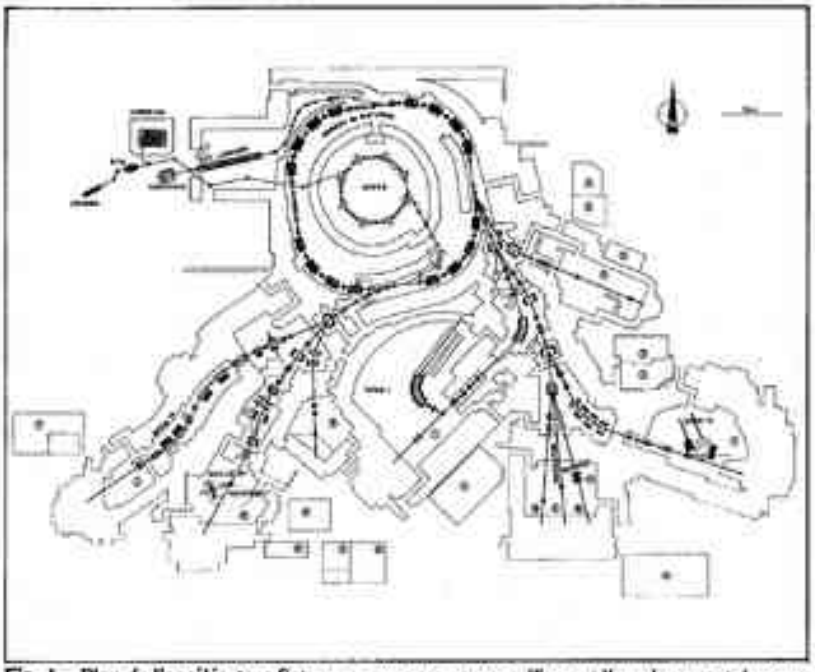


Fig. 1 – Plan de l'accélérateur Saturne – avec ses sources d'ions et l'emplacement du nouvel injecteur MIMAS – et de ses 9 postes expérimentaux répartis sur 7 zones. Les positions des cibles sont matérialisées par des points noirs. On peut distinguer les aimants dipôles et quadrupôles de la machine et des lignes de faisceau.

Les outils

Saturne II (le plan est donné dans la figure 1), qui a remplacé l'ancien accélérateur Saturne, est un synchrotron où les fonctions d'accélération et de guidage des ions sont séparées ; c'est une machine à fonctionnement cyclique.

A l'intérieur du grand anneau, au cours de chaque cycle, les particules sont accélérées sur une même orbite, donc à rayon constant (focalisation forte) ; le champ magnétique qui guide leur trajectoire doit, par conséquent, croître régulièrement pendant la phase d'accélération – relativement courte – et demeure constant au cours de la période de déversement (durée de bombardement de la cible étudiée).

La durée du cycle est de 0,8 à 3,5 secondes selon l'énergie que l'on veut atteindre. La période de déversement, que l'on cherche à rendre la plus longue possible pour faciliter les mesures de coïncidences *, est de l'ordre de 0,4 secondes. La période d'accélération dépend de l'énergie à atteindre : pour des protons de 2,9 GeV ($2,9 \times 10^9$ électrons-volts), elle atteint 0,5 secondes. Pour arriver à cette énergie les protons font environ un million de tours dans l'anneau.

Grâce à la focalisation forte les particules ont une trajectoire qui s'écarte peu de l'orbite moyenne, tout le long du cycle d'accélération, permettant ainsi l'utilisation d'une chambre à vide (à l'intérieur de l'anneau) et d'aimants (champ magnétique de guidage) de dimensions relativement modestes : le coût de l'ensemble reste ainsi dans des limites raisonnables.

L'injection dans l'anneau se fait au moyen d'un accélérateur linéaire précédé d'une source d'ions. Les ions que l'on utilise actuellement sont produits par deux sources différentes qui fonctionnent en alternance en tête de machine. La plus ancienne, « Amalthée », fournit des protons, des deutons, des noyaux d'Hélium 3 (^{3}He) et des particules alpha (^{4}He). L'autre, la plus récente, « Hyperion », produit des protons et des deutons polarisés (les spins des particules sont dans la même direction).

□ Pierre Radvanyi, directeur de recherche au CNRS, est directeur-adjoint du Laboratoire national Saturne, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex.

* Les mots signalés par un astérisque sont définis dans le glossaire de la page 23.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

Saturne II est le premier synchrotron à focalisation forte où des protons polarisés ont pu être accélérés jusqu'à l'énergie de 2,9 GeV (maximum atteint par la machine) à travers les différentes résonances dépolarisantes*

Une troisième source, « Cryebis », qui produit des ions lourds (voir encadré 1), est en cours de mise au point en tête de machine.

A la sortie de leur source les protons et ions plus lourds doivent être portés à une énergie de départ (avant d'être injectés dans l'anneau), ils doivent donc être « pré-accélérés ». A cette fin, « Amalthée » comporte un générateur haute-tension sous pression ; « Hypérion » se trouve sur une plate-forme haute-tension qui peut être montée à 190 ou 380 KV. « Cryebis » est couplée à un nouveau type de pré-accélérateur en cours de mise au point, une RFQ (cavité radiofréquence quadrupolaire) où les quatre pôles modulés longitudinalement permettent de réaliser simultanément trois fonctions : la pré-accélération, la focalisation du faisceau de particules et leur regroupement dans le temps.

La souplesse d'utilisation d'un synchrotron est grande : les changements d'énergie sont rapides ; on peut employer des protons de 200 MeV à 2,9 GeV et les autres particules aux impulsions correspondantes. L'intensité du faisceau extrait peut atteindre, en protons, 10^{12} par cycle ; en protons polarisés elle peut être de $3{,}5.10^{9}$ par cycle.

Saturne II possède actuellement des caractéristiques originales et uniques par rapport à ses concurrents, notamment les qualités de ses faisceaux. Il faut dire ici que pour réaliser le programme expérimental en physique des énergies intermédiaires les faisceaux de particules extraits doivent avoir des qualités « nucléaires » (voir encadré 2). Les performances de Saturne II vont être notablement améliorées par la construction d'un nouvel injecteur : ce sera un petit anneau synchrotron, baptisé « MIMAS », qui sera monté au milieu du grand. Le développement et l'ouverture apportés par MIMAS sont indispensables pour conserver à Saturne son originalité au cours des années à venir (voir encadré 3).

Deux faisceaux peuvent être extraits simultanément sur deux des sections droites de l'anneau et à partir de là peuvent irriguer l'ensemble des aires expérimentales, divisées en neuf postes expérimentaux (voir figure 1). Sur chacun de ces postes peut être placée une « cible », constituée par les noyaux atomiques à étudier, comme autant de préparations pour un grand microscope.

Autour de la cible sont disposés les détecteurs reliés aux casemates d'électronique où se tiennent les expérimentateurs. Un des équipements les plus originaux de Saturne est constitué par ses spectromètres magnétiques, les SPES, qui analysent en impulsion les particules sortant des cibles à différents angles (y compris 0°).

SPES I permet la meilleure résolution * : 90 KeV à 1 GeV, SPES III (voir figure 2) associe un grand angle solide à une grande acceptance en impulsion (la détection dans le plan focal de particules émises en coïncidence est ainsi possible) ; SPES IV permet d'analyser jusqu'à l'impulsion maximum atteinte par Saturne. On a réutilisé pour construire SPES III la culasse du premier cyclotron de Saclay et pour SPES IV une partie des aimants de l'anneau du premier Saturne. Le spec-

1

SOURCES D'IONS LOURDS « CRYEBIS » ET « DIONE »

La source d'ions « Cryebis », construite à Orsay et mise au point à Saclay, vient d'être montée en tête de machine. Cette source va permettre d'accélérer dans Saturne des ions lourds – c'est-à-dire des noyaux plus lourds que l'hélium – jusqu'à l'argon, complètement épluchés de leurs électrons. Leur énergie pourra atteindre 1,1 GeV/nucléon, le domaine des ions lourds relativistes, c'est-à-dire de vitesses voisines de celle de la lumière. Cryebis fournit actuellement, d'une manière stable, quelques 10^{8} noyaux de $^{14}N^{7+}$ et de $^{20}Ne^{10+}$ par impulsion.

Pour aller plus loin en intensité, et éplucher jusqu'à la couche L les ions plus lourds, une nouvelle source plus performante, « Dioné », est en construction. Dans Dioné le champ magnétique sera uniforme – à 1 % près – sur un mètre de longueur et le faisceau électronique, qui épluche les ions de leurs électrons, sera accéléré à 30 KV. On espère ainsi arriver à environ 10^{11} charges par impulsion. La consommation en hélium liquide de la nouvelle source sera beaucoup plus faible que celle de la source actuelle.

2

PERFORMANCES DE SATURNE – LE FAISCEAU – L'INJECTEUR MIMAS

● Performances de Saturne :
Saturne possède des caractéristiques particulièrement attrayantes : une grande variabilité en énergie (en protons d'environ 200 MeV à 2 900 MeV) ; une grande variété de projectiles possibles, y compris des particules polarisées, des qualités de faisceau très bonnes pour la physique nucléaire ; un parc de spectromètres magnétiques diversifié. Aucun autre accélérateur de physique nucléaire dans ce domaine ne réunit à la fois toutes ces caractéristiques ; de ce fait Saturne possède actuellement un caractère original et unique par rapport à ses concurrents dans le monde.

● Le faisceau :
L'émittance * doit être faible : elle est inférieure à 7π mm.mrad dans les deux plans, ce qui est indispensable pour la mesure précise des distributions angulaires caractéristiques des réactions nucléaires ; la largeur relative en énergie du faisceau extrait est de : $2{,}5.10^{-4}$, ce qui est nécessaire aux énergies de Saturne si on veut séparer les premiers niveaux d'énergie des noyaux ; le cycle utile est élevé (40 % pour les protons de 1 GeV) et il n'y a pas de structure HF * pendant toute la durée du déversement, ce qui permet des mesures de coïncidences, très importantes en physique nucléaire, et raccourcit par ailleurs la durée des mesures.

● L'injecteur MIMAS :
Le nouvel injecteur Mimas (nom d'un satellite de Saturne), est un petit anneau synchrotron qui sera placé au milieu du grand. L'accélérateur linéaire d'injection actuel en effet, lors de sa construction, a été optimisé pour les protons et son efficacité est plus petite pour les autres particules ; il ne peut pas accélérer d'ions plus lourds que l'argon. Mimas par contre aura une grande acceptance ; il pourra stocker de 6 à 7 impulsions venant de Cryebis (pour Z/A~0,5) ou les particules polarisées venant d'Hyperion. Mimas sera composé de 8 aimants dipôles et de 16 quadrupôles ; le vide dans son anneau sera d'environ 5.10^{-10} torr ; il accélérera les protons à 47 MeV et les ions lourds à 12 MeV par nucléon (pour Z/A = 0,5) avant de les injecter dans l'anneau principal. Avec Mimas, on gagnera à la sortie de Saturne de un à deux ordres de grandeur en intensité pour les particules polarisées et les ions lourds, et il deviendra possible également de réaliser des faisceaux d'ions relativistes plus lourds que l'argon, au delà du xénon, jusque vers la masse 200. La construction de MIMAS a commencé au deuxième semestre de 1983 et doit s'achever fin 1986.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

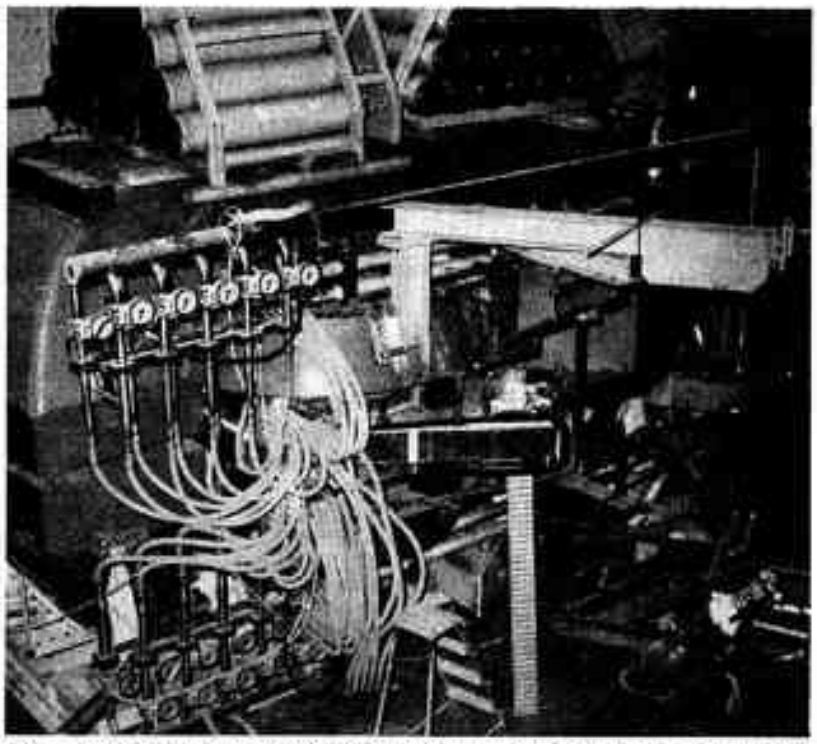


Fig. 2 – Photo du spectromètre SPES III mobile sur coussin d'air avant montage de la détection construite par une collaboration Orsay-Strasbourg. Au centre, la sortie de la chambre à vide. A gauche, on distingue la coupure de la culasse permettant le passage du faisceau primaire (cliché CEA)

tromètre SPES II a été prêté pour quelques années pour un programme expérimental au CERN à Genève.

Le programme expérimental

On décrit généralement l'interaction forte entre les constituants du noyau, les nucléons, comme l'échange d'un ou de plusieurs mésons π [3] chargés ou neutres ; les nucléons sont considérés comme entourés d'un nuage de mésons. On admet aujourd'hui également que les nucléons contiennent eux-mêmes 3 quarks [4], de charge fractionnaire, que l'on n'a pas pu jusqu'ici mettre en évidence à l'état libre et que l'on suppose par conséquent confinés à l'intérieur du nucléon. Ces deux descriptions présentent des aspects contradictoires entre elles, que l'on s'efforce maintenant d'élucider. Obtenir des données expérimentales sur les effets des quarks ainsi que sur les degrés de liberté mésiques dans les noyaux – ce que l'on peut appeler la physique nucléaire à courte distance – est un des éléments essentiels du programme expérimental de Saturne.

Un autre problème majeur est l'étude des phénomènes collectifs, coopératifs, dans les noyaux : on recherche les effets qui dans une réaction nucléaire sont dus à l'action coopérative, cohérente, de plusieurs nucléons, et non pas seulement à la superposition incohérente d'interactions nucléon-nucléon isolées. Ce problème sera au centre des expériences qui seront faites avec les ions lourds.

Le programme expérimental auprès de Saturne est actuellement construit autour de ces idées de base. Nous allons le résumer succintement, puis décrire plus en détail trois expériences représentatives.

Une fraction notable du temps d'accélérateur est consacrée à l'étude de l'interaction nucléon-nucléon (N-N) elle-même : celle-ci comprend un programme général systématique de longue haleine et des expériences plus ponctuelles qui font l'objet de plusieurs collaborations. L'interaction N-N, qui n'est bien connue que jusque vers 600 MeV, dépend notamment de l'orientation relative des spins des nucléons ; une partie de ces mesures se fait donc avec un faisceau de nucléons polarisés sur une cible de protons polarisés ; on étudie l'interaction neutron-proton aussi bien que l'interaction proton-proton.

Les effets des quarks pourraient apparaître dans des structures particulières à 6 quarks, les dibaryons ; leur recherche est le but de plusieurs expériences.

Plusieurs études recherchent les manifestations du cœur répulsif de l'interaction N-N dans les noyaux, des degrés de liberté mésiques, du rôle et de l'interaction des résonances delta dans les noyaux (la résonance Δ est le premier état excité du nucléon). Des expériences sont effectuées sur la production de mésons et de résonances baryoniques [5], ainsi que sur la formation possible d'états delta-trou [6] dans les noyaux.

Les travaux réalisés portent également sur les propriétés des systèmes à petits nombres de nucléons, sur les symétries et sur les lois de conservation. Des expériences ont été et sont effectuées pour une meilleure connaissance des formes des noyaux, des distributions spatiales des neutrons, pour la recherche et la compréhension de certaines résonances géantes, des réactions de fusion et de fission aux énergies intermédiaires.

On se prépare, en particulier avec les faisceaux de particules alpha, aux expériences avec les ions lourds relativistes. Cette dernière partie du programme comprendra l'étude des collisions centrales, de la production de π et de Δ dans les collisions périphériques, de la diffusion élastique et inélastique, des réactions d'échange de charge et de fragmentation.

Pour illustrer ce programme, trop vaste pour être traité en détail, à titre d'exemples, trois expériences particulières sont décrites dans l'encadré 3.

Utilisation de Saturne en dehors de la physique nucléaire :

– La mise au point de détecteurs pour la physique des particules bien sûr, mais aussi pour la recherche spatiale en astrophysique. Les particules accélérées dans Saturne sont de même nature et ont des énergies comparables à une partie de celles que l'on cherche à étudier dans le rayonnement cosmique.

– Un programme de mesures en vue de définir un projet allemand de source de neutrons de spallation qui serait utilisée pour des recherches en physique de la matière condensée : les protons de 500 MeV à 2 GeV provoquent dans les noyaux lourds des réactions pouvant donner lieu à l'émission d'un grand nombre de nucléons et plus particulièrement de neutrons (réactions de spallation). Ces nucléons secondaires, à leur tour (s'ils sont encore assez énergiques), produisent de nouvelles réactions nucléaires. Grâce à cette multiplication, et en utilisant judicieusement des matériaux ralentisseurs, on peut espérer obtenir des flux de neutrons lents comparables à ceux des réacteurs

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

TROIS EXEMPLES D'EXPERIENCES EN COURS

a) Dans le cadre des expériences sur l'interaction élémentaire nucléon-nucléon, un groupe du D.Ph.N-ME (1) de Saclay, en collaboration avec le LNS, a mis au point une installation de « jets croisés » : un jet d'hydrogène gazeux traverse à 90° le faisceau interne de particules accélérées dans l'anneau de Saturne, formant ainsi une cible interne de faible épaisseur (environ 10^{-10} g/cm²) permettant les traversées multiples. Des détecteurs sont placés à quelques centimètres du faisceau et mesurent la coïncidence entre proton de recul et particule diffusée. Une telle installation permet des mesures en fonction continue de l'énergie lorsque le faisceau est progressivement accéléré dans la machine. La détermination de la fonction d'excitation de 300 MeV à 2,9 GeV (éventuellement avec un faisceau polarisé) est susceptible de révéler, si elles existent, des structures de résonances. La figure 3 montre les premiers résultats obtenus pour la diffusion proton-proton avec les jets croisés.

b) Une collaboration Copenhague – Lund – Indiana – Lyon – Orsay – LNS étudie la réaction d'échange de charge (^{3}He,t) avec le spectromètre SPES IV autour de 0°. Dans ces conditions intervient la composante de l'interaction élémentaire N-N qui fait basculer simultanément le spin et l'isospin d'un nucléon du noyau-cible : on peut obtenir ainsi l'excitation « géante » d'un ou de plusieurs états résonants de basse énergie (dits de Gamow-Teller) ; on peut aussi provoquer l'excitation interne du nucléon (« retournement » d'un quark) et créer ainsi une résonance Δ. C'est ce qui a été observé expérimentalement à Saturne (voir figure 4). Une telle excitation du Δ ne correspond pas seulement à un transfert d'énergie (250 à 300 MeV), mais aussi à un transfert d'impulsion : ce transfert d'impulsion se reporte-t-il entièrement sur le Δ – on aurait alors une production quasi-libre –, ou bien est-il absorbé par l'ensemble du noyau, le nucléon excité ne rompant pas sa liaison avec le reste du noyau – on aurait alors une création d'états Δ-trou (ΔN^{-1}) ? Les expériences en cours s'efforcent de déterminer la part de chacun de ces deux phénomènes.

c) Pour étudier les collisions centrales d'ions lourds relativistes (réactions noyau-noyau), une collaboration DPh.N/ME (1) et DPh.N/MF (2) de Saclay, Clermont-Ferrand et Strasbourg, a construit un ensemble de détection, baptisé « Diogène », constitué de chambres à dérive multifils à projection temporelle formant dix secteurs placés dans un

(1) DPh.N/ME : Département de physique nucléaire, service de moyenne énergie.
(2) DPh.N/MF : Département de physique nucléaire, service de la métrologie et de la physique neutronique fondamentale.

3

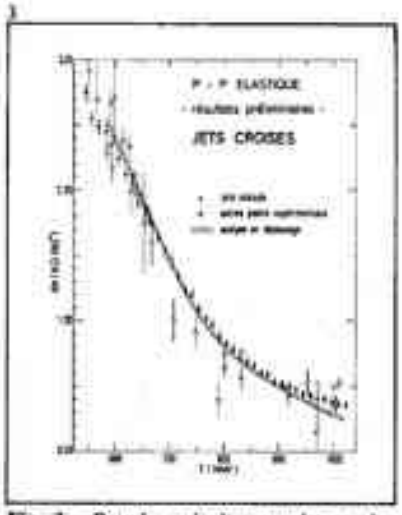


Fig. 3 – Premiers résultats en jets croisés : fonction d'excitation proton-proton à 90° (Col. D.Ph.N/ME, Saclay – LNS).

4A

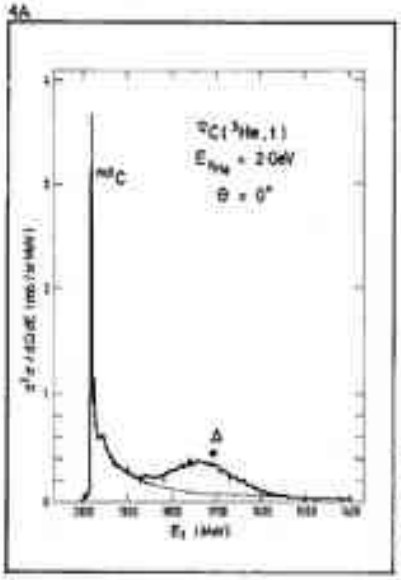
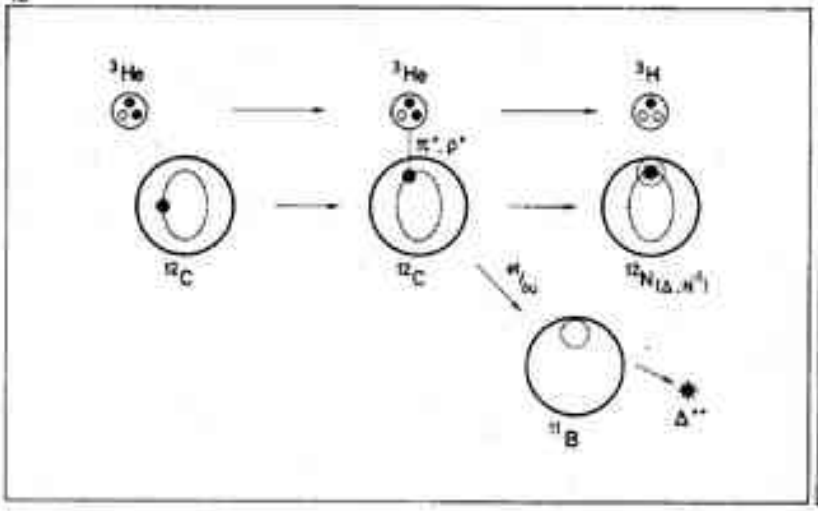


Fig. 4A – Observation de la résonance géante de Gamow-Teller et de la résonance Δ à 0° dans la réaction d'échange de charge à 2 GeV sur le carbone (Collaboration Copenhague, Indiana, Lund, Lyon, Orsay, LNS).

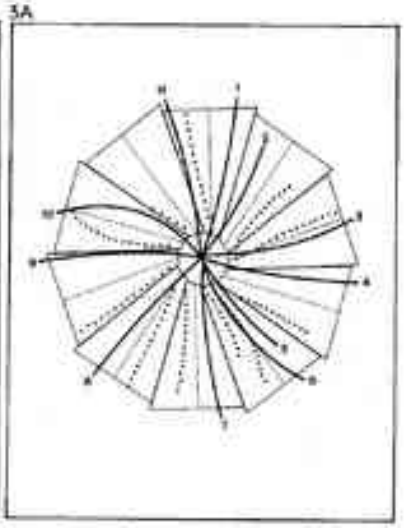
Fig. 4B – Les deux mécanismes possibles pour la production de la résonance Δ par échange de charge : création d'états Δ-trou et/ou production quasi-libre.

Fig. 5 – Un événement observé dans Diogène lors d'une réaction de particules α de 3,2 GeV avec des noyaux de ^{208}Pb.
a) en coupe transverse. En trait noir, les trajectoires de particules chargées provenant de la cible reconstruites par calculateur. En pointillé, trajectoires-image fictives. b) même événement en coupe longitudinale. c) coupe longitudinale du détecteur 4π Diogène et de l'aimant qui l'entoure (Collaboration D.Ph.M/ME, D.Ph.N/ME, Saclay, Strasbourg, Clermont-Ferrand).

4B



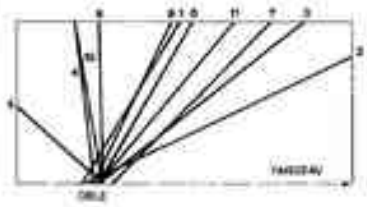
5A



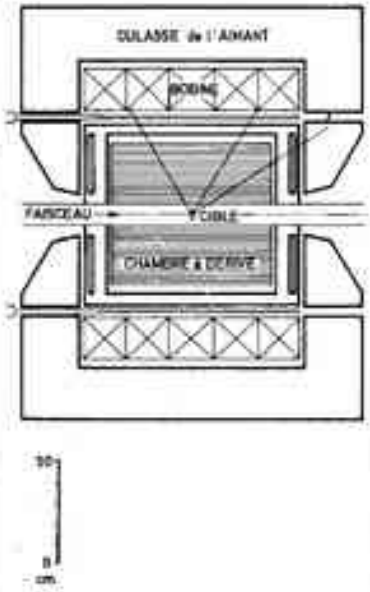
Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

champ magnétique axial et entourés de scintillateurs de déclenchement. Cet ensemble, couvrant un angle solide de près de 4π permet de reconstruire dans l'espace au moyen d'un calculateur les trajectoires de toutes les particules chargées émises dans une collision centrale. On peut ainsi étudier les événements à grande multiplicité de particules (jusqu'à 40) ; l'ambiguïté droite-gauche est levée par l'inclinaison des chambres par rapport au rayon. Diogène est maintenant au point ; une première expérience sur les interactions de particules α de 3,2 GeV avec des noyaux de carbone et de plomb est en cours (voir figure 5). Diogène permettra notamment de rechercher s'il existe des angles privilégiés dans les collisions à grande multiplicité ainsi qu'une éventuelle formation de matière nucléaire de densité supérieure à la normale au cours des réactions avec des ions lourds relativistes.

5B



5C



DERNIERE HEURE

Le 5 mars dernier a été obtenu à Saturne un premier faisceau d'ions lourds relativistes : environ 3.10^7 noyaux d'azote complétement épluchés par cycle ont été extraits, après production dans la source « Cryebis », pré-accélération dans la RFQ et accélération dans Saturne à 13 GeV (930 MeV par nucléon), soit à une énergie cinétique correspondant sensiblement à leur masse au repos.

nucléaires de recherche. Ces flux peuvent être facilement pulsés.

– L'étude et la mise au point de la radiographie nucléaire par protons ; il est notamment possible de réaliser une cartographie en profondeur de l'hydrogène dans les tissus ou les matériaux ; les protons incidents sont diffusés par chocs élastiques ; la détection simultanée du proton diffusé et du proton de recul signe la présence de l'atome d'hydrogène. Les détecteurs sont constitués de grands scintillateurs et d'une succession de plusieurs chambres à fils.

– Des expériences de microdosimétrie et de radiobiologie, en particulier pour déterminer les radiolésions de l'ADN et suivre leur réparation.

Les utilisateurs

Les utilisateurs de Saturne sont actuellement au nombre d'environ 260. Sur ce nombre, un quart environ sont des physiciens nucléaires appartenant à des laboratoires du CEA, un quart des physiciens nucléaires de laboratoires de l'IN2P3 et des universités (dont les 2/3 de province) ; une grande partie de ces physiciens consacrent l'essentiel de leur temps aux expériences auprès de Saturne. Un peu plus d'un autre quart représente des physiciens nucléaires de différents laboratoires étrangers ; les autres utilisateurs sont des ingénieurs et des non-nucléaires.

La plupart des expériences sont le fruit de collaborations entre plusieurs laboratoires ; de 5 à 25 physiciens participent à une même expérience.

Les laboratoires CEA sont essentiellement ceux du département de physique nucléaire (DPhN) de Saclay ; quelques expérimentateurs viennent également du département de physique des particules élémentaires. Pour l'IN2P3 et les universités, on trouve en physique nucléaire : pour la région parisienne, l'Institut de physique nucléaire d'Orsay et une petite équipe associée ; pour la province, les laboratoires de Strasbourg, Lyon, Clermont-Ferrand, Grenoble, quelques physiciens d'Annecy, et un physicien de Caen.

Parmi les laboratoires étrangers ayant envoyé plusieurs physiciens à Saturne, citons : l'université de Californie à Los Angeles, l'université Rutgers, le collège William and Mary, Jülich, Bonn, Darmstadt, Copenhague, Lund, l'université d'Alberta, Neuchatel, Trieste, Frascati, Leningrad-Gatchina, Moscou et Tokyo.

Glossaire

Coïncidences : Détection simultanée de deux (parfois plusieurs) particules correspondant à un même événement, (à une même réaction nucléaire).

Cycle utile : Rapport entre la durée d'irradiation de la cible / le temps total.

Dibaryon : Dans le modèle des quarks, 6 quarks pourraient se trouver confinés ensemble dans un certain volume : on parle alors d'un dibaryon.

Emittance : Produit de l'ouverture angulaire du faisceau par sa dimension transverse dans un plan focal.

Etat delta-trou : Lorsqu'un nucléon du noyau passe dans un état d'excitation supérieur, il se forme un état particule-trou. De même lorsqu'un nucléon du noyau est excité intrinséquement, devenant une résonance baryonique Δ, il peut se former un état delta-trou.

Mesons : Particules élémentaires éphémères véhiculant l'interaction forte.

Quarks : On pense que le nucléon est constitué de 3 grains élémentaires de matière, constituants ultimes, les quarks, de charge 2/3 et 1/3, confinés dans un même volume.

Résolution en énergie : Largeur en énergie instrumentale par rapport à l'énergie cinétique totale.

Résonance baryonique : Etat excité du nucléon ; le Δ en est un exemple.

Résonance dépolarisante : Perturbation résonante du mouvement d'une particule accélérée qui peut conduire à « perdre » la direction de son spin.

Structure HF : L'intensité du faisceau peut être modulée par la haute fréquence de la tension accélératrice, ce qui gêne l'expérimentation.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

L'intérieur du soleil et la sismologie solaire

L'existence d'oscillations cohérentes de l'ensemble du Soleil n'est plus à démontrer. Mais leurs modes de fréquence tels qu'on les observe demeurent incompatibles avec les calculs des modèles solaires standard et l'origine de certaines oscillations reste à l'état d'hypothèse.

Evry SCHATZMAN

Le problème de la constitution interne du Soleil (et des étoiles !) est vieux maintenant de plus de 100 ans. Dans son principe, le problème est resté le même : étant donné une masse sphérique de 2.10^{30} kg en équilibre hydrostatique, quelle est la répartition de la température et de la densité du centre à la surface ? Pour répondre à cette question, il **suffit** de connaître la relation entre pression et température et la façon dont varie la composition chimique.

Tous les efforts qui ont été faits depuis cinquante ans environ ont eu pour but de fixer aussi correctement que possible la relation pression-température et la distribution interne de la composition chimique. Les données d'observation dont il s'agissait de rendre compte ont longtemps été réduites à la puissance rayonnée par le Soleil (sa **luminosité**) et à son **rayon**, la masse étant donnée et la composition chimique initiale (à la formation du Soleil) étant non pas celle que l'on mesure à la surface, mais celle que l'on ajuste pour retrouver, par le calcul de la structure, le **rayon** et la **luminosité**. Seul est considéré comme une donnée de surface le rapport des abondances des éléments « lourds », essentiellement du carbone jusqu'aux éléments du groupe du fer, les autres éléments étant trop peu abondants pour intervenir significativement dans les problèmes de structure. Les données chimiques essentielles sont la concentration en masse de l'hydrogène, de l'hélium et de l'ensemble des éléments lourds.

□ Evry Schatzman, médaille d'or du CNRS, directeur de recherche au CNRS, travaille à l'observatoire de Nice, université de Nice – le Mont-Gros, BP 252 – 06007 Nice Cedex.

Il a fallu attendre le courant des années 1960 pour que les premières estimations du flux de neutrinos solaires montrent une contradiction majeure entre les calculs de structure interne et les résultats observationnels. En bref, tous les modèles « standard » avaient une température centrale trop élevée.

Au début des années 1970, les mesures de l'abondance du lithium à la surface du Soleil soulèvent une autre question. Le lithium est aisément détruit par la réaction $^7Li + {}^1H = 2\,{}^4He$, aussi ne doit-on pas s'étonner d'une déficience par un facteur 100 du lithium à la surface du Soleil, en comparaison avec l'abondance cosmique. Mais si la logique de la destruction est évidente, le mécanisme par lequel elle s'effectue est loin lui-même d'être une évidence. L'hypothèse sur laquelle différentes équipes travaillent actuellement est celle d'un phénomène très lent de mélange turbulent qui, ayant amené progressivement au cours des cinq milliards d'années écoulées les régions superficielles en contact avec les régions internes du Soleil a entraîné la destruction du lithium. La mise en évidence de ce phénomène de transport turbulent a des conséquences importantes pour la distribution des éléments chimiques à l'intérieur du soleil et nous en discuterons à nouveau plus loin.

La sismologie solaire

L'hypothèse du chauffage de la couronne solaire par dissipation de l'énergie mécanique d'ondes acoustiques a conduit à suggérer la présence de mouvements oscillatoires dans l'atmosphère solaire. Une période d'oscillation de cinq minutes environ a été détectée il y a vingt ans, mais ce sont les observations de plus en plus précises menées depuis une dizaine d'années qui ont permis de découvrir l'existence d'oscillations cohérentes de l'ensemble du Soleil.

Le principe de la méthode est le suivant. La mesure de la vitesse radiale de l'ensemble du disque solaire est faite de façon continue pendant un intervalle de temps aussi grand que possible. Un traitement numérique des données d'observation (transformée de Fourier), analogue à la décomposition spectrale de la lumière par un système dispersif (prisme ou réseau) permet de mettre en évidence les fréquences du Soleil, le spectre des oscillations solaires (fig. 1). Il y a maintenant plus de quarante ans, Cowling avait montré qu'une étoile peut osciller suivant différents modes : les modes de pression (analogues aux oscillations de l'air dans un tuyau d'orgue) et les modes de gravité (analogues aux oscillations de l'eau que l'on voit dans la houle) et un mode intermédiaire. Ces oscillations sont caractérisées d'une part par le nombre de nœuds et de ventres sur la sphère (fig. 2) et par le nombre de nœuds et de ventres du centre à la surface (fig. 3), le mode intermédiaire n'ayant pas de nœud à l'intérieur.

Dans le cas des modes de pression, la force de rappel est la pression et la fréquence augmente avec le nombre de nœuds et de ventres du centre à la surface. Dans le cas des modes de gravité, la force de rappel est l'attraction gravitationnelle et la fréquence diminue lorsqu'augmente le nombre de nœuds et de ventres du centre à la surface.

L'identification des modes correspondant aux différentes fréquences d'oscillation observées a pu être faite par un ensemble de raisonnements qui reposent sur l'analyse de la propagation des ondes dans le Soleil. La comparaison entre différentes oscillations de bas degré (petit nombre de nœuds et de ventres sur la sphère) et d'ordre

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

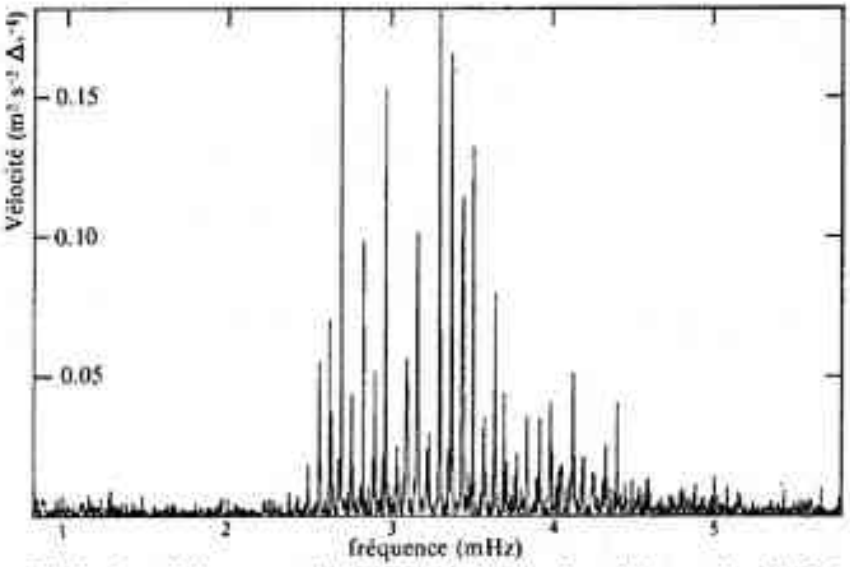


Fig. 1 – A partir des mesures de vitesse radiale effectuées durant l'été austral au Pôle Sud du 31.12.79 au 5.1.80, il a été possible d'obtenir le spectre des oscillations solaires. On distingue nettement des raies correspondant à des fréquences d'oscillations discrètes du Soleil. La figure donne ici la partie du spectre comprise entre 1 et 6 millihertz (périodes de 1000 secondes à 160 secondes). Les paires de raies séparées par 68 microhertz révèlent la présence de modes de pression de l'ensemble du Soleil de différents degrés (nombre de ventres et nœuds sur la sphère). (D'après MM. Grec, Fossat, Pomerantz, *Nature*, vol. 288, 11 december 1980).

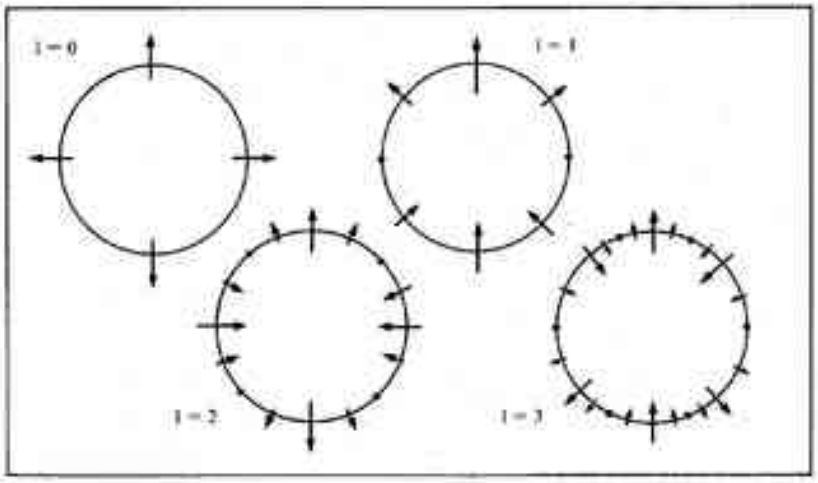


Fig. 2 – Schéma des champs de vitesses des modes de différents degrés observés sur l'ensemble du Soleil. Les flèches indiquent la direction et l'amplitude du mouvement.

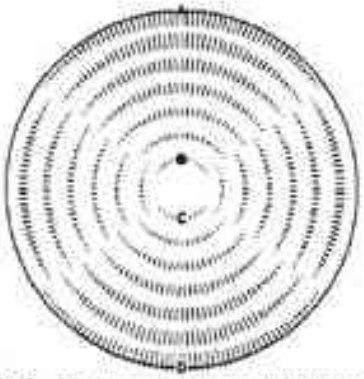


Fig. 3 – Mouvements dans le mode de pression quadrupolaire d'ordre 13. Les traits radiaux représentent l'amplitude du déplacement là où il est de signe « plus » dans un plan méridien. Les déplacements de signe « moins » ont été omis. La coordonnée radiale a été dilatée de telle façon que des distances égales dans le diagramme représentent des acoustiques égales dans le Soleil. L'amplitude des déplacements a été exagérée et la variation d'amplitude avec le rayon réduits. Le cercle indique la position de la photosphère non perturbée. (D'après D.O. Gough, p. 117 (fig. 3 p. 127) ESO Workshop on « Primordial Helium », Garching, 2-3 Febuary 1983).

élevé (grand nombre de nœuds et ventres du centre à la surface) permet de mettre en évidence les propriétés de l'équation d'état en différentes régions de l'intérieur du Soleil.

Les modèles solaires

Dans les modèles solaires standard, on part d'un Soleil de composition chimique uniforme il y a cinq milliards d'années. La transformation de l'hydrogène en hélium dans les régions centrales modifie la composition chimique de l'intérieur du Soleil et cette modification est un phénomène purement local. Le calcul du modèle standard doit nous livrer à l'époque actuelle un Soleil ayant le bon rayon et la bonne luminosité.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

Le modèle solaire dépend de trois paramètres : l'abondance de l'hélium, l'abondance des éléments lourds et un paramètre de structure de la zone convective superficielle (analogue, pour ce qui est des causes physiques de la convection, à la troposphère terrestre) que l'on introduit par suite de l'imperfection de la théorie. Les seules données de la luminosité et du rayon ne permettent pas de déterminer les trois paramètres qui fixent la structure des modèles standard.

L'analyse des modes d'oscillations solaires, équivalente à un sondage des couches intérieures, permet en principe de déterminer complètement la structure du Soleil. La précision des mesures (une fraction de micro-hertz) montre que l'ajustement des modèles standard à l'ensemble des contraintes venant des modes de pression est impossible. Le meilleur modèle standard, montrant cependant un écart significatif avec les observations, donne une teneur initiale en hélium de 23 % en masse.

Comment interpréter l'écart entre l'observation et les résultats de calcul de modèles ?

L'évidence du phénomène de mélange qui paraît essentiel à l'interprétation du défaut de lithium à la surface du Soleil suggère bien évidemment que ce phénomène se produit dans l'ensemble du Soleil. Le transport diffusif produit une homogénéisation partielle de la composition chimique du Soleil. Le résultat est une modification de l'équation d'état et de l'inertie des couches intérieures par rapport au modèle standard. L'importance de l'effet est d'autant plus grand que le mélange est plus efficace.

Il n'y a pas à l'heure actuelle d'accord suffisant entre les différents auteurs sur les modèles solaires pour dire si le mélange diffusif augmente ou diminue le désaccord des modèles standard avec l'observation. Il est cependant possible de résoudre cette incertitude en utilisant les données provenant des modes de gravité. En effet, les modes de gravité opérant sous l'effet de l'attraction gravitationnelle, on peut décrire leur fonctionnement local de la façon suivante. Un élément de fluide qui monte, se refroidit et devient plus dense que son environnement. Il redescend alors et en se réchauffant devient plus léger que son environnement. Une oscillation est donc possible. La gravitation joue par l'intermédiaire de la poussée d'Archimède et cette poussée est d'autant plus grande que la différence de densité entre l'élément en mouvement et son environnement est plus grande. Cette différence de densité fait intervenir la variation de la composition chimique avec l'altitude ; or la variation de la composition chimique avec l'altitude dépend de l'efficacité du mélange agissant sur l'hétérogénéité engendrée par les réactions nucléaires. On peut comprendre ainsi que le mélange ait une influence sur les périodes d'oscillation des modes de gravité.

La contribution principale aux périodes des modes de gravité provient d'une région située à environ 1/10 de rayon solaire. Un phénomène de mélange modéré ramène l'écart entre les périodes tel qu'on le calcule dans les modèles standard à la valeur observée. Mais ce mélange modéré a peu d'effet sur la séparation des fréquences des modes de pression, si bien qu'il faut vraisemblablement chercher l'explication du désaccord entre le séparation observée des fréquences et les résultats des calculs relatifs aux modèles standard ailleurs que dans le phénomène de mélange : rôle de l'atmosphère et de la chromosphère solaire, phénomènes dans la zone convective, effets des champs magnétiques, ...

On peut chercher à mesurer l'efficacité du phénomène de mélange en comparant le coefficient de diffusion turbulente au coefficient de viscosité, ce qui permet de définir un nombre S, analogue au nombre de Reynolds et qui permet de décrire l'intensité de la turbulence. Les différents tests du phénomène de mélange permettent de fixer quelques points de repère : les neutrinos solaires, l'écart des périodes des modes de gravité, le transport à la surface du Soleil de l'isotope de l'hélium ^{3}He, et la destruction du lithium ^{7}Li. (fig. 4).

La décroissance du nombre S de la surface vers l'intérieur s'explique bien par un mécanisme de génération de la turbulence qui fait intervenir une cascade de phénomènes hydrodynamiques : rotation différentielle, génération d'une turbulence à deux dimensions par les courants de cisaillements horizontaux, dégradation à petite échelle de la turbulence à deux dimensions en une turbulence à trois dimensions. Il apparaît cependant que la remontée empiriquement constatée du nombre S vers le centre du Soleil doit faire intervenir d'autres processus. Il a été suggéré récemment qu'un phénomène chaotique du type « marche au hasard » pouvait être engendré par la superposition des mouvements des différents modes de gravité, l'amplitude de ces modes augmentant rapidement vers le centre du Soleil.

La génération des oscillations solaires

Les différents modes d'oscillation solaire, qu'il s'agisse des modes de pression ou des modes de gravité, ne sont pas excités spontanément. La largeur des « raies » est significative. Elle veut dire que les

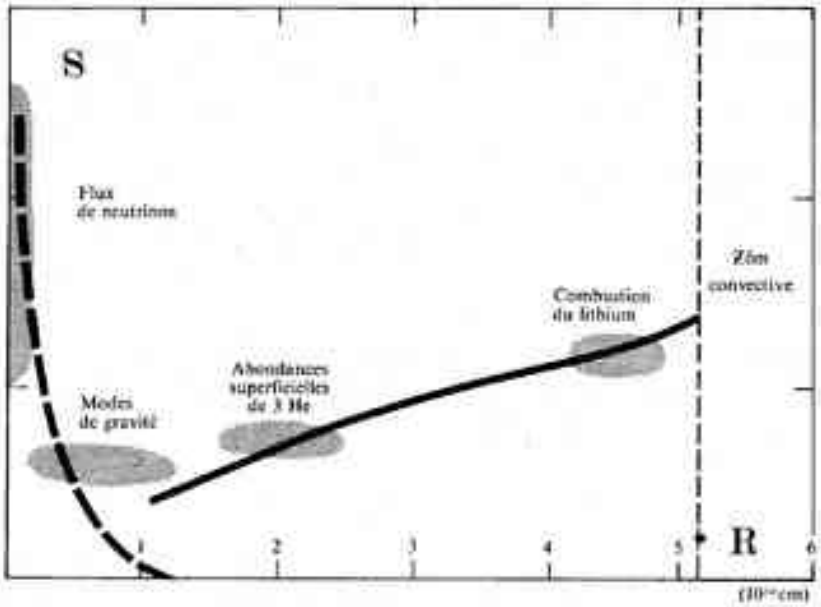
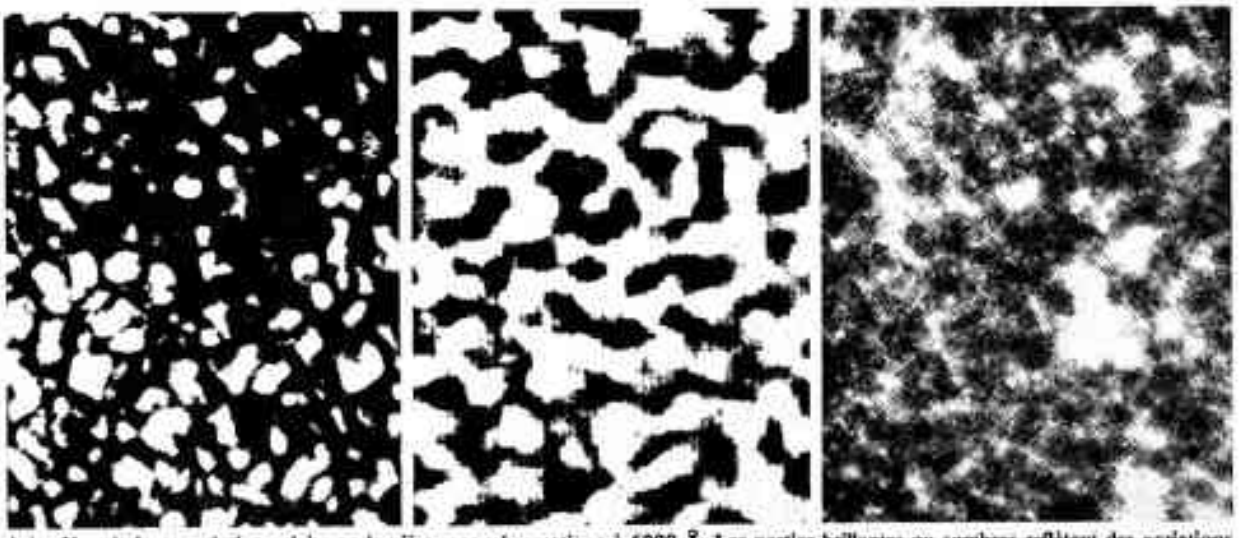


Fig. 4 – Variation avec la profondeur du nombre S, (S est égal au quotient du coefficient de la diffusion turbulente par la viscosité cinématique). La courbe en traits pleins donne la fonction S, telle qu'elle est suggérée par la théorie de la production de la diffusion turbulente. La courbe en traits interrompus donne la fonction S telle qu'elle est suggérée par la superposition des modes de gravité dans les régions centrales. Les valeurs de S déduites des différentes contraintes ont été portées pour les différentes profondeurs où elles sont efficaces.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf



1a) – Vue de la granulation solaire en lumière monochromatique à 6000 Å. Les parties brillantes ou sombres reflètent des variations d'émissivité, donc de température. L'échelle spatiale de ces variations est typiquement de 2000 km. (Cliché pris par S. Koutchmy à Sacramento Peak Obs). 1b) – Le champ de vitesses de la mésogranulation. Les zones brillantes correspondent au fluide descendant, tandis que les régions sombres indiquent le fluide ascendant. Les variations de vitesses atteignent 150 m/sec ; elles sont déterminées par effet Doppler de la raie du Mg II (5173 Å), qui se forme dans la région du minimum de température. La dimension des mésogranules varient de 5000 à 10 000 km. Les mesures ont été faites par November, Toomre et Simon (1981) à Sacramento Peak Obs. 1c) – La supergranulation apparait très clairement sur les images du Soleil, prises en lumière monochromatique dans la raie K de calcium ionisé. Les parties brillantes correspondent à un renforcement du champ magnétique donc à la périphérie des supergranules. Les parties sombres indiquent le centre de supergranules. (Photo de l'Observatoire d'Anacapri du Kiepenheuer Institut. (Observatoire de Nice – LA 128).

différents modes se comportent comme des oscillateurs amortis, entraînés par une source excitatrice.

Une source excitatrice évidente est la zone convective solaire. L'observation des mouvements à la surface du Soleil révèle un chaos de vitesses et de déplacements dont les temps caractéristiques vont de cinq minutes (la granulation solaire) jusqu'à une vingtaine d'heures (le réseau chromosphérique). Il est vraisemblable qu'au-dessous du pouvoir de résolution des instruments utilisés jusqu'à présent, le chaos continue jusqu'aux petites échelles, avec des temps caractéristiques de l'ordre de la seconde.

Ces mouvements chaotiques sont engendrés par la convection à grande échelle dont la zone convective superficielle est le siège. En raison de la très grande valeur du nombre de Reynolds dans cette région, $Re = 10^{12}$, on peut supposer que ces mouvements sont turbulents. Cette turbulence se comporte comme un « bruit blanc » susceptible d'exciter les différents modes d'oscillation du Soleil.

Il n'y a guère de doute que c'est de cette façon que les modes de pression sont excités. En revanche le cas des longues périodes est plus complexe. Le spectre contient non seulement des périodes dont l'espacement est significatif des modes de gravité, mais aussi des « raies » dont la période est une fraction de jour. Les mêmes périodes sont visibles dans les variations de la polarisation à 13 mm de longueur d'onde, mesurées à l'Observatoire de Crimée. L'analyse de Fourier des variations de pression à Strasbourg met clairement en évidence des « raies » ayant pour périodes 1/5, 1/7, 1/9 (= 160 mn) de jour.

Une partie au moins des raies du spectre basse fréquence pourrait avoir pour origine un phénomène d'origine terrestre, les très faibles vitesses radiales observées étant en réalité dues à un effet de l'atmosphère sur la propagation des rayons solaires, la périodicité du phénomène étant engendrée par la périodicité des perturbations de pression dans l'atmosphère terrestre. La durée des observations de la pression atmosphérique faites à Strasbourg n'est pas suffisante pour dire si la période est exactement 1/7 ou 1/9 ème de jour. En particulier, la fameuse période de 160,01 minutes, mise en évidence il y a 10 ans à l'Observatoire de Crimée et qui a conservé sa phase depuis sa découverte (la différence de 0.01 minute correspond à un décalage d'une période au bout de cinq ans par rapport à une période d'exactement 1/9ème de jour) pourrait être en réalité un phénomène d'origine terrestre, le déphasage par rapport à 1/9ème de jour étant lui-même d'origine terrestre.

L'origine de l'oscillation de 160,01 minutes pourrait-elle être d'origine extra-solaire ? L'hypothèse des ondes gravitationnelles qui a été récemment envisagée se heurte à un certain nombre de difficultés. La première concerne les propriétés des ondes gravitationnelles ; leur amplitude ne peut dépasser un certain seuil au delà duquel elles produiraient des perturbations visibles dans le système solaire lui même ; cette amplitude est extrêmement petite. La deuxième concerne les propriétés du Soleil : l'oscillation ne peut être une oscillation forcée, car l'amplitude vraisemblable des ondes gravitationnelles ne saurait produire l'amplitude observée de l'oscillation de 160,01 minutes ; la troisième, venant également des propriétés du Soleil, tient à la qualité de l'oscillateur solaire : la largeur de la raie à 160,01 mn ne permet pas d'attribuer à l'oscillateur solaire les propriétés lui permettant d'atteindre l'amplitude observée. Il y a sans nul doute à perfectionner la théorie de la structure interne et de l'évolution du soleil. Mais dans le cas présent, ni la description des oscillations solaires ni les propriétés des ondes gravitationnelles n'appartiennent à une physique nouvelle. Doit-on alors appliquer le principe connu sous le nom du rasoir d'Occam : ne pas introduire de nouvelle entité en dehors de toute nécessité ? Il semble à mon avis qu'il faudrait être sûr qu'il n'y a aucune explication solaire ou terrestre à l'amplitude et à la phase de l'oscillation de 160,01 mn avant de pouvoir affirmer une origine cosmique de cette oscillation..

BIBLIOGRAPHIE PROPOSEE PAR LE CDST

Le Centre de documentation scientifique et technique du CNRS propose de fournir aux lecteurs intéressés une bibliographie comportant les 100 références les plus récentes signalées dans la base de données PASCAL (voir bon de commande p. 30).

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

La bioaccumulation de métaux, processus physiologique normal et conséquence de la pollution

La bioaccumulation peut se définir comme une concentration d'éléments supérieure au seuil requis pour qu'une cellule assume normalement son métabolisme et maintienne son équilibre ionique. Elle permet d'expliquer des observations qui semblaient jusqu'ici paradoxales.

Micheline MARTOJA et Roger MARTOJA

La surveillance du milieu et des écosystèmes, que l'on exerce depuis une vingtaine d'années pour éviter les conséquences parfois graves de la pollution par les métaux lourds, a mis en relief l'importance d'un phénomène connu sous le nom de bioaccumulation. Elaborées par des êtres vivants qui, au lieu de rejeter l'excès de métaux ou de métalloïdes qu'ils absorbent, l'accumulent peu à peu dans leur organisme, les bioaccumulations semblent amplifier les dangers de pollutions déjà insidieuses. En effet, si ce processus de concentration se répète à chaque maillon d'une chaîne alimentaire, un élément toxique présent à l'état de traces dans le milieu atteint un taux alarmant lorsqu'il parvient au dernier prédateur.

Ainsi schématisée, la formation d'une bioaccumulation apparaît comme un événement néfaste, ce qui est loin d'être général. Toutes les bioaccumulations ne sont pas d'origine pathologique ni constituées d'éléments toxiques. Certaines sont normales, comme les minéralisations calcaires ou plus rarement siliceuses qui assurent la rigidité des tissus de soutien dont presque tous les êtres vivants sont pourvus. D'autres, pour être accidentelles n'en sont pas moins utiles à l'animal et ne manquent pas d'attrait pour l'homme : une perle n'est qu'une bioaccumulation de carbonate de calcium destinée à enkyster le parasite d'une huître ! Une première idée à retenir est donc que, dans l'ensemble du monde animal et surtout chez les Invertébrés, certaines fonctions vitales donnent lieu à des bioaccumulations qui n'ont aucun rapport avec la défense de l'organisme contre une altération de l'environnement. Quant à la toxicité d'un élément, il peut être difficile d'en juger dès lors qu'il est intégré dans la matière vivante. Bien avant que l'on ait pris conscience des problèmes de pollution, l'on avait remarqué que des éléments réputés nocifs au-delà d'un certain seuil atteignaient toujours, dans certains groupes zoologiques, des teneurs étonnamment élevées. Plus récemment, l'on a même découvert que des animaux pouvaient détenir de fortes quantités d'un métal aussi dangereux que le mercure sans en être incommodés. Une seconde idée essentielle est donc que les bioaccumulations sont capables de modifier la toxicité d'un élément et parfois de l'abolir aussi bien pour l'animal qui les édifie que pour ses prédateurs.

Que sont ces concentrations de métaux et de métalloïdes que peuvent opérer les animaux, pourquoi se forment-elles et quelle est réellement leur incidence sur l'intégrité de l'animal lui-même et de la chaîne alimentaire où il s'insère ? Autant de questions qui semblaient insolubles au moment où apparaissaient des instruments particulièrement bien adaptés à ce type de recherche. A ce moment, en effet, de nouveaux instruments, en permettant l'identification d'éléments et de molécules conservés en place dans les tissus, élargissaient les possibilités jusque là réduites de la cytochimie des minéraux et des complexes métalliques (voir encadré 1). Ainsi est née, sous l'impulsion de P. Galle, une école française de microanalyse qui s'attacha d'abord à élucider l'origine des accumulations pathologiques de métaux chez l'homme, puis à explorer des bioaccumulations naturelles, accidentelles ou expérimentales chez les animaux. Grâce aux résultats complémentaires de l'histologie traditionnelle, de la microanalyse et de la chimie analytique qui, de son côté s'affinait de façon spectaculaire, l'origine et le rôle de diverses bioaccumulations ont pu être élucidés et plus de vingt éléments y ont déjà été reconnus (figure 1).

Bioaccumulations naturelles

On sait aujourd'hui que les bioaccumulations naturelles de métaux et de métalloïdes sont nombreuses mais, pour les interpréter, il faut être en possession de multiples informations. Il est important de connaître, notamment, leur composition chimique, leur mode de formation, leur cycle éventuel, l'origine et la fonction de leurs constituants. A défaut de certaines de ces données essentielles, elles apparaissent comme des curiosités, telles les accumulations de sulfate de baryum et de strontium qui se forment dans des algues et certains êtres unicellulaires marins, les radiolaires. Plus intéressantes à considérer sont celles qui ont pu être replacées dans un contexte biologique précis ou qui suscitent des questions de physiologie générale.

Les accumulations peuvent être temporaires

Lorsque l'utilisation d'éléments ne suit pas immédiatement leur assimilation, des réserves se constituent. Si l'utilisation obéit à un cycle déterminé, la mobilisation des éléments stockés est soumise au même rythme.

Un exemple particulièrement net en est donné par les crustacés qui rejettent leur carapace minéralisée à intervalles réguliers : l'accumulation des matériaux nécessaires à l'édification de la nouvelle carapace y est régie par le cycle de mue. D'une manière générale, l'évolution d'un organe de stockage est liée aux particularités physiologiques de l'espèce et un concentrateur biologique peut n'apparaître comme tel qu'à

□ Micheline Martoja, maître de recherche au CNRS, Institut océanographique, 195, rue Saint-Jacques – Paris 75005.
□ Robert Martoja, professeur à l'université Pierre et Marie Curie, est responsable de l'équipe « histophysiologie et histopathologie des invertébrés », (ERA 570), université de Paris VI, 12, rue Cuvier – Paris 75005.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

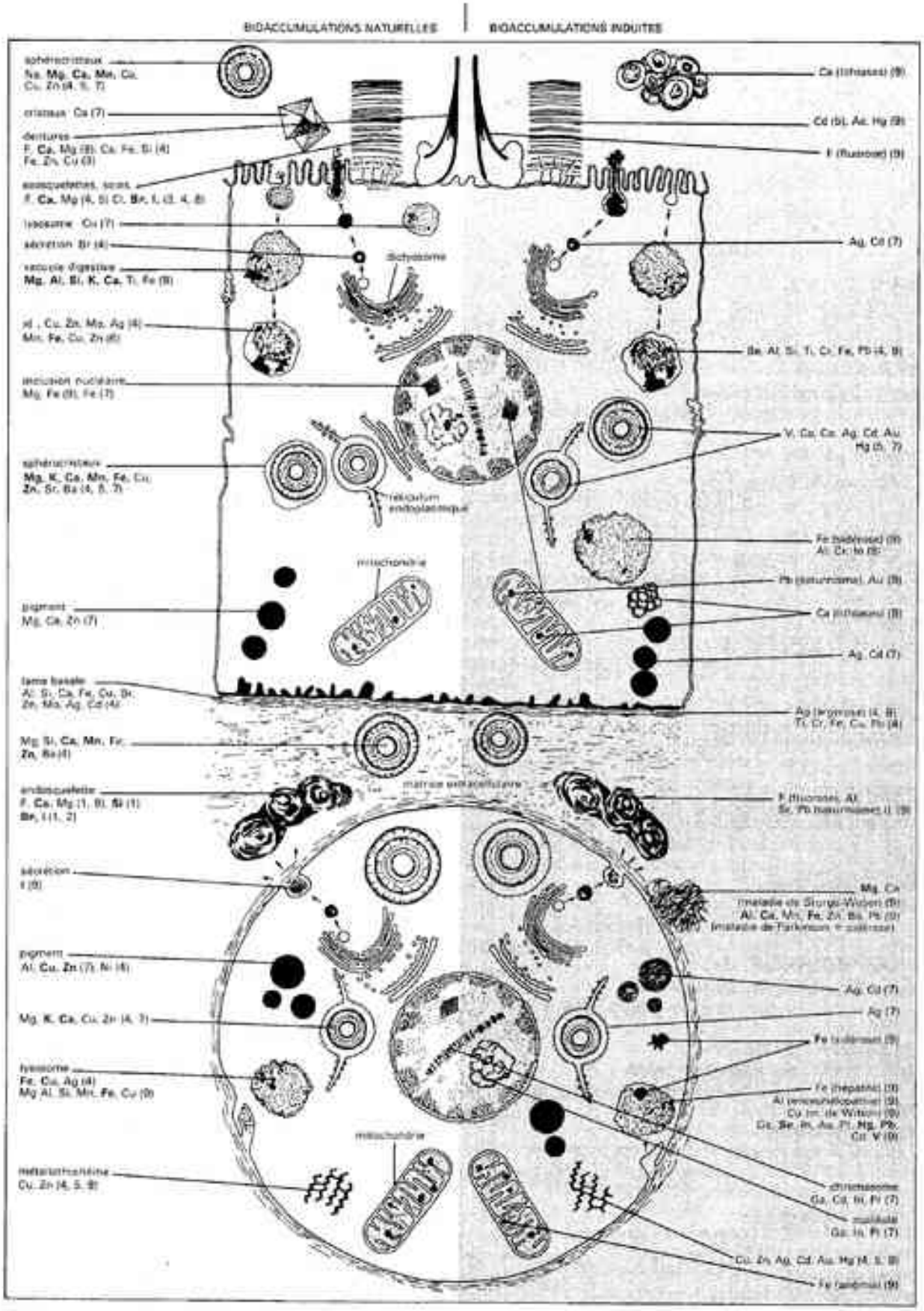


Fig. 1 – Principaux sites de bioaccumulation de métaux et de métalloïdes dans une cellule ayant des échanges avec le milieu extérieur (en haut) et dans une cellule n'ayant de contact qu'avec le milieu intérieur (en bas). Les éléments les plus importants figurant dans des accumulations complexes ont été mis en gras. Les numéros renvoient aux groupes zoologiques suivants : 1. Spongiaire – 2. Cnidaires – 3. Annélides – 4. Mollusques – 5. Crustacés – 6. Arachnides – 7. Insectes – 8. Tuniciers – 9. Vertébrés.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

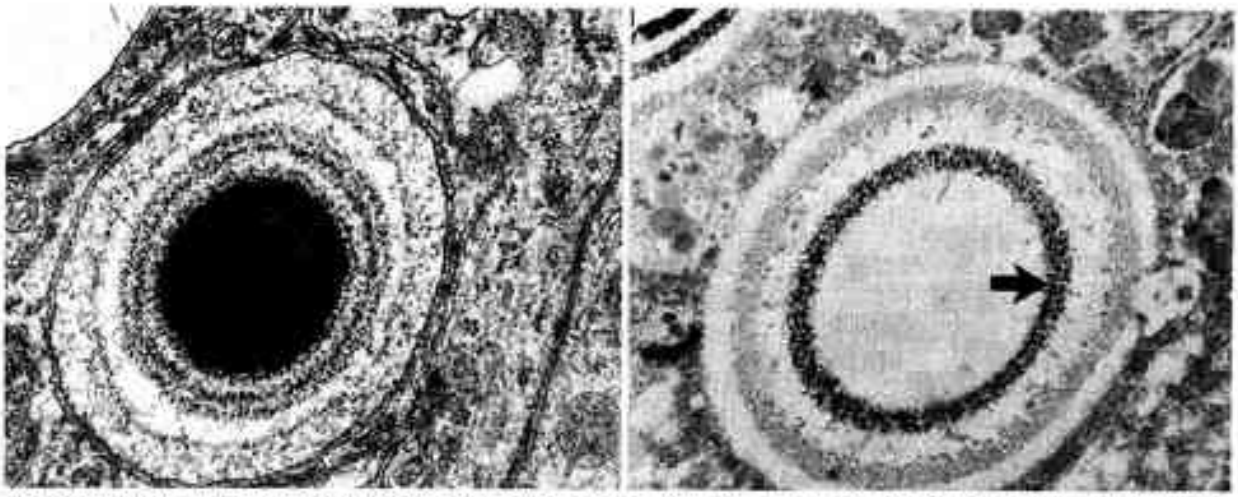


Fig. 2 – Sphérocristaux d'accumulation minérale d'un intestin d'insecte. A gauche, insecte sain. A droite, insecte nourri au chlorure de cadmium ; le cadmium est identifiable par sonde électronique dans la strate sombre (flèche). (× 23 000).

certaines périodes de sa vie.

L'absorption et l'excrétion donnent lieu à accumulation

L'idée bien établie d'une très grande perméabilité intestinale découle à la fois de connaissances empiriques, puisque chacun connaît les risques d'empoisonnement par voie orale, et des recherches en physiologie et toxicologie, longtemps limitées aux mammifères. Même l'acidité stomacale, loin d'avoir un rôle protecteur, contribue à rendre disponibles des éléments qui ne l'étaient pas lors de leur ingestion et les mucus de l'intestin, quant à eux, n'ont qu'un pouvoir de complexation très réduit. A de rares exceptions près, dont l'argent qui peut être immobilisé sous forme de chlorure dans l'estomac et le zinc qui est partiellement retenu par le mucus dans l'intestin, les éléments franchissent la barrière intestinale sous forme d'ions libres ou bien fixés à des acides aminés, la régulation, lorsqu'elle est possible, se faisant dans d'autres organes. La situation est diamétralement opposée chez divers invertébrés. Il arrive fréquemment, en particulier chez les insectes et crustacés, que les ions en excès dans la nourriture soient immobilisés dès qu'ils pénètrent dans les cellules absorbantes de l'intestin. Ils y forment des sphérules minérales ou « sphérocristaux » qui s'accroissent par addition de strates concentriques et sont rejetés périodiquement. Le fonctionnement de cette « barrière intestinale » entraîne donc une accumulation de métaux qui peut être complexe et importante. Chez l'ouvrière de fourmi, par exemple, les teneurs en Fe et Mg, Zn, Cu, Mn, atteignent dans ces cellules intestinales, respectivement 30, 300, 500 et 9000 fois celles d'une cellule banale.

Une situation identique existe, concernant l'excrétion, puisque de nombreux invertébrés maintiennent leur constance ionique non par une diffusion d'électrolytes comme les vertébrés, mais par une précipitation minérale dans des organes excréteurs. Ceux-ci peuvent être, comme chez l'escargot, de véritables reins ouverts sur l'extérieur, ce qui laisse une possibilité de rejet des sphérocristaux. Ce peut être aussi des tissus spécialisés dits « reins clos ». L'exemple le plus classique d'excrétion par accumulation est celui du cyclostome, petit gastéropode proche du bigorneau mais adapté au milieu terrestre, qui retient dans son tissu conjonctif des concrétions visibles à l'œil nu où sont immobilisés des ions K, Ca et Mg. L'extrusion est évidemment impossible et il y a ou bien réutilisation par l'animal ou bien stockage définitif. De tels reins clos sont fréquents chez les insectes terrestres.

En résumé, plus la connaissance des invertébrés progresse, plus il apparaît que les fonctions vitales mettent en jeu des mécanismes diversifiés et très souvent éloignés de ceux des mammifères : alors que les ions diffusibles jouent un rôle essentiel chez ces derniers, les combinaisons minérales complexes semblent être prédominantes chez les invertébrés.

Des cataboltes se fossilisent

L'opposition vertébrés-invertébrés se manifeste de façon encore plus spectaculaire dans la fossilisation définitive de certains déchets. En effet, le métabolisme normal des enzymes et des pigments respiratoires comporte une phase de dégradation qui peut aboutir, chez les invertébrés, à une accumulation de métal. C'est là l'origine du zinc, inclus dans les sphérocristaux des bivalves d'eau douce et, au moins en partie, du cuivre si abondant dans les tissus des gastéropodes. Le premier est issu d'une enzyme, l'anhydrase carbonique et le second du pigment respiratoire, l'hémocyanine. En effet, contrairement au fer de l'hémoglobine des vertébrés qui est remis en circulation, le cuivre de l'hémocyanine est précipité dans des cellules spécialisées, sous forme de sulfure. La stabilité de ce sel est telle que le métal n'est pas réutilisé et que sa teneur progresse avec l'âge ; elle peut atteindre 400 $\mu g.g^{-1}$ dans la masse viscérale des murex de Méditerranée. Une longévité de plusieurs dizaines d'années fait donc de ces animaux de puissants concentrateurs de cuivre. Le cuivre et le zinc ne sont sans doute pas les seuls métaux dont l'accumulation suive le catabolisme de complexes organo-métalliques. Ainsi, pendant la phase d'involution qui caractérise le cycle reproducteur du bigorneau, du fer provenant probablement des cytochromes se trouve en grande abondance dans le testicule. Enfin, il n'est pas exclu que des accumulations de métaux beaucoup plus inhabituels relèvent d'une interprétation identique. C'est peut-être le cas de l'argent et du cadmiun qui atteignent des teneurs étonnantes chez les mollusques marins. Comment expliquer autrement que des murex stockent du sulfure d'argent ou qu'ils concentrent un million de fois le cadmiun d'eaux de mer qui en sont particulièrement pauvres et l'accumulent sous au moins trois formes chimiques distinctes ? Certainement pas par une pollution, donc nécessairement par un processus physiologique qui nous échappe encore. On retiendra de cet exemple, qui est loin d'être unique, que la découverte d'une bioaccumulation naturelle peut susciter des hypothèses

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

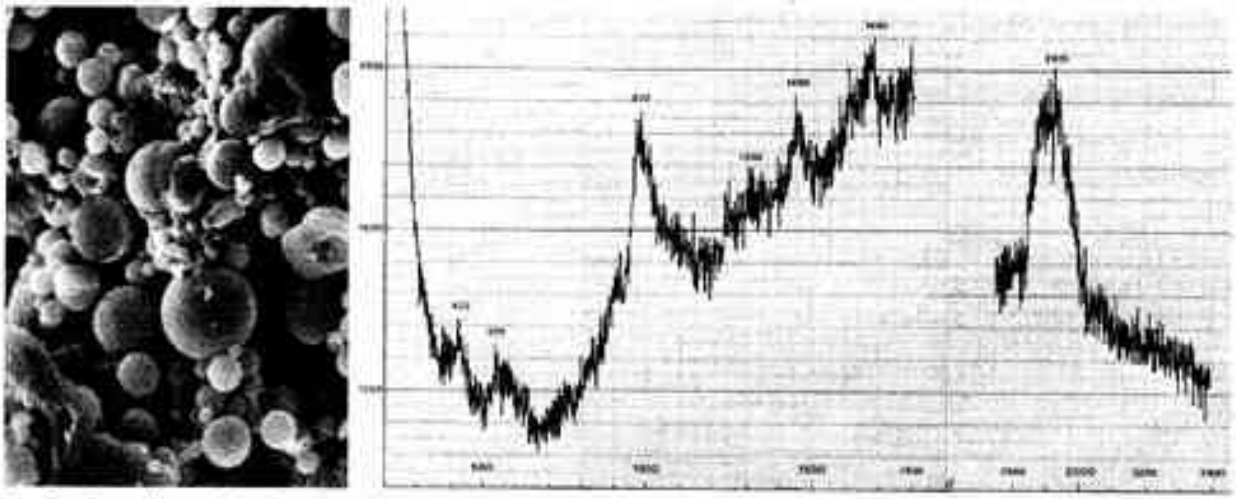


Fig. 3 – Concrétions minérales provoquées par le chlorure de cadmium dans le rein d'un Poisson. A gauche, aspect morphologique (× 3 000). A droite, spectre Raman obtenu sur une concrétion (raies 425, 575 et 970 cm $^{-1}$: phosphate de calcium ; raie 1.460 cm $^{-1}$; oxalate de calcium ; autres raies : matière organique.

qui auraient eu bien peu de chance d'être envisagées sans cela, tant il semble aberrant de considérer certains métaux toxiques comme des métabolites.

De la gastronomie insolite des suspensivores à l'empoussiérage pulmonaire, le mécanisme est identique

Les cellules digestives des animaux aquatiques qui se nourrissent de matières en suspension (= suspensivores) et les cellules à poussière des poumons des mammifères ont en commun la faculté de capter des particules dispersées dans le milieu, air ou eau, puis de les incorporer dans des lysosomes, organites cellulaires qui jouent le rôle d'estomac en miniature. Les bioaccumulations les plus complexes résultant de ce mécanisme sont le fait d'invertébrés qui, comme les moules, filtrent et avalent les matériaux les plus divers et dont la digestion se déroule au sein même des cellules.

Les algues unicellulaires, débris organiques et particules minérales qui pénètrent dans le tube digestif, sont phagocytés par des cellules de l'hépatopancréas et par des amibocytes, puis englobés dans des lysosomes où des enzymes intracellulaires digèrent le matériel biodégradable. Les particules inorganiques ne seront dissociées que si la combinaison chimique est rompue au pH légèrement acide qui est celui du lysosome. Dans les cellules persistent donc, avant une éventuelle extrusion, les composés non dégradables (silice, hydroxyde de fer...) accompagnés de métaux provenant des enzymes usées (Cu, Zn, Mo).

Dans les cellules à poussière des poumons, auxquelles ne parviennent évidemment que des particules minérales sans valeur nutritive, les résidus sont dépourvus de déchets d'enzymes digestives.

Des bioaccumulations qui se forment de façon identique peuvent donc, selon les organismes, assumer des fonctions tout à fait différentes. Ici, le « biocaptage » des particules a pour rôle soit d'assurer la nutrition de l'individu, soit de le protéger d'éléments indésirables en suspension dans l'atmosphère.

IDENTIFICATION DES ELEMENTS RETENUS DANS LES TISSUS

Trois instruments, initialement réalisés avec l'appui du CNRS et maintenant commercialisés, permettent de localiser dans les tissus des êtres vivants, avec une spécificité et une précision jamais atteintes, tous les éléments de la classification périodique ainsi que la plupart de leur combinaisons.

Le premier d'entre eux fut la microsonde électronique de Castaing (1951), destinée à l'analyse élémentaire : un faisceau d'électrons est focalisé sur l'échantillon et en excite les atomes pour produire le rayonnement X caractéristique.

De conception plus récente, les microanalyseurs par émission ionique secondaire utilisent le principe de la pulvérisation cathodique. Parmi les diverses réalisations instrumentales, celle de Slodzian (1963) est la plus intéressante pour le biologiste car, alliant une optique corpusculaire à un spectrographe de masse, elle permet d'établir la correspondance entre la structure cellulaire et les éléments détectés.

Enfin, tout dernièrement, la diffusion de la lumière par effet Raman a été utilisée par Delhaye et Dhamelincourt (1977) pour la mise au point d'une microsonde moléculaire qui associe un microscope optique éclairé par un faisceau laser, un filtre optique à réseaux holographiques et un système de détection monocanale ou multicanale.

Outre ces trois méthodes, il faut signaler l'analyse par perte d'énergie d'électrons, imaginée par Castaing et son équipe (1962). Elle a été appliquée avec succès à la caractérisation d'éléments dans les tissus animaux, mais la nécessité de recourir à la microscopie électronique à haute tension (Jouffrey et Sevely, 1976) en limite l'essor.

Bioaccumulations liées à un dysfonctionnement métabolique ou à une altération du milieu

De nombreuses bioaccumulations résultent de troubles métaboliques. Une alimentation mal adaptée, un déséquilibre hormonal, certains médicaments peuvent provoquer leur formation. D'autres ont pour origine une altération de l'environnement. Les pollutions par des composés minéraux ou des complexes métalliques peuvent entraîner des perturbations physiologiques accompagnées d'accumulations de métaux qui sont souvent différents des polluants eux-mêmes. Elles peuvent aussi susciter des réactions de défense et accroître la résistance des organismes qui procèdent eux-mêmes à leur détoxication. Très variés, les mécanismes de détoxication utilisent des processus cytologiques normaux assu-

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

rant la régulation des métaux essentiels, amplifient des processus moléculaires eux aussi préexistants ou, plus rarement, mettent en œuvre des procédés tout à fait originaux.

Des dysfonctionnements métaboliques mobilisent de nombreux métaux

On a longtemps considéré que les accumulations dues à des perturbations métaboliques étaient de composition chimique simple : fer pour la sidérose, cuivre pour la maladie de Wilson, magnésium pour la maladie de Sturge-Weber, calcium pour diverses lithiases. En réalité, ces métaux sont accompagnés de nombreux autres éléments qui échappaient à la détection cytochimique. Dans le cas de la sidérose, par exemple, qu'elle affecte le foie ou le cerveau, du calcium, du magnésium, du zinc et parfois du baryum et du cuivre sont accumulés conjointement avec le fer. Une complexité plus grande encore caractérise les minéralisations artérielles de sujets atteints à la fois de sidérose et de la maladie de Parkinson, puisqu'aux mêmes sites se trouvent concentrés les éléments Al, P, Ca, Mn, Fe, Zn, Ba et Pb.

Les minéralisations par l'aluminium et les lithiases calciques rénales sont particulièrement intéressantes, car elles se manifestent de la même façon que l'organisme ait été exposé ou non à une contamination extérieure. Ainsi, des dépôts d'aluminium se forment à la fois chez des malades atteints d'encéphalopathie et chez ceux qui sont soumis à une dialyse permanente accompagnée d'un traitement à l'hydroxyde d'alumine. De même, des néphrocalcinoses peuvent être provoquées aussi bien par un déséquilibre hormonal ou une densité de population excessive que par une intoxication au cadmium ou au mercure. Sur les côtes de la Manche et de la mer du Nord, de nombreuses limandes sont atteintes de calcinose alors que les taux de mercure et de cadmium y sont de beaucoup inférieurs aux taux requis pour provoquer la maladie. Les causes de telles anomalies sont donc multiples et complexes, ce qui rend illusoire toute tentative d'utilisation de bioindicateurs d'une pollution précise lorsqu'on se trouve en présence d'une altération générale de la qualité du milieu.

Des organes de stockage naturel concentrent des polluants

La barrière intestinale des insectes et des crustacés, qui piège normalement les ions en excès, peut aussi s'opposer à l'entrée des polluants minéraux dans l'organisme. Les éléments toxiques au-delà d'un certain seuil précipitent dans les sphérocristaux s'ils sont apportés sous une forme ionique ou sont incorporés dans les lysosomes s'ils se trouvaient liés à une protéine.

Dans les deux cas, leur toxicité est abolie puisque, dans les sphérocristaux, ils forment une combinaison stable qui exclut une interaction avec les protéines cellulaires et que, dans les lysosomes, ils sont isolés par la membrane de l'organite. Ces structures intracellulaires jouent donc un rôle important de détoxication, si bien que les animaux résistent à des doses de poisons qui seraient fatales aux vertébrés. C'est ainsi qu'avant l'ère des insecticides, un chercheur australien a tenté sans résultat d'utiliser le mercure et l'arsenic pour le traitement anti-mites de la laine. La cause de cette surprenante résistance est maintenant connue : les métaux, neutralisés dans des pièges intracellulaires ne pénétraient pas dans le milieu intérieur de la mite. Ce mécanisme, démontré en laboratoire, n'est pas sans importance écophysiologique. Il explique, par exemple, que des crustacés survivent parfaitement dans les rivières très chargées en cuivre, en zinc et en plomb assimilables qui desservent des exploitations minières.

Les cellules qui accumulent des catabolites métalliques pourraient également intervenir dans la détoxication. Ainsi, chez les gastéropodes, il n'est pas impossible que les cellules qui accumulent le sulfure du cuivre dégradent les complexes cuivriques dus à une contamination accidentelle. Dans cette hypothèse, la tolérance au cuivre de la plupart des mollusques irait de pair avec la présence d'hémocyanine. Quant aux cellules qui procèdent à un biocaptage de particules, elles peuvent se charger de nombreux polluants, s'ils se présentent sous une forme particulaire ou, en milieu aquatique, colloïdale. Le faciès chimique des cellules à poussières du poumon humain reflète l'environnement. Celles des citadins sont chargées de particules d'oxyde de titane provenant de l'érosion par le vent des peintures de ravalement et celles des mineurs ou des carriers contiennent des minéraux caractéristiques de la roche exploitée. Il en va de même des animaux suspensivores, puisque dans les aires surchargées de particules inorganiques, les bivalves absorbent indifféremment tous les constituants du milieu, naturels ou non. En baie de Seine, aux points où sont rejetés des résidus de fabrication d'engrais, les phosphogypses, les moules contiennent une quantité élevée de fluor qui pouvait laisser croire à une contamination. En réalité, le fluor se présente sous forme de particules minérales conservées intactes dans les cellules. Il en va de même des moules vivant au contact de « boues rouges », résidus de fabrication de l'oxyde de titane. Leurs cellules di-

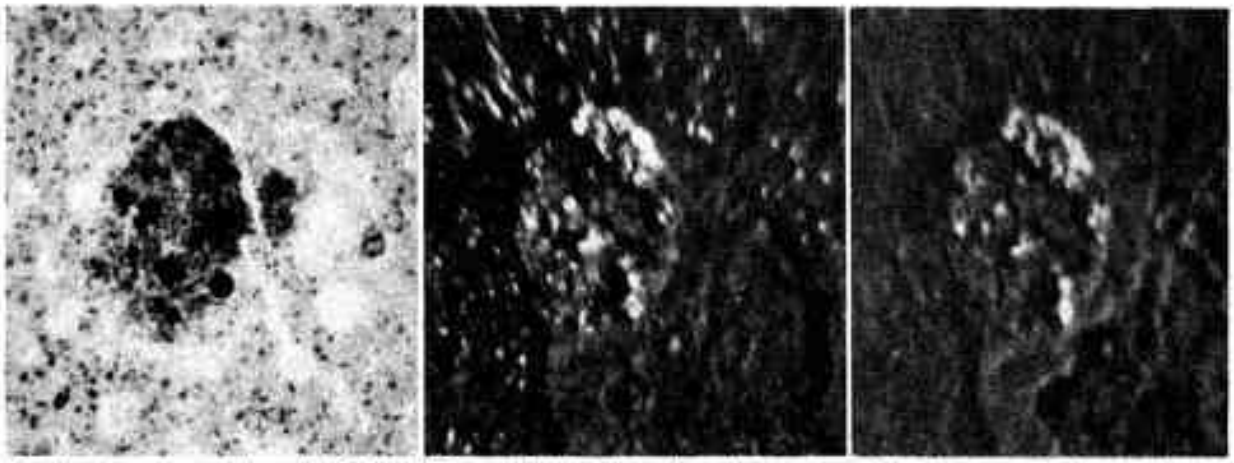


Fig. 4 – Amas de macrophages d'un foie de Poisson atteint de sidérose. A gauche, aspect morphologique. Au milieu, image d'émission ionique de fer. A droite, image d'émission ionique de strontium (× 200).

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

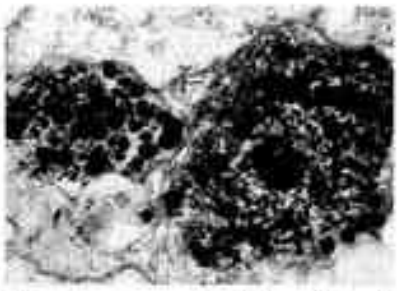


Fig. 5 – Lysosomes de cellule excrétrice de Mollusque contenant des amas naturels de sulfures d'argent et de cuivre et d'un composé indéterminé de cadmium (× 20 000).

gestives accumulent le titane et le fer de ces boues sous forme de combinaisons chimiques (oxyde, hydroxyde) sans action sur les fonctions métaboliques. Des effets à long terme préjudiciables aux animaux nécessiteraient que ces combinaisons soient lentement dissociées dans les cellules. Toutefois, l'abondance de composés dénués de valeur alimentaire entraine une exagération du processus de rejet et pourrait être, secondairement, une cause de mortalité tout comme la présence, dans les cellules à poussière, de cristaux aux arêtes vives qui provoquent des lésions des lysosomes et sont à l'origine de la silicose.

Des cellules ultra-spécialisées se chargent d'un métal déterminé

Contrairement aux cellules intestinales d'insectes qui immobilisent les métaux les plus divers, il est des cellules qui ne manifestent leur activité qu'à l'égard de métaux bien déterminés. Il y a donc intervention de plusieurs types cellulaires même si, dans le sang, les différents métaux à éliminer se trouvent dans des états physico-chimiques très semblables. Tels sont les amibocytes de l'huitre, espèce très résistante au cuivre et au zinc. En zones polluées par le cuivre, comme le sont quelques estuaires de Cornouailles, certains amibocytes se chargent du métal complexé qu'ils prélèvent dans le sang et l'accumulent : c'est la maladie verte (à ne pas confondre avec le « verdissement », procédé ostréicole qui fournit des huitres très estimées et qui utilise une algue microscopique). Lors d'intoxication par le zinc, c'est une autre catégorie d'amibocytes qui intervient. Les teneurs en cuivre et en zinc atteignent jusqu'à 13 000 et 25 000 $\mu g.g^{-1}$ au niveau cellulaire.

Des métaux induisent eux-mêmes la synthèse de leur piège

Des protéines soufrées de faible poids moléculaire, dites métallothionéines, jouent un rôle primordial dans la capture des métaux chez les vertébrés, les mollusques et les crustacés, d'où l'intérêt qu'elles suscitent actuellement. Leur biosynthèse est induite par un excès, dans l'organime, de métaux des groupes I B et II B de la classification périodique (Cu, Ag, Au, Zn, Cd et Hg). Leur fonction étant de complexer ces éléments, essentiels ou non mais tous potentiellement toxiques, elles interviennent dans les processus physiologiques normaux et sont d'efficaces agents de détoxication. Elle provoquent alors une élévation significative de la teneur en métaux des organes où elles sont le mieux représentées, foie et rein des vertébrés par exemple.

L'existence de métallothionéines n'est certainement pas générale dans le règne animal. A l'exception des blattes où une protéine analogue a été découverte mais qui pourrait être synthétisée par des micro-organismes associés, les insectes semblent en être dépourvus. Dans ce groupe, la fonction dévolue ailleurs aux métallothionéines est assumée par un ommochrome, pigment qui, comme elles, est de faible poids moléculaire, comporte du soufre et dont la synthèse est inductible.

Des éléments s'associent en sels d'une exceptionnelle stabilité

La co-existence de deux éléments peut accroître la toxicité de chacun d'eux par un phénomène de synergie. Pourtant, il n'en va pas toujours ainsi et une telle co-existence devient bénéfique lorsque les deux éléments sont, au contraire, antagonistes.

L'immobilisation intracellulaire de deux éléments antagonistes ayant chacun un seuil de toxicité est peut-être le plus curieux des exemples où bioaccumulation et détoxication se confondent. Chez les mammifères, l'antagonisme sélénium-mercure se manifeste par la précipitation dans le foie, la peau et les reins, de particules de séléniure de mercure cristallisé sous forme de tiemannite. L'excrétion de celle-ci étant impossible, les teneurs en mercure et en sélénium augmentent peu à peu. On a pu doser jusqu'à 500 $\mu g.g^{-1}$ de mercure dans le foie de dauphins de Méditerranée et 300 $\mu g.g^{-1}$ dans celui d'un chat en apparence normal capturé dans l'aire polluée de Minamata. Ces valeurs paraissaient d'autant plus étonnantes qu'aucun vertébré intoxiqué expérimentalement ne survit lorsque la teneur en mercure de son foie atteint 50 $\mu g.g^{-1}$ mais, dans les deux cas, les taux de mercure étaient corrélés à de forts taux de sélénium, soit respectivement 170 et 80 $\mu g.g^{-1}$. Ce phénomène se produit chez l'homme. En Angleterre, on connait le cas d'un ouvrier qui, s'étant contaminé pendant plus de vingt ans dans une usine de traitement du mercure, ne présentait aucun symptôme d'intoxication ; sa peau était simplement devenue grise par suite de la précipitation, dans le derme, d'une multitude de granules de séléniure mercurique.

La combinaison chimique réalisée paraît rigoureusement indégradable. Elle abolit la toxicité de chaque élément pour l'individu et ses éventuels prédateurs. Cet exemple ne restera sans doute pas unique et l'on peut prévoir que l'antagonisme sélénium-cadmium met en jeu un processus analogue.

L'homme, ultime consommateur

La consommation fréquente d'animaux et de plantes ayant vécu en milieu chargé d'éléments nocifs peut être une source d'intoxication. Une réglementation fixe donc, pour les éléments potentiellement toxiques, une teneur maximale au-delà de laquelle un aliment est considéré impropre à la consommation. Cette mesure de prévention met le consommateur à l'abri d'accidents, mais la notion de « concentrations acceptables » est moins satisfaisante sur le plan scientifique en ce qu'elle néglige une donnée essentielle, l'état chimique de l'élément. Un métal piégé par une métallothionéine est assimilable puisque la protéine est détruite par les enzymes digestives, alors qu'il ne l'est pas s'il est engagé dans une combinaison qui reste stable malgré la forte acidité du suc gastrique : une Cd-thionéine, une Hg-thionéine, un métal présent sous forme de phosphate peuvent être dangereux, mais les sulfures de cuivre et d'argent et le sélénium mercurique ne le sont pas. Ainsi, paradoxalement, et par le jeu des bioaccumulations, un métal peut perdre sa toxicité alors que sa teneur globale s'élève. Enfin, il ne faut pas oublier que l'homme dispose lui aussi de défenses naturelles comme la synthèse de métallothionéines, les antagonismes divers et peut-être d'autres mécanismes encore inconnus. Aussi est-il permis de croire que les risques d'accidents dus aux métaux lourds sont moindres qu'il n'y paraissait il y a quelques années.

BIBLIOGRAPHIE PROPOSÉE PAR LE CDST

Le Centre de documentation scientifique et technique du CNRS propose de fournir aux lecteurs intéressés une bibliographie comportant les 100 références les plus récentes signalées dans la base de données PASCAL (voir bon de commande p. 30).

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

La peinture des catacombes : histoire d'une recherche

Existe-t-il un message cohérent dans les peintures des catacombes ? Une nouvelle équipe internationale travaille à une présentation exhaustive de ces monuments. Mais déjà l'auteur en propose une approche mathématique.

Jean GUYON

La renommée d'ouvrages comme *Fabiola* (1854) et surtout *Quo vadis?* (1895) a fait naître une légende autour des catacombes qu'ils présentent comme des lieux de refuge et de culte de la première communauté chrétienne de Rome en butte aux persécutions. La réalité est plus banale : ces monuments sont seulement des cimetières souterrains (doublés, d'ailleurs, de cimetières de surface plus mal connus) et, à ce titre, ils sont étudiés par les archéologues et les historiens qui s'efforcent de les examiner avec les moyens de la science de leur temps.

Une tradition érudite.

Dès l'origine, les catacombes ont été un objet d'étude. Bosio, qui redécouvrit cette « Rome souterraine » il y a quatre siècles à peine, sut mettre à profit ses relations à la Cour pontificale pour qu'elles financent une véritable équipe de recherche : dessinateurs, architectes, hommes de peine l'aidèrent à réaliser une œuvre scientifique d'envergure, la *Roma sotterranea*, parue après sa mort, en 1632. Ce gros in-folio reste si utile qu'un éditeur allemand vient d'en proposer une reproduction anastatique : non content de donner des renseignements irremplaçables sur des monuments maintenant disparus, il fournit aussi, pour chaque cimetière, une documentation exhaustive, qui est parfois la seule disponible encore aujourd'hui. La description, rédigée dans un italien savoureux, est accompagnée d'un plan aussi précis que le permettaient les moyens de l'époque et d'une copie des peintures conservées qui doit plus au style du XVIIe siècle qu'à celui du premier art chrétien (comparer les figures 1 et 2).

Fig. 1 – Cimetière « Aux deux lauriers » : dessin du plafond de la chambre 3, d'après la *Roma sotterranea*, d'A. Bosio (1632), p. 591 D.

Il est normal que les peintures tiennent une large place dans cet ouvrage, non seulement parce qu'elles ont fasciné ceux qui ont redécouvert les catacombes, mais aussi parce qu'elles jouaient leur rôle dans les controverses du temps : les catholiques y retrouvaient, contre les protestants, des images prétendument inconnues de l'Eglise primitive, comme la Vierge à l'enfant (voir la couverture), où elle est associée à l'Adoration des Mages). L'archéologie chrétienne a été durablement marquée par ce climat dans lequel elle est née : en 1938 encore, Mgr. Wilpert donnait un petit livre dont le titre (que je traduis de l'italien) est assez révélateur : « La foi de l'Eglise naissante d'après les monuments de l'art funéraire antique ».

C'est le même homme, cependant,

□ Jean Guyon, chargé de recherche au CNRS – Laboratoire Lenain de Tillemont – Université de Paris IV – 1, rue Victor Cousin – 75005 Paris.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

Fig. 2 – Cimetière « Aux deux lauriers » : plafond de la chambre 3, état actuel. Registre supérieur : le Christ entre les Apôtres Pierre (à d.) et Paul (à g.) ; registre inférieur : l'Agneau de Dieu, entouré (de g. à d.), des saints Gorgonius, Pierre, Marcellin et Tibarce, qui étaient enterrés dans la catacombe. (Cliché PCAS, Lau B 01).

Fig. 3 – Cimetière « Aux deux lauriers » : *Arcosolium* 79. Orphée charmant les animaux (l'installation d'une tombe supplémentaire dans la lunette a entraîné la disparition de la partie inférieur de la scène). (Cliché PCAS, Lau L 04).

qui avait publié, trente-cinq ans auparavant, une œuvre scientifique aussi achevée pour son temps que l'était, au XVIIe siècle, celle de Bosio : *Le pitture delle catacombe romane*. Toutes les peintures des cimetières y sont reproduites, sur des planches souvent en couleurs (comme la photographie en couleurs n'existait pas en 1903, Wilpert eut recours aux services d'un aquarelliste, qui rehaussa les clichés avec une fidélité de touche rare). Cet ouvrage, devenu introuvable, mériterait, lui aussi, une reproduction anastatique, si une équipe internationale ne travaillait à une nouvelle édition des peintures des catacombes.

Une entreprise nouvelle

La Pontificia Commissione di Archeologia Sacra et la Deutsche Forschungsgemeinschaft sont les maîtres d'œuvre de cette entreprise à laquelle sont également associés le CNRS et l'Ecole française de Rome. Le choix de l'équipe s'est porté en priorité sur une catacombe, le cimetière « Aux deux lauriers » (ou nécropole des saints Marcellin-et-Pierre), qui présente un double avantage : elle renferme, à elle seule, le cinquième des peintures de la Rome chrétienne, et l'étude de sa topographie est très avancée (à cause, notamment, de fouilles qu'il m'a été possible de faire grâce à l'aide de la Commission pontificale et de l'Ecole française). Si l'entreprise reçoit un accueil favorable, l'enquête sera progressivement étendue aux autres cimetières.

Choisir de présenter les peintures, non par époques successives (comme l'avait fait Wilpert), mais catacombe par catacombe, est intentionnel : il s'agit, non seulement d'éviter de se prononcer sur des datations parfois controversées, mais surtout de replacer les œuvres d'art dans le cadre qui est le

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

Fig. 4 – Cimetière « Aux deux lauriers » : paroi sud de la chambre 78. Dans la lunette de l'*arcosolium*, scène de repas funéraire (le maître du banquet s'adresse à la servante Irène, qui est debout, à droite) ; sur la paroi, à droite et à gauche, défunts représentés en orant et en orante, dans l'attitude de la prière antique. (Cliché PCAS, Lau L 02).

Fig. 5 – Cimetière « Aux deux lauriers » : relevé photogrammétrique de la paroi sud de la chambre 78. (Relevé et dessin : De Waal – DFG).

leur. Un plan précis du cimetière, une abondante introduction qui présente à la fois son histoire et sa topographie permettront de connaître exactement la localisation (et, parfois, la chronologie) du décor peint, dont l'ouvrage fournira, d'ailleurs, une illustration détaillée.

Cette illustration fera au dessin une place presque aussi importante qu'au temps de Bosio : les relevés photogrammétriques ont semblé, en effet, le moyen le plus sûr et le plus efficace pour donner des parois entières une image précise (meilleure que la photographie quand les peintures sont abîmées ou obscurcies par des champignons : comparer les figures 4 et 5), tandis que la photographie en couleurs sera réservée, comme au temps de Wilpert, à la reproduction des scènes isolées, pour lesquelles son rôle est irremplaçable.

Donner d'un monument une présentation aussi exhaustive que possible n'est pas seulement un scrupule d'érudit ; c'est surtout un moyen commode de permettre une approche globale du premier art chrétien, qui répond bien aux souhaits et aux attentes de la recherche récente.

Dans le premier art chrétien, des emprunts...

Contrairement à l'usage suivi jusqu'à présent, il n'est plus possible, en effet, de présenter (et d'étudier) presque exclusivement les scènes figurées, quand elles ne sont qu'un élément d'un décor plus complexe, dans lequel l'ornement tient une large part (voir la couverture). Pour bien connaître cet ornement, il faudra attendre l'achèvement de la publication projetée, mais de simples comptages permettent, dès maintenant, d'en apprécier l'importance. Sur les quelque 2317 représentations recensées par le récent *Repertorio topografico delle pitture delle catacombe romane* d'A. Nestori (1975), 1162, soit plus de 50 % relèvent de l'ornementation, quand 812 (soit à peine plus d'un tiers) sont des sujets tirés de l'Ecriture Sainte.

Le décor l'emporte donc sur la narration, – un décor fait de lignes géométriques, stylisation de fleurs dont il garde, significativement, les couleurs dominantes : le vert des tiges et le rouge des pétales. La mort, pour notre sensibilité moderne, paraît singulièrement absente de cet univers riant qui est dans le droit fil, pourtant, de la tradition antique. On comprend mieux, alors, les autres emprunts que les peintres chrétiens ont faits à l'art de leur temps : réutilisation de thèmes dont ils ont renouvelé la signification sans en changer la représentation, comme le Pasteur, symbole de la *Philanthropia* – mais aussi Bon Pasteur (c'est-à-dire Christ), ou l'orante, image de la *Pietas* – mais aussi de la prière chrétienne ; citations, peut-être textuelles, de la mythologie : l'Orphée qui apparaît sur les scènes tardives (fig. 3) est-il le Christ-Orphée, ou Orphée tout court ?

...et un discours cohérent?...

A trop accuser les similitudes, on négligerait, cependant, l'originalité de cet art, qui tient à la représentation des scènes tirées de l'Ecriture Sainte. Contrairement à ce que pensait encore Mgr. Wilpert il est douteux, pourtant, que ces scènes aient servi à construire un discours catéchétique comme celui que tenaient les prédicateurs du temps (les Pères de l'Eglise rapprochaient volontiers, en effet, les deux volets de l'Ecriture – l'Ancien et le Nouveau Testament – pour y trouver des parallèles qui expliquaient l'histoire du Salut) : à nouveau, une évaluation chiffrée dément cette interprétation.

Si l'art chrétien procédait à la façon des Pères, la proportion des scènes tirées de l'Ancien et du Nouveau Testament devrait être à peu près semblable d'une catacombe à l'autre ; or, comme le montre le tableau I (qui ne retient que les cimetières pour lesquels des évaluations chiffrées peuvent être significatives), les pourcentages sont très variables selon les nécropoles. Encore ne s'agit-il là que d'une approche assez grossière : si discours cohérent il y avait dans l'art chrétien, ce n'est pas dans des cimetières entiers, mais à travers le rapprochement de thèmes au sein des chambres funéraires qu'il devrait surtout s'exprimer ; mais il semble qu'il n'en est rien dans ce cas aussi.

L'étude précise des associations de thèmes au sein des ensembles clos que constituent ces chambres relèverait de l'analyse combinatoire, et elle n'a pu encore être faite ; à défaut, il est possible, avec un outillage plus élémentaire, d'examiner, deux par deux, les associations des scènes les plus fréquemment représentées, – celles qui ont le plus de chance d'avoir été combinées. J'ai ainsi

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

étudié le rapprochement des deux thèmes les plus populaires : pour le Nouveau Testament, la résurrection de Lazare (dont le succès se comprend bien dans un cimetière) et, pour l'Ancien, le miracle de l'Horeb, qui est une image du baptême ; comme le montre le tableau 2, les taux d'associativité sont si dissemblables d'un cimetière à l'autre qu'il est exclu d'expliquer la juxtaposition de tels sujets par le renvoi à un discours immédiatement perceptible par le spectateur.

...ou une inlassable répétition d'images du Salut ?

Ces représentations ont pourtant un sens général, qui provient, sans doute, de leur accumulation. Un comptage, à nouveau, paraît le meilleur moyen de le mesurer : à considérer le tableau 3, sur lequel sont reportés les sujets tirés des Ecritures qui ont été le plus fréquemment représentés à Rome, il est clair, en effet, que les artistes se sont plu à illustrer, indéfiniment et sans crainte de se répéter, l'histoire du Salut : Dieu a sauvé son peuple, par l'entremise de Moïse, et il a sauvé les justes (Jonas, Daniel, Noé) qui mettaient en lui leur confiance, comme Jésus, à son tour, sauve de la mort, de la maladie ou de la faim (faim du corps et faim de l'âme, également rappelées par le miracle de la multiplication des pains). La peinture permet à ces images d'être éternellement présentes auprès de la tombe et elle rend ainsi actuel le salut apporté, jadis, dans l'Histoire Sainte ; elle est comme une garantie : celui qui est enterré à proximité peut, comme Jonas, Daniel ou Lazare, tout attendre d'un Dieu qui peut tout.

Une signification voisine peut être proposée pour d'autres représentations qui ne ressortissent pas de l'Histoire Sainte, comme ces scènes de repas, particulièrement nombreuses au cimetière « Aux deux lauriers » (fig. 4 et 5) : la famille du mort banquette en l'honneur du défunt, ainsi que le faisaient les hommes de la basse-Antiquité, quelle que fût leur religion. Ces images sont gage que les rites nécessaires au repos du disparu ont bien été accomplis, en même temps qu'elles indiquent qu'ils seront, à date fixe, régulièrement répétés, et, comme les scènes de l'Ecriture, elles signifient que le mort peut, à bon droit, reposer dans la paix, comme le disent volontiers les inscriptions funéraires du temps.

Car c'est un message de confiance, finalement, que livrent ces représentations. Il n'y a guère lieu de s'en étonner : l'essentiel de la production funéraire chrétienne de Rome date du dernier quart du IIIe siècle et du premier quart du IVe siècle, c'est-à-dire d'une époque où la société chrétienne vit dans la paix (sauf pendant le bref et sanglant intermède de la dernière persécution) et où elle investit très largement la société civile, obtenant de l'empereur, à partir de 313, d'abord une reconnaissance, puis une consécration ; les images que cette société produit ou commandite alors traduisent bien, en même temps que sa foi religieuse, une tranquille assurance de l'avenir.

L'approche mathématique simple que j'ai privilégiée m'a semblé un biais commode pour disposer de quelques données sûres, dans ce domaine de l'histoire de l'art où triomphent souvent les appréciations subjectives. Mais l'interprétation que je propose ne prétend pas être originale ; elle s'inscrit dans le droit fil d'une recherche récente, qui replace systématiquement les peintures dans leur contexte, et les rapporte à la société qui les a produites. Par rapport à la vision qu'en avaient un Bosio ou, naguère encore, un Wilpert, l'image du premier art chrétien s'en trouve enrichie à nos yeux ; nul doute, pourtant qu'elle ne porte, elle aussi, sans que nous sachions le voir, les rides de son âge.

Tableau 1

CLASSEMENT DES CIMETIERES ROMAINS COMPTANT PLUS DE 5 % DES SCENES TIREES DE L'ECRITURE, PAR ORDRE DECROISSANT D'IMPORTANCE DES SCENES ISSUES DU NOUVEAU TESTAMENT

Cimetière	% des scènes du N.T. par rapport aux scènes tirées de l'Ecriture
« Aux deux lauriers »	43,45
de Callixte	42,85
Maius	34,92
(moyenne des catacombes)	(34,48)
de Domitille	34,06
des Giordani	25,71
de la via latina	11,86

Tableau 2

TAUX D'ASSOCIATIVITE DES REPRESENTATIONS DU MIRACLE DE L'HOREB ET DE LA RESURRECTION DE LAZARE DANS LES QUATRE CIMETIERES CHRETIENS DE ROME COMPTANT LE PLUS DE SCENES TIREES DE L'ECRITURE

	% par cimetière			
Type d'association	Callixte	Domitille	*Maius*	« Aux deux lauriers »
Horeb/Lazare	50	68,7	57,1	68,4
Lazare/Horeb	50	84,6	50	76,4

Tableau 3

LES QUATRES SCENES DE L'ANCIEN ET DU NOUVEAU TESTAMENT LE PLUS REPRESENTEES DANS LES PEINTURES DES CIMETIERES CHRETIENS DE ROME

Scène	Nombre	% par rapport aux scènes de l'A.T. ou du N.T.	
Ancien Testament			
Miracle de l'Horeb	76	19,14	61,7
Jonas	68	17,12	
Daniel	55	13,85	
Noé dans l'arche	46	11,59	
Nouveau Testament			
Résurrection de Lazare	66	31,50	70,73
Multiplication des pains	39	18,66	
Guérison du paralytique	26	12,44	
Adoration des Mages	17	8,13	

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

La biologie des populations d'oiseaux marins

Fascinés par les progrès incessants de la biologie moléculaire, peu de gens en France se sont rendus compte qu'à l'autre « extrémité », c'est-à-dire au niveau de l'adaptation de l'organisme vivant à son milieu naturel, l'étude de l'animal entier avait été complètement renouvelée par l'optique évolutive et la pluridisciplinarité. Le chercheur, qui par prudence devait se limiter à la question « comment », est amené aujourd'hui à se poser la question « pourquoi ».

Pierre JOUVENTIN

L'intérêt de l'étude des oiseaux

L'étude des oiseaux a toujours suscité beaucoup d'intérêt dans le public et, peut-être par cela même, une certaine réserve dans les milieux scientifiques. Pour se convaincre de l'importance de ce groupe zoologique dans l'avancement des connaissances, il suffit pourtant de se pencher sur l'histoire des sciences, en particulier en écologie, éthologie, évolution et spéciation.

Ce statut de « modèle » est dû à la facilité avec laquelle on peut observer ces vertébrés dans leur milieu naturel en n'importe quelle région du globe, mais aussi au fait qu'ils sont suffisamment proches de nous par leurs canaux sensoriels pour que nous puissions entrer facilement dans leur monde. Les oiseaux dans leur quasi-totalité sont, comme l'homme, des visuels et des auditifs et il est possible, du moins dans un premier temps, de les étudier sans appareillage à la différence des dauphins ou chauve-souris. Cette opportunité a souvent permis de découvrir grâce à eux des lois qui se sont révélées généralisables à d'autres groupes zoologiques.

L'étude des populations d'oiseaux terrestres a par exemple fourni l'occasion d'effectuer plusieurs percées en écologie théorique, en particulier en biogéographie et structure des communautés (cf. article paru dans le n° 45 du *Courrier du CNRS*). L'étude des oiseaux marins quant à elle est restée très descriptive, même dans les pays anglophones où elle a pourtant toujours été bien représentée.

Les Terres australes et antarctiques françaises

Les Terres australes et antarctiques françaises (TAAF) constituent en nombre d'espèces et d'individus le royaume des oiseaux de mer. Notre équipe travaillant principalement dans ce cadre, nous avons mis en œuvre un programme important les concernant, bien que nous étudions parallèlement des mammifères beaucoup moins variés de ces contrées (1). L'administration des TAAF, qui relève du Secrétariat d'état aux DOM-TOM, gère trois groupes d'îles dans le Sud de l'Océan indien et, par l'intermédiaire des expéditions polaires françaises, la portion du continent antarctique revendiquée par notre pays. Dans l'hémisphère austral, les mers dominent très largement sur les masses continentales. Ces terres ventées, perdues en plein milieu des océans, représentent à la fois un refuge faunistique sans commune mesure avec la Camargue, pour ne citer que la réserve française la plus riche en effectifs, et un haut-lieu de l'étude des populations d'oiseaux marins. Bien que les quatre districts des TAAF se répartissent sur près de 30° de latitude (Terre-Adélie sur le continent antarctique, Crozet et Kerguelen en zone subantarctique, St-Paul-Amsterdam en zone subtropicale), ils possèdent en commun de constituer des écosystèmes originaux puisque ceux-ci dépendent non de la terre mais de la mer. Les écosystèmes que nous connaissons sont en effet basés sur la végétation terrestre alors que les chaînes alimentaires commencent ici avec les algues marines ou phytoplancton. Les invertébrés et vertébrés marins qui s'en nourrissent sont la proie des oiseaux qui ramènent à terre principalement sous forme de déjections la matière organique. Les invertébrés et les plantes terrestres sont donc, à l'inverse du schéma classique, souvent dépendants de cet apport.

Ainsi, les oiseaux de ces régions prélèvent une partie de la production océanique, représentant la principale source de la vie insulaire, le trait d'union entre la mer et la terre (cf. pour plus de détails, les 67 communications du colloque international sur « les écosystèmes subantarctiques », organisé en juillet 1981 et publié en 1982, référence 2 à la fin de l'article).

Une nouvelle espèce d'albatros

Il est d'ailleurs rare à notre époque de trouver des écosystèmes aussi originaux et riches, encore intacts. Cette mise à l'abri de ces milieux très vulnérables est due à leur isolement et à leur climat inhospitalier (hormis les îles subtropicales St-Paul et Amsterdam, d'ailleurs très modifiées par des tentatives de colonisation).

(1) C'est-à-dire une espèce authentique et non une variété géographique de l'albatros hurleur.

□ Pierre Jouventin, chargé de recherche au CNRS, est responsable de programmes d'écologie des oiseaux et mammifères dans les Terres australes et antarctiques françaises (TAAF) et fait partie du groupe des spécialistes sur les oiseaux de mer du « Scientific committee on antarctic research ». L'équipe dont les travaux sont exposés ici regroupe des chercheurs et techniciens du laboratoire « Oiseaux et mammifères » du Muséum national d'histoire naturelle de Paris et de l'Institut des sciences de l'évolution de l'université de Montpellier, (LA 327). – Place Eugène Bataillon – 34060 Montpellier Cedex.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

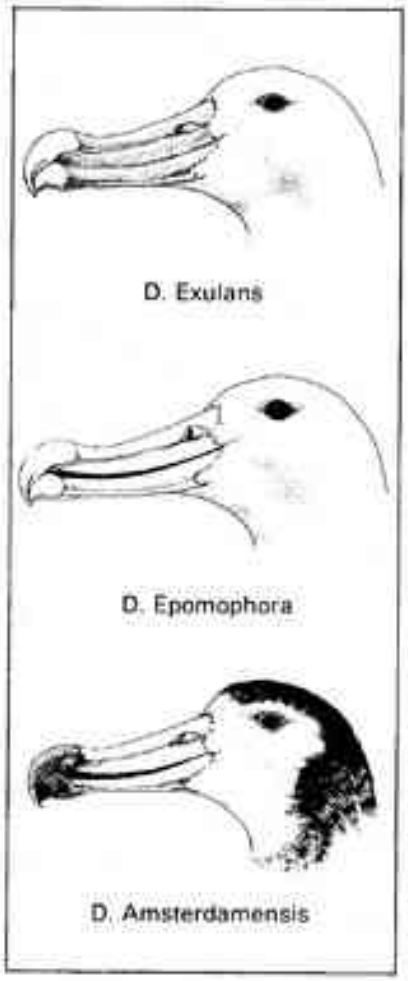


Fig. 1 – Les trois espèces de grands albatros (sous-genre *Diomedea*) : l'albatros hurleur (*D. exulans*) le plus connu possède une vaste distribution dans les îles des océans australs, l'albatros royal (*D. epomophora*) se reproduit en Nouvelle-Zélande et sur les îles voisines ; nous venons de décrire l'albatros d'Amsterdam (*D. amsterdamensis*) qui a été découvert sur l'île du même nom située au milieu de l'Océan indien et qui pèse 2,5 kgs de moins que son plus proche parent, l'albatros hurleur.

Les difficultés d'accès sont aussi à l'origine de la méconnaissance de cette faune. En ces régions, nous pouvons encore revivre l'époque des naturalistes voyageurs et découvrir au détour d'une côte non prospectée une colonie inconnue de deux millions de manchots, comme cela est arrivé à l'un de nous récemment. Lors d'une récente mission (été austral 1981-82), ont été trouvées six nouvelles espèces nicheuses pour l'archipel Crozet, ce qui porte le total pour cette localité à trente-six et en fait la communauté d'oiseaux marins la plus riche qui soit connue au monde avec trente-quatre espèces dont dix-neuf pétrels, six albatros, quatre manchots (3).

Plus surprenant, à la même époque, au sommet de l'île Amsterdam, un autre membre de notre équipe (J.P. Roux) découvrait une petite colonie d'un albatros inconnu pour la science (4). L'existence de cette colonie avait été signalée mais aucun ornithologue n'avait pu voir cet oiseau qui se reproduit en fait à une époque très différente de celle des autres grands albatros.

Cet albatros, qui avait été confondu à partir de photographies avec l'albatros hurleur (*Diomedea exulans*), possède en plus du décalage de son cycle reproducteur une tache à l'extrémité du bec (fig. 1) et, comme l'albatros royal (*D. epomophora*), une barre noire à la commissure du bec, les reproducteurs ayant un plumage sombre très voisin de celui des immatures d'albatros hurleurs (*D. exulans*). Il a été reconnu comme une « bonne espèce » (1) par le célèbre ornithologue et systématicien E. Mayr.

Son petit nombre et son plumage proche de celui d'un jeune albatros hurleur l'avait fait passer inaperçu jusqu'à nos jours. Or cette espèce, dont aucun spécimen n'a été trouvé dans un musée, mesure 3,20 m d'envergure!

Soixante tonnes d'oiseaux au kilomètre carré

Mais l'époque des naturalistes voyageurs ne va pas tarder à se terminer même dans ces îles lointaines. Nous sommes donc passés du qualitatif au quantitatif tout d'abord en dénombrant les populations des différentes espèces répertoriées.

Participant au programme international « biomass » (biological investigations of marine antarctic systems and stocks), notre équipe est d'ailleurs tenue d'effectuer, à intervalles réguliers dans les mêmes colonies d'études, les décomptes des espèces considérées comme des indicateurs des ressources marines en vue d'assurer une gestion rationnelle de l'océan austral.

Des comptages directs sont effectués dans les petites colonies d'albatros mais dans les grandes et dans celles de manchots, nous devons utiliser la photographie aérienne. Quant aux pétrels vivant en terriers, les plus difficiles à dénombrer, il faut employer la méthode des carrés-témoins. Ces études sont loin d'être terminées en particulier aux Kerguelen dont la surface est comparable à la Corse et la longueur de côtes à la France. Mais nous pouvons évaluer dès maintenant l'avifaune de l'archipel Crozet, dont la superficie ne dépasse pas cinq cents kilomètres carrés, à plus de vingt-cinq millions d'oiseaux soit trente mille tonnes.

Pour préciser l'impact de l'avifaune sur les ressources océaniques, il nous faut aussi analyser les contenus stomacaux de toutes ces espèces, et si possible en toutes saisons. Ce travail lent réalisé en collaboration avec le laboratoire de zoologie de la faculté des sciences de Brest n'est pas non plus terminé et il n'a été rendu possible que par la mise au point de techniques de pré-

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

lèvement du contenu stomacal. Il était en effet hors de question de sacrifier les oiseaux, ne serait-ce qu'en raison de la quantité de contenus stomacaux nécessaires. Dès 1981, nous avons employé une technique de lavage d'estomac qui a permis d'atteindre le but, ceci même dans le cas où il s'agissait de parents ou de poussins en cours d'élevage car nous remplacions alors le contenu stomacal prélevé par une bouillie de poisson équivalente que nous faisions ingérer à l'animal.

Pour fixer un ordre de grandeur, disons que la seule colonie de manchots royaux de l'île aux Cochons (Crozet), qui comprend trois cent mille couples reproducteurs représente en fait un million d'individus et consomme annuellement cinq cent vingt-sept mille tonnes de céphalopodes en majorité.

Les oiseaux en mer

Ces opérations nauséabondes permettent de se faire une idée précise des proies consommées, le régime alimentaire étant une dimension importante de la niche écologique de n'importe quel animal. Les oiseaux marins présentent, en effet, le paradoxe d'être beaucoup mieux connus à terre qu'en mer, ce qui est évidemment compréhensible.

Nous avons essayé de combler cette lacune en multipliant les observations à partir du navire ravitailleur des TAAF. Il ne s'agissait pas seulement d'obtenir la liste des espèces de l'Océan indien ou même de lier la présence de certaines espèces aux latitudes, comme cela a généralement été fait jusqu'à présent, mais de comprendre le déterminisme de la présence de chaque espèce.

Par chance, les observations étaient effectuées sur le « Marion-Dufresne » qui est aussi un navire océanographique. Sur chaque fiche d'observation étaient notées la profondeur, la salinité, la température de l'eau et bien d'autres paramètres dont beaucoup se sont révélés sans incidence sur le phénomène mais dont certains se sont montrés déterminants (fig. 2).

Au cours des quatre dernières années, deux mille deux cents fiches ont été collationnées sur un parcours de trente mille kilomètres par plusieurs observateurs travaillant en toutes saisons avec les mêmes méthodes. L'ensemble des données informatisées a été traité par J.C. Stahl au centre de calcul de Strasbourg et il a pu différencier les espèces sur des critères qui n'étaient pas jusqu'alors apparents.

L'ornithologie auxiliaire de l'océanographie

L'étude des régimes alimentaires des oiseaux marins situe leur place dans les chaînes alimentaires de l'Océan austral et l'importance de leurs prélèvements. La connaissance des zones de pêches de ces oiseaux permet en plus de localiser cet impact, qui se répartit de façon hétérogène et variable selon l'époque de l'année.

Une espèce d'albatros (*Diomedea melanophris*) ne prospecte que les zones fortement productives jusqu'à cent cinquante kilomètres des côtes. Les immatures d'une autre espèce (*D. exulans*) ne s'alimentent que dans les zones pélagiques productives (fronts de convergence, hauts-fonds). Les pétrels des genres *Pachyptila*, *Daption* indiquent la présence de bancs superficiels d'*Euphausiacés* (= les crustacés qui constituent le Krill) et les manchots des genres *Eudyptes*, *Pygoscelis*, la présence de bancs en profondeur. Bref, il n'est pas impossible que l'ornithologie devienne dans l'avenir un auxiliaire peu coûteux à l'exploitation rationnelle et équilibrée des ressources marines.

Dès maintenant, elle pourrait contribuer à la connaissance de l'Océan austral en particulier dans les domaines de l'océanographie physique et biologique. En effet, certains oiseaux sont indicateurs de discontinuités physiques de l'océan, qui représentent des zones de pêche. Ces phénomènes peuvent être à grande échelle comme les convergences ou constituer des phénomènes locaux, plus difficiles à détecter, comme les tourbillons et les turbulences à proximité des plateaux péri-insulaires ou au-dessus des canyons sous-marins.

Par ailleurs, l'étude des régimes alimentaires des oiseaux marins et de leur comportement sur les lieux d'alimentation (habitats, méthodes de prospection et d'alimentation, taille des groupes de pêche, migrations) fournit des renseignements précieux sur la biologie des espèces consommées. Ces renseignements concernent la taxinomie, les cycles reproducteurs, la dynamique des populations, la biogéographie et les migrations. A titre d'exemple, les céphalopodes sont rarement capturés lors

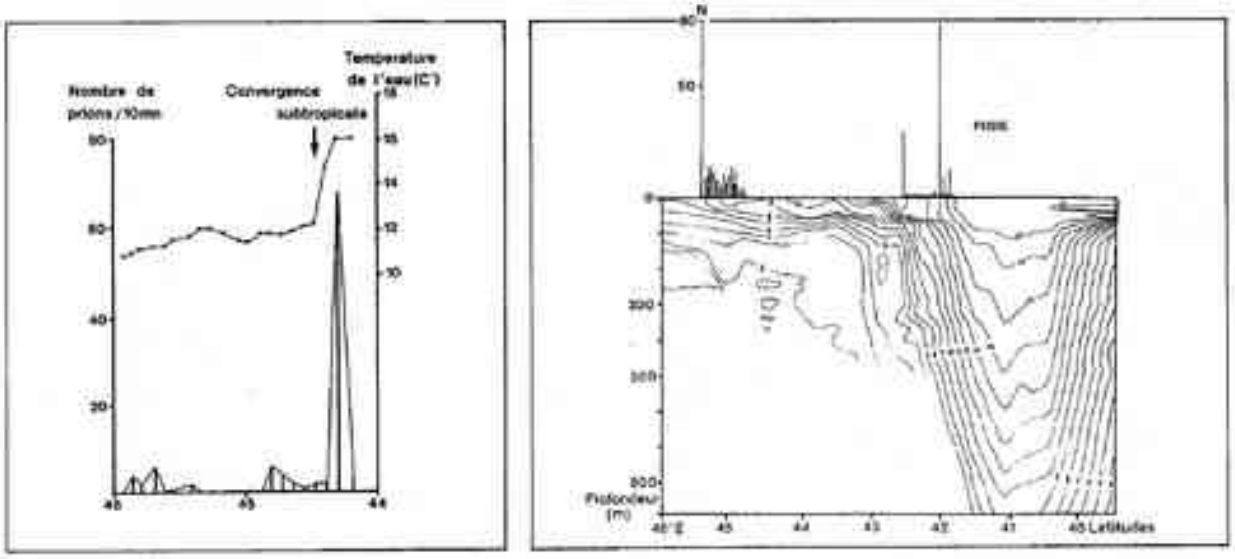


Fig. 2 – A gauche le nombre de prions observés augmente brusquement avec la température de l'eau car passe, au nord des îles Kerguelen, la convergence subtropicale qui doit provoquer des remous et ramener du zooplancton à la surface. A droite, même phénomène au passage de la zone des convergences au nord de Crozet (le profil vertical de température effectué lors du même transect a été communiqué par L. Gamberoni).

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

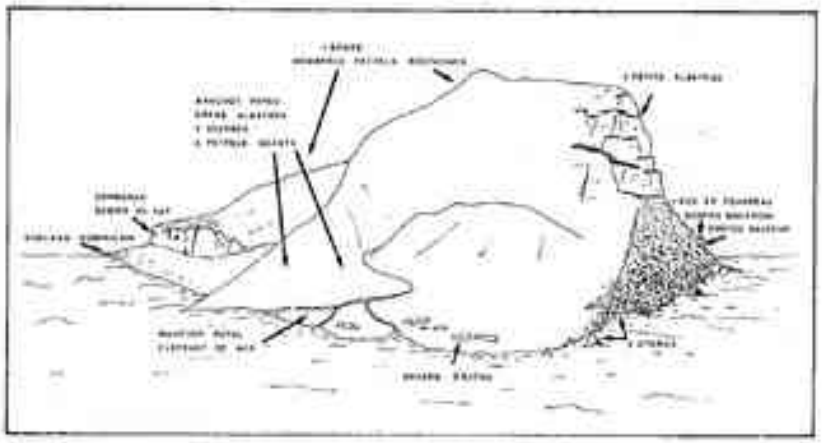


Fig. 3 – Le partage des sites de reproduction entre les différentes espèces d'oiseaux et mammifères sur une île subantarctique de surface réduite et entourée d'immenses étendues océaniques.

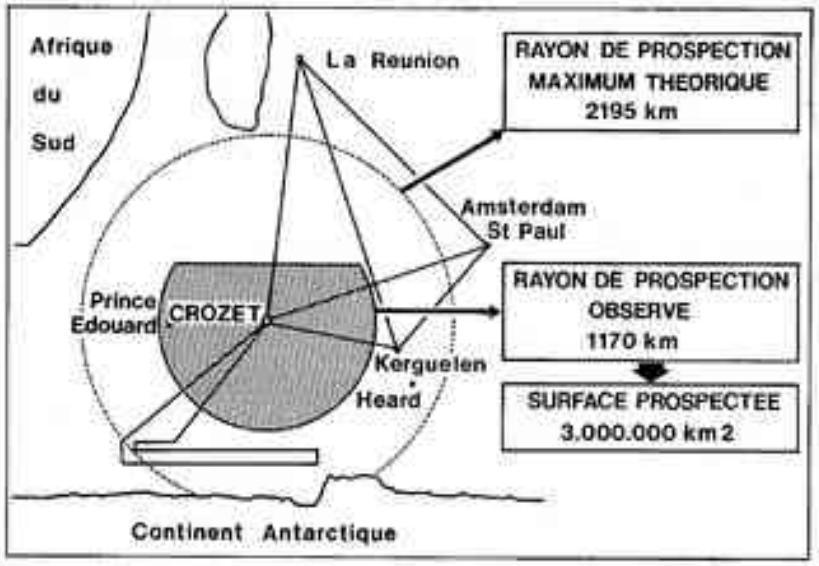


Fig. 4 – D'après sa durée d'absence entre deux nourrissages du poussin et sa vitesse de vol, l'albatros fuligineux à dos sombre pourrait atteindre un rayon de prospection maximal de 2 195 km. Les observations en mer montrent qu'il ne dépasse pas 1 170 km et qu'il ne franchit pas la convergence subtropicale, ce qui représente tout de même une surface de prospection de trois millions de km2.

des campagnes océanographiques, alors qu'ils sont abondants et souvent bien conservés dans les contenus stomacaux de nombreuses espèces aviennes.

Le partage des ressources du sous-sol

De la haute mer à la côte, en passant par le plateau périinsulaire les observations sur les lieux de nourrissage ajoutées aux analyses de contenus stomacaux permettent de comprendre le partage des ressources alimentaires entre les trente-quatre espèces d'oiseaux marins des îles Crozet. Mais la coexistence de toutes ces espèces ne se limite pas au domaine océanique. Au moment de la reproduction, ces millions d'oiseaux convergent vers les îlôts perdus dans les océans, qui présentent le double avantage d'être les plus proches des aires d'alimentation et d'être dépourvus de mammifères prédateurs. Lorsque les îles sont minuscules par rapport à la richesse et à la surface des mers environnantes, la densité devient très forte et il y a compétition pour les biotopes de nidification.

C'est le cas des îles Crozet où deux espèces de manchots vivent dans les mêmes éboulis, le gorfou macaroni (*Eudyptes chrysolophus*) par-dessus et le gorfou sauteur (*E. chrysocome*) par-dessous (fig. 3). Par contre, dans l'archipel des Kerguelen, quatorze fois plus vaste, les deux espèces nidifient séparément. Lors d'une récente mission de six mois dans une cabane installée sur l'île de l'Est (Crozet), nous avons suivi quinze espèces de pétrels nocturnes qui aménagent leur nid dans le sol. Dans le même terrier, nous avons vu se succéder jusqu'à cinq couples différents de la même espèce, de nombreux terriers étant de plus réutilisés par une autre espèce qui se reproduit plus tard. Après avoir relevé la profondeur du sol meuble, la pente, l'exposition, la nature du sol et sa capacité à absorber l'humidité, etc., nous avons pu constater que les trous n'étaient pas creusés au hasard mais que même le sous-sol de l'île était réparti suivant des règles strictes entre les différentes espèces et en fonction de quelques-uns des paramètres pris en compte dans nos relevés statistiques. Comme pour la distribution en mer, le déterminisme du phénomène apparaissait par-delà la description et la quantification.

Le rayon de prospection, facteur clef

Ainsi peu à peu, nous parvenons à préciser les niches écologiques des différents oiseaux marins et les lois du fonctionnement de ces peuplements. Pour reprendre l'exemple de la communauté la plus riche et la plus complexe, les vingt-cinq millions d'oiseaux qui se reproduisent sur les minuscules îles Crozet doivent trouver leur nourriture dans les mers environnantes et les trente-quatre espèces en présence se répartissent les ressources en minimisant la compétition de toutes les manières possibles.

Certaines espèces sont spécialisées dans un type de proie ou une technique de pêche. Certaines se reproduisent pendant l'hiver austral lors du minimum de productivité océanique. Certaines migrent en dehors de l'époque de nidification. Certaines ajoutent une troisième dimension à l'océan en pêchant en profondeur comme les manchots. Certaines enfin, comme la plupart des albatros et pétrels, vont chercher la nourriture de leur poussin plus loin en mer que les autres.

Il est actuellement impossible de suivre un oiseau en mer pour savoir où il va se nourrir et jusqu'à présent, les chercheurs se contentaient de calculer un rayon maximal de prospection en multipliant la vitesse de vol de l'oiseau par son nombre d'heures d'absence du nid entre deux nourrissages du poussin. Les observations en mer nous ont permis d'une part de montrer que des immatures abandonnent le pourtour des îles aux reproducteurs et d'autre part

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

de mesurer non plus le rayon théorique mais effectif de prospection autour des lieux de reproduction.

Ceci n'était possible que dans la situation idéale d'îles situées à des milliers de kilomètres des continents, les possessions françaises du Sud de l'Océan indien étant dans ce cas. L'échelle, comme on peut le voir sur la figure 4, est en effet impressionnante et elle explique la difficulté à obtenir ce genre de résultats.

Au fur et à mesure que les résultats se précisent, il se confirme que le problème majeur rencontré par ce groupe zoologique est bien la distance entre les zones de pêche et celles de nidification : plus une espèce va chercher loin sa nourriture, moins elle trouve de compétiteurs, mais moins les voyages alimentaires deviennent rentables (fig. 5). Les espèces spécialisées dans les longues distances ne peuvent alors élever plusieurs poussins et certaines ne parviennent même pas à élever un poussin chaque année. On aboutit à une apparente absurdité : celui qui se reproduit le moins a le plus de chance d'élever son jeune ! Le schéma de la figure 6 illustre ce paradoxe qui a d'abord été mis en évidence sur les oiseaux de Crozet : une relation existe entre la durée des absences des parents (que nous savons aujourd'hui relier au rayon de prospection réel) et l'importance de la ponte, un gradient apparaît qui va des espèces terrestres (ici le canard d'Eaton et le chionis ou bec-en-fourreau) prolifiques aux plus pélagiques, qui pondent un œuf tous les deux ans (« *Stratèges K* »).

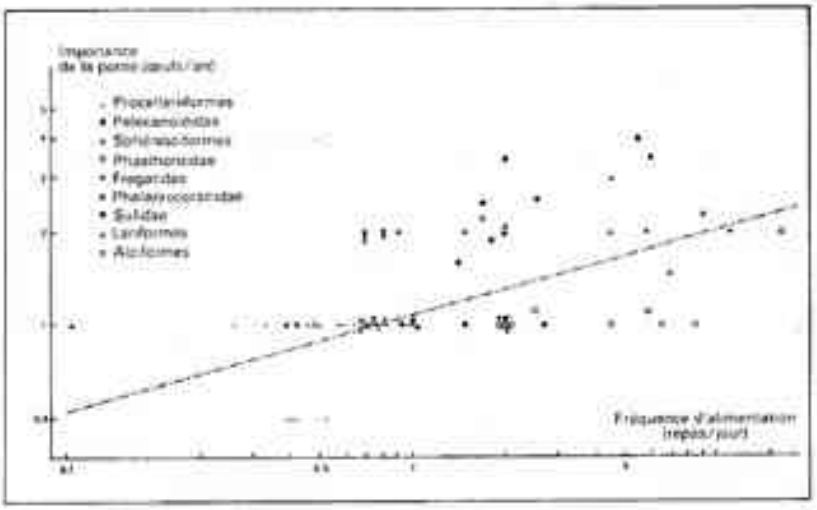


Fig. 5 – Chez les oiseaux de mer, l'importance de la ponte annuelle pour chaque espèce est fonction de la fréquence d'alimentation du poussin, elle-même liée au rayon de prospection (significatif pour P = 0,99).

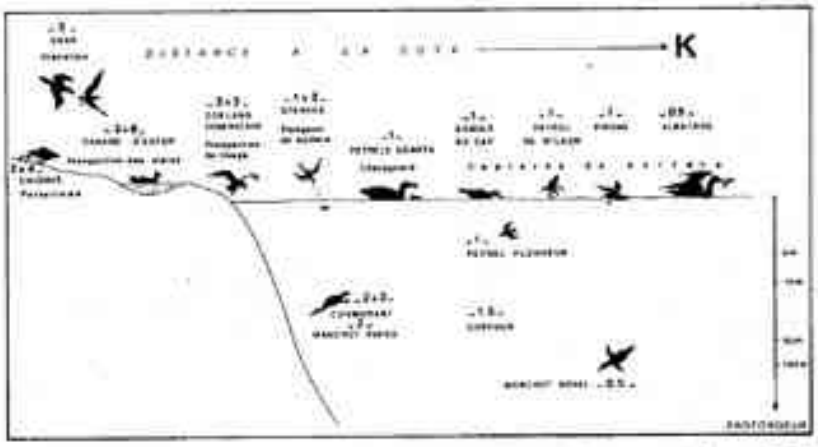


Fig. 6 – En plus des techniques de pêche ici représentées, la distance entre la zone d'alimentation et le lieu de reproduction varie d'une espèce à l'autre et a des conséquences sur l'importance de la ponte : plus les voyages alimentaires sont longs, moins le nombre de jeunes qui pourraient être élevés par les parents sera grand (espèces de Crozet).

Fichés depuis vingt-cinq ans

Il était jusqu'à présent difficile de comprendre quelle nécessité poussait des espèces comme les grands albatros à se reproduire aussi rarement. Pouvant mal l'expliquer par la sélection individuelle, certains ont fait appel à la sélection de groupe. D'après Wynne-Edwards (5), qui s'appuie fortement sur les pétrels et albatros pour proposer une théorie générale, les animaux éviteraient de surexploiter le milieu – ici l'océan – en limitant eux-mêmes leurs naissances. La plupart des auteurs plus prudents, s'appuient sur une loi biologique qui fait qu'en général, les grands animaux possèdent un long cycle reproducteur : un albatros de dix kilogrammes et trois mètres cinquante d'envergure ne parviendrait simplement pas à élever son jeune en une seule année.

Nous avons pu récemment montrer

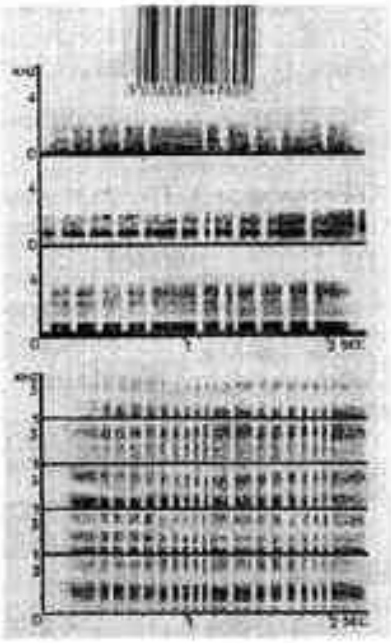


Fig. 7 – Dans le n° 50 du « Courrier du CNRS », on voyait que pour lutter contre le vent et le froid, les manchots empereurs se déplacent avec leur œuf ou leur poussin sur les pattes et forment des sortes de mêlées de rugby. Or nous savons par baguages que les conjoints sont fidèles tout au long du cycle reproducteur et qu'ils nourrissent seulement leur poussin. Ne possédant pas de nid et donc de repère topographique, les deux conjoints ont bien du mal à se retrouver parmi une masse de plusieurs dizaines de milliers de couveurs. Ils y parviennent non par la vue, comme nous l'avons montré expérimentalement (10), mais par l'ouïe. Leur chant est constitué d'une série de sons et de silences qui, par leur nombre et leur durée, indiquent le sexe et l'identité de l'oiseau, un peu à la manière du « code-barre » (en haut) qui permet aujourd'hui de gérer les stocks des commerçants. Au milieu, les chants de trois mâles qui se distinguent par leur découpage. En bas, cinq chants de la même femelle qui se montrent identiques et sont typiques de ce sexe dont le découpage est deux fois plus rapide.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

que cinq des sept espèces d'albatros vivant dans les TAAF ne se reproduisent jamais l'année suivante quand les parents viennent de réussir l'élevage de leur poussin. Or parmi ces cinq espèces, trois sont du même ordre de taille que les albatros annuels. Il n'est donc plus possible d'expliquer les choses ainsi et il n'est pas non plus nécessaire comme nous l'avons vu auparavant de faire appel à la sélection de groupe, du moins en ce qui concerne les oiseaux de mer.

Prenons un seul exemple pour montrer qu'il ne s'agit pas de caractères isolés mais bien d'un ensemble d'adaptations allant dans le même sens, bref d'une stratégie au vrai sens du terme (6). Mille sept cents albatros fuligineux à dos sombre (*Phoebetria fusca*) ont été bagués, certains depuis 1966 par J.L. Mougin et contrôlés de très près depuis sept années, en particulier par H. Weimerskirch qui s'est spécialisé dans l'étude des albatros. Sur la figure 4, nous avons vu que cette espèce, dont l'indice de capacité voilière se situe parmi les plus élevés, exploite l'océan d'une manière que l'on pourrait qualifier d'extensive puisque le parent peut aller chercher la nourriture du poussin à mille deux cents kilomètres. Or, chaque oiseau pond en moyenne 0,62 œuf/an et chaque couple produit seulement onze œufs dans une vie qui pourrait atteindre quatre-vingts ans. De plus, la reproduction ne commence pas avant l'âge de douze ans en moyenne. Les taux de mortalité à l'âge adulte sont aussi bas qu'une telle longévité potentielle le suppose, puisqu'ils ont varié en six années entre 5,8 % et 0 %, ce dernier chiffre signifiant que les soixante-quatorze oiseaux contrôlés en 1975 ont tous été revus vivants l'année suivante.

Au passage, le lecteur comprend à quoi servent les fichiers de baguages d'oiseaux, dont les premiers aux TAAF ont été créés voici environ vingt-cinq ans par P. Paulian aux Kerguelen et J. Prévost en Terre Adélie.

Danse d'albatros et variabilité génétique

Il nous faudrait entrer dans le détail pour expliciter le pourquoi du comportement de cette espèce, tout aussi inattendu mais tout aussi logique car basé sur la synchronisation parfaite des conjoints qui est indispensable à l'élevage du poussin par des oiseaux aussi pélagiques. Enumérons simplement les résultats :

– aucun cas de divorce n'a été trouvé parmi les cent quatre-vingt-cinq oiseaux suivis, le couple une fois formé ne peut être dissous que par la mort de l'un des conjoints ;

– cette fidélité absolue est d'autant plus remarquable que le couple, ne se reproduisant pas chaque année, change dans 61 % des cas de nid d'une année à l'autre ;

– la formation du couple dure en moyenne 3,5 années ;

– la parade nuptiale, d'une complexité telle qu'elle n'a pas d'équivalent dans d'autres groupes zoologiques, consiste en une danse composée d'une série d'attitudes sexuées et stéréotypées se succédant très vite comme des mots dans une phrase qui évolue dans le temps et à laquelle le partenaire ne répond pas au hasard (7).

Nous n'avons signalé que la parade nuptiale, c'est-à-dire les signaux optiques des albatros. Nous aurions pu aussi dire un mot de leurs signaux acoustiques pour lesquels les manchots (8, 9) et en particulier le manchot empereur est un exemple beaucoup plus net d'adaptation (fig. 7).

Au même titre que l'éthologie ou l'écologie sur laquelle nous avons surtout insisté, la physiologie de cet albatros mériterait d'être étudiée par d'autres car un métabolisme d'économie semble compléter les adaptations démographiques et voilières, le couveur pouvant demeurer sur son nid sans boire ni manger pendant plus de vingt jours.

Terminons par la biologie des populations au sens limité, c'est-à-dire par la génétique des populations que l'un de nous, C.R. Viot, a abordé depuis quatre ans en collaboration avec la section génétique de notre Institut. Les résultats montrent déjà que les populations de manchots royaux des îles Crozet et Kerguelen sont complètement isolées génétiquement, que la systématique classique des pétrels est confirmée par l'électrophorèse, que la population de chionis vivant à Kerguelen dans un environnement beaucoup plus varié présente une variabilité nettement plus forte que celle de Crozet. Mais pour en revenir à une vision intégrée des problèmes, les albatros se sont révélés peu ou pas polymorphes : cette quasi-absence de variabilité génétique est-elle en rapport avec leurs adaptations parfaites mais toujours identiques ? Il est difficile de l'affirmer dans l'état actuel des recherches mais il faut noter qu'inversement, les oiseaux côtiers et terrestres ont présenté une variabilité normale qui pourrait être due à un complexe génique polyvalent suivant les conditions locales auxquelles ces espèces ne peuvent se soustraire en se déplaçant.

Les problèmes sont loin d'être tous éclaircis mais cette approche unifiée par la sélection naturelle et donc convergente des différents aspects de la biologie d'une espèce (à quelque groupe zoologique qu'elle appartienne) est si fructueuse que nous parvenons à répondre à des questions qui auraient été qualifiées d'anthropomorphiques, il y a peu. Ainsi, dès 1969, le célèbre ornithologue anglais D. Lack avait montré que les oiseaux marins étaient tous monogames parce que la difficulté à nourrir le jeune rendait indispensable dans ce groupe la coopération des conjoints. L'exemple de l'albatros fuligineux à dos sombre en est l'illustration et le cas limite. Les questions en biologie des populations ne se posent plus aujourd'hui de la même manière et ceci est la preuve de l'avancement des connaissances dans ces domaines complètement renouvelés par l'optique évolutive.

BIBLIOGRAPHIE

(1) P. Jouventin, A. Cornet. « La vie sociale des phoques ». *La Recherche*, 105 : 1058 – 1066 (1979).

(2) *Les Ecosystèmes subantarctiques*. Publié sous la direction de P. Jouventin, L. Massé, P. Trèbern, 540 p., 1982 – Ce volume peut être expédié contre une participation aux frais de 100 F. envoyée au CNFRA, 39 ter Rue Guy-Lussac, 75005 – PARIS.

(3) P. Jouventin, J.L. Mougin, J.C. Stahl, H. Weimerskirch. *The seabirds of the french subantarctic islands and Adélie land*. The status and conservation of seabirds. Cambridge. ICBP, 1982 (sous presse).

(4) P. Jouventin, J.P. Roux. « Discovery of a new albatross ». *Nature*, 305 : 181 (1983). J.P. Roux, P. Jouventin, J.L. Mougin, J.C. Stahl, H. Weimerskirch. « Un nouvel albatros (*Diomedea amsterdamensis*, *novo species*) découvert sur l'île Amsterdam ». *L'Oiseau et la RFO*, 53 : 1-11 (1983).

(5) V.C. Wynne Edward. *Animal Dispersion in relation to social behaviour*, Oliver And Boyd, Edinburgh (1962).

(6) P. Jouventin, J.L. Mougin. « Les stratégies adaptatives des oiseaux de mer ». *Terre et Vie*, 35 : 217-272 (1981).

(7) P. Jouventin, G. De Monicault, J.M. Bienvenue. « La danse de l'albatros, *Phoebetria fusca* ». *Behaviour*, 78 : 43-80 (1981).

(8) P. Jouventin. *Visual and vocal signals in Penguins, their evolution and adaptive characters*. Paul Parey Ed., 149 pp. Advances in ethology, 24 (1982).

(9) P. Jouventin, Y. Le Maho, J.L. Mougin. « Les manchots ». *Pour la Science*, 30 : 79-91 (1980).

(10) P. Jouventin, M. Guillotin, A. Cornet. « Le chant du manchot empereur et sa signification adaptative ». *Behaviour*, 70 : 231-250 (1979).

BIBLIOGRAPHIE COMPLEMENTAIRE PROPOSEE PAR LE CDST

Le Centre de documentation scientifique et technique du CNRS propose de fournir aux lecteurs intéressés une bibliographie comportant les 100 références les plus récentes signalées dans la base de données PASCAL (voir bon de commande p. 30).

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

Fer, fontes et aciers. Des matériaux traditionnels aux matériaux nouveaux

Ces matériaux, pourtant traditionnels n'ont pas donné toute leur mesure. Une véritable résolution dans leurs traitements et leurs procédés de fabrication a été suscitée notamment par les nécessités des industries automobile et nucléaire et les impératifs d'économie d'énergie.

Gilles POMEY

Le fer est connu depuis l'Antiquité (environ 1200 avant J.C.) et il a joué un rôle essentiel dans le développement de l'humanité jusqu'à la révolution industrielle du siècle dernier. Jusqu'au XIV ème siècle, le fer était élaboré à l'état solide par réduction du minerai par le charbon de bois dans un bas foyer puis martelé et forgé. A partir de cette époque, on a su obtenir la fonte (alliage de fer et de carbone) à l'état liquide, dans les premiers hauts fourneaux. Ceci a permis un développement rapide de la fonderie de fonte et a conduit à la fabrication du fer par affinage de la fonte dans un four à brasser (fer puddlé) puis à celle de l'acier par cémentation du fer, à l'état solide, dans un creuset. Enfin, au milieu du XIX ème siècle s'est développée la fabrication d'acier liquide par conversion de la fonte dans une cornue grâce aux procédés Bessemer puis Thomas, ou par fusion sur sole dans les fours Martin-Siemens. La sidérurgie moderne était née. Son développement a permis celui de la civilisation technique où nous vivons et il a été marqué par une série de progrès de plus en plus rapides conduisant à une production de masse d'aciers à propriétés très diversifiées grâce à la fusion au four électrique, au soufflage par l'oxygène, à l'utilisation du vide, à la refusion d'électrodes consommables, à la coulée continue... comme à la fabrication de pièces à très hautes caractéristiques par forgeage isotherme, fonderie de précision à cire perdue ou métallurgie des poudres avec compression isostatique à chaud.

□ Gilles Pomey, dirige l'établissement de Saint-Germain-en-Laye de l'Institut de recherches de la sidérurgie française, IRSID, 78105 Saint-Germain-en-Laye Cedex.

Le fer

Aux basses températures et jusqu'à 910°C, le fer cristallise dans le système cubique centré (Feα). Au-dessus de cette température et jusqu'à 1390°C, il cristallise dans le réseau cubique faces centrées (Feγ). Il fond à 1534°C après être repassé par l'état cubique centré. A l'état α et en-dessous de 769° (point de Curie), le fer est ferromagnétique. On sait l'obtenir à l'état extra-pur grâce à des procédés tels que la zone fondue.

A la fois ductile donc facile à mettre en forme, et dur donc résistant, c'est un métal présent en grande quantité dans l'écorce terrestre. Les propriétés exceptionnelles de ses alliages avec le carbone (fontes et aciers) puis avec d'autres métaux ont permis d'obtenir une extrême variété de propriétés d'usage.

Les fontes

Ce sont les premiers alliages fer-carbone (2,5 à 5% environ) obtenus liquides grâce à leur bas point de fusion. A ces teneurs, le carbone cristallise sous forme de graphite et c'est la quantité et la morphologie du graphite (lamelles, rosettes, amas) qui contrôlent les propriétés mécaniques des fontes.

En jouant principalement sur la vitesse de refroidissement, on peut modifier la structure métallographique et passer d'une fonte blanche ferritique à une fonte grise à graphite grossier. De façon générale, les fontes sont faciles à mouler et à usiner, elles sont dures, résistantes à l'usure et à la corrosion mais fragiles (moins de 1 % d'allongement).

Pour remédier à cette fragilité, on a mis au point depuis longtemps (Réaumur) des traitements thermiques de malléabilisation permettant d'obtenir jusqu'à 10 % d'allongement. Toutefois, le progrès le plus spectaculaire a été obtenu par la cristallisation du graphite en sphérolites grâce à un traitement de la fonte liquide par le magnésium puis à une innoculation par le silicium permettant de multiplier les sphérolites. La fonte à graphite sphéroïdal ainsi préparée peut avoir jusqu'à 15 % d'allongement et des caractéristiques mécaniques ajustables par traitement thermique. Elle est utilisée aussi bien pour des pièces de moteur que pour les gros tuyaux centrifugés d'adduction d'eau.

La fonte, peut-être à cause de son ancienneté, reste un matériau peu étudié. Il faut toutefois attendre des progrès à partir d'une meilleure connaissance des mécanismes mis en jeu (solidification, germination, fragilisation,...) comme du développement des technologies de fonderie adaptées à ce matériau (centrifugation, aspiration, coulée sous pression, ...).

Les aciers

Ce sont des alliages de fer et de carbone. Celui-ci, comme d'ailleurs presque toutes les additions, durcit le fer et selon la teneur, on obtient les aciers doux (0,1 % C), mi-durs (0,4 % C) et durs (1 % C). Pour la majorité des applications, des exigences de ductilité, de ténacité et de « soudabilité », ont conduit à développer surtout les aciers à plus basse teneur en carbone, doux et extra-doux.

A haute température, la solubilité du carbone dans le fer γ ou austénite est très élevée (1,8 % C à 1100°C). En revanche, sa solubilité dans la ferrite ou fer α est très limitée ($\leq$0,03 % C à 710°C et 0,002 % à 20°C). Au cours du refroidissement, le carbone précipitera sous forme du carbure de fer, la cémentite Fe_3C. Selon les conditions de refroidissement, la morphologie de

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

Des impératifs techniques nous ayant empêché de faire paraître dans un seul numéro l'intégralité des textes consacrés aux matériaux, nous publions ici les deux derniers articles de ce dossier. Nous remercions les auteurs de leur compréhension.

Rectificatif : Les auteurs de la photo couverture du n° 52-53, nous prient de préciser que M. A. Sawczuk, membre de l'académie de Pologne, actuellement recteur de l'Académie d'Udine, est co-auteur du mémoire dans lequel cette photo a été publiée à la suite de son séjour de longue durée au Laboratoire de mécanique et d'acoustique de Marseille.

la cémentite sera différente et il en résultera des variations des propriétés mécaniques. A côté de la ferrite contenant du carbone en sursaturation, on pourra avoir des structures ferrite et cémentite ou ferrite et perlite (eutectoïde lamellaire de ferrite et de cémentite). Par refroidissement rapide (trempe) et grâce à la présence d'éléments d'alliage, on peut également obtenir des structures beaucoup plus dures, telles que la bainite ou la martensite dans laquelle tout le carbone est resté en insertion dans le réseau distendu du fer qui prend alors la forme quadratique.

A côté du carbone, on trouve toujours dans les aciers du silicium (0,01 %) et du manganèse (0,2 %) que l'on a ajouté pour désoxyder le bain liquide. L'un et l'autre durcissent l'acier, le premier augmente sa trempabilité, c'est-à-dire la possibilité d'obtenir de la martensite, le second diminue la fragilité introduite par le carbone. On trouve également d'autres éléments, indésirables d'où le nom d'impuretés qu'on leur donne. Ce sont essentiellement le soufre qui étant insoluble dans le fer donne des sulfures nuisibles aux propriétés mécaniques et le phosphore en solution de substitution qui durcit mais fragilise ou sensibilise l'acier à la corrosion. Enfin, on trouve toujours de l'azote qui durcit, fragilise et favorise le vieillissement de l'acier. L'addition d'aluminium peut permettre de précipiter dans certaines conditions bien déterminées du nitrure d'aluminium sous forme ultra-fine et d'obtenir des propriétés mécaniques nouvelles.

L'utilisation de cette précipitation ultra-fine (dispersoïdes) a été généralisée ces dernières années avec des additions de niobium, vanadium et titane donnant des précipités de carbure, nitrure et carbonitrure. Il en résulte des grains très fins et un durcissement considérable (plus de 40 %) de la matrice ferritique permettant d'obtenir les nouveaux aciers microalliés à haute limite d'élasticité.

On peut également utiliser cette précipitation, à plus basse température, dans le domaine de la recristallisation de la ferrite après laminage à froid pour contrôler l'orientation des nouveaux grains. Comme la déformation plastique, par exemple lors d'un emboutissage, dépend de l'orientation cristallographique des grains, on a cherché à développer certaines orientations plus favorables aux dépens des autres et ainsi obtenir des tôles orientées, à texture contrôlée, et à emboutissabilité améliorée. C'est le cas de la majorité des tôles minces laminées à froid en aciers extra-doux pour la carrosserie automobile fabriquée actuellement.

La recherche de l'allégement des véhicules a conduit à développer des nuances encore plus dures ou ayant un meilleur compromis résistance-ductilité d'où l'apparition de tôles rephosphorées à durcissement par solution solide ou de tôles « double phase » à durcissement par formation de plages de martensite dans la ferrite, lors du refroidissement.

On sait que l'acier est très sensible à la corrosion, il rouille. Par leur surface spécifique, les tôles minces en acier sont très vulnérables ; aussi assiste-t-on depuis quelque temps à un extraordinaire développement des tôles revêtues. A côté du fer noir protégé par son oxyde et du fer blanc protégé par l'étain, aux applications bien particulières (boîtes de conserve), on a vu apparaître des tôles électrozinguées, galvanisées sur une ou deux faces, plombées (pour les réservoirs d'essence) et prélaquées. A la diversité des applications répond la diversité des procédés !

Par elle-même, la taille de grain (d) est un paramètre qui contrôle la résistance des aciers : plus le grain est fin, plus l'acier a une limite d'élasticité élevée (Re) : $Re = \sigma_0 + kd^{-1/2}$ (loi de Petch). On peut contrôler cette taille de grain en jouant sur la transformation $\gamma \rightarrow \alpha$ qui affine le grain, sur la présence d'une précipitation (dispersoïdes) qui empêche le grain γ initial de grossir et, enfin, en écrouissant à chaud le grain γ (laminage contrôlé). Ces remarques sont à l'origine des traitements thermomécaniques qui profitent des opérations de laminage à chaud pour traiter l'acier et obtenir des propriétés équivalentes ou même meilleures que par les traitements thermiques classiques et qui se développent rapidement grâce aux économies d'énergie qu'ils entraînent (suppression des réchauffages).

L'utilisation de tôles fortes dans des constructions de grande dimension, soudées, avec des conditions de sécurité très grandes (constructions navales et off-shore, chaudronnerie chimique, pétrochimique et nucléaire) comme l'obtention de tôles pour gros tubes soudés (supérieurs à 400 mm de diamètre) pour le transport du gaz naturel ou du pétrole, a conduit à utiliser tous les moyens connus pour obtenir à la fois de hautes caractéristiques mécaniques (Re de 355 à 500 N/mm²), une grande ténacité et une bonne soudabilité. Citons l'emploi d'aciers à dispersoïdes et à bas carbone, les traitements thermomécaniques, et en particulier le laminage contrôlé dans des conditions très sévères, le contrôle de la nature et de la forme des inclusions (sulfures) par l'addition de manganèse et de terres rares, la limitation des teneurs en soufre et phosphore, etc...

Lorsque l'emploi du produit est beaucoup plus spécifique, on peut optimiser les conditions de fabrication pour obtenir le meilleur compromis de propriétés. C'est ainsi que le refroidissement accéléré d'acier à dispersoïdes a permis d'obtenir de nouveaux ronds à

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

béton soudables (Torsid) et que le choix de nouvelles additions et de traitements thermiques appropriés permet d'espérer des rails résistant mieux à l'usure et à la fatigue (Re > 500 N/mm ?), c'est-à-dire apportant une augmentation sensible de la sécurité des trains.

Les aciers alliés

Pour augmenter la dureté de l'acier sans élever sa teneur en carbone, ou pour obtenir des propriétés particulières (résistivité, élasticité, ténacité....) on ajoute d'autres éléments dans le bain liquide. Leur présence modifie le diagramme d'équilibre fer-carbone ainsi que la cinétique de transformation lors du refroidissement. On pourra ainsi obtenir soit des alliages entièrement ferritiques ou austénitiques à la température ambiante, soit des microstructures complexes (perlite, bainite et martensite) dépendant des conditions de refroidissement. Il en résulte des propriétés très différentes d'où une gamme très étendue d'applications. Citons à titre d'exemple : les tôles à 3 % Si pour transformateurs, les aciers à ressort Mn-Si ou Cr-Mo-Si, les aciers patinables au Cu-Si, les aciers resulfurés à usinabilité améliorée, les aciers non fragilisables (6 à 9 % Ni) pour emplois cryogéniques tel que le transport du gaz naturel liquéfié, les aciers Mn-Mo ou Cr-Mo pour les chaudières et appareils à pression travaillant à chaud et surtout les aciers mi-durs et durs pour traitement thermique. Dans ce dernier cas, la dureté élevée **pouvant aller jusqu'à 1900 N/mm² est obtenue par une** trempe bainitique ou martensitique suivie d'un revenu (acier Ni-Cr, acier Cr-Mn, acier Ni-Cr-Mn).

A côté des traitements thermiques donnant une structure homogène dans tout le volume, on a développé, sous l'impulsion de l'industrie automobile, des traitements superficiels donnant une surface durcie mais conservant un coeur ductile. On améliore la tenue en service et on diminue l'emploi d'additions coûteuses. Ces traitements se développent rapidement, en plus de la trempe après chauffage haute fréquence et des traitements thermochimiques classiques (cémentation et carbonitruration gazeuse, nitruration), on voit apparaître la nitruration par plasma, l'implantation ionique, le bombardement électronique ou le traitement de la surface par laser qui permettent d'obtenir une amorphisation de la couche superficielle.

Fig. 1 – Cristaux de forme dendritique obtenus par solidification d'un acier. Microscopie électronique à balayage x 100. (Cliché Centre des matériaux).

Les aciers à haute résistance

Ils prolongent la catégorie précédente dans le domaine des caractéristiques mécaniques exceptionnelles. Ils ne forment plus une famille d'aciers à proprement parler mais des cas particuliers comme les aciers « maraging » à 18 % Ni dont la martensite cubique ductile est durcie par une précipitation très fine de composés intermétalliques $Ni_3(Mo, Ti)$ utilisés dans la construction aérospatiale, les aciers « Hadfield » à 13 % Mn dont la martensite est durcie par des carbures et employés dans la fabrication des cœurs d'aiguillage ou des broyeurs grâce à leur exceptionnelle résistance à l'abrasion, les aciers à 1 % C-1,5 % Cr spécifiques de la fabrication des roulements à billes et à aiguilles.

Nous ne citerons ici que les aciers à outils à teneur élevée en carbone (1 à 2 %) additionnés d'éléments formant des carbures tels que Cr, V, Mo, W et enfin les aciers à coupe rapide, les plus durs et les plus coûteux de tous les aciers, contenant jusqu'à 18 % W ou un ensemble d'additions tel que 6W-5Mo-4Cr-2V.

Les aciers inoxydables et réfractaires

La découverte des aciers inoxydables au début de ce siècle a ouvert la voie au développement de l'industrie chimique et à l'emploi des hautes températures. C'est la présence de chrome qui confère à l'acier une bonne résistance à la corrosion et à l'oxydation. C'est un élément alphagène qui, en teneur élevée : 13, 17 ou 25 %, donne un acier inoxydable ferritique (C = 0,1 %). Si l'on augmente la teneur en carbone et en nickel, éléments gammagènes, on pourra obtenir des aciers inoxydables martensitiques durs (par exemple l'acier à 13 % Cr-1 % Ni utilisé pour les instruments de chirurgie). Enfin, en augmentant encore la teneur en nickel, on arrive aux aciers inoxydables austénitiques, très ductiles, dont le prototype est le fameux 18 Cr-8 Ni que l'on emploie plutôt maintenant **sous la forme 17 Cr-12 Ni-Mo à bas carbone (C < 0,02 %) dans l'industrie nucléaire.** En changeant la proportion des éléments d'alliage on a obtenu des structures mixtes austéno-ferritiques (par exemple 21 Cr-8 Ni) dont les caractéristiques mécaniques surpassent celles des nuances austénitiques. Récemment, une nouvelle classe d'aciers inoxydables est apparue mettant en jeu le durcissement par phase intermétallique Ni_3Al : ce sont les aciers à durcissement structural (17 Cr-7 Ni-1,2 Al).

L'élévation des teneurs en chrome, silicium et aluminium augmente la résistance à l'oxydation de ces alliages, à condition d'augmenter simultanément la teneur en nickel. On obtient alors des alliages réfractaires résistant non seulement à l'oxydation dans l'air mais à la corrosion à chaud dans des gaz, dans des sels fondus, dans des métaux liquides. On peut citer à titre d'exemple les alliages 25 Cr-12 Ni, 25 Cr-20 Ni et l'alliage type des résistances électriques contenant 20 Cr-80 Ni d'où le fer a disparu.

Les superalliages

Des progrès spectaculaires ont été obtenus ces dernières décennies dans la construction des turbines à gaz grâce aux possibilités d'alliages résistant mécaniquement et chimiquement à des températures de plus en plus élevées. Ces « superalliages » de chrome, à base de nickel et de cobalt ont été découverts à Imphy vers 1930 dans le prolongement des aciers réfractaires Fe-Cr-Ni résistant au fluage. Ils se sont développés à partir de la **famille des « Nimomic » mis au point en Grande-Bretagne après 1940.**

Le durcissement des alliages base cobalt est dû à la précipitation de carbures tandis que celui des alliages de nickel est d'abord le résultat de la pré-

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

cipitation de phases intermétalliques γ' Ni_3 (Al, Ti) et accessoirement de celle des carbures. De nombreux éléments sont ajoutés pour augmenter la résistance à l'oxydation (Ti, Al), le durcissement de la solution solide et sa réfractérité (Mo, W, Ta, Nb), la résistance au fluage et la ductilité (B)... Comme il devient impossible de forger des alliages ayant plus de 40 % γ', c'est par fonderie que l'on fabrique des pièces pouvant avoir jusqu'à 60 % γ' dont les gros grains résistent bien au fluage. Dans le même ordre d'idée, on a développé récemment la fabrication de pièce par solidification dirigée de façon à n'avoir aucun joint de grain perpendiculaire à la contrainte appliquée et, même, on fabrique actuellement des aubes entièrement monocristallines.

La recherche de propriétés spécifiques, c'est-à-dire rapportées à la densité, toujours plus élevées conduit à explorer des voies nouvelles : métallurgie des poudres, poudres microcristallisées, eutectiques orientés (tels les COTAC de l'Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales, composites métalliques à fibres orientées de TaC), alliages mécaniquement renforcés par une dispersion très fine d'oxyde d'yttrium, etc...

Les alliages à propriétés particulières

Les possibilités des alliages de la famille des éléments ferreux ont permis de répondre à des problèmes très spécifiques : citons les alliages à dilatabilité réduite ou nulle comme l'INVAR (acier à 36 % Ni), les alliages à coefficient de magnétostriction élevé (Permalloy), les alliages magnétiquement doux Fe-Ni, les alliages pour aimant permanent Fe-Al-Ni ayant conduit aux Alnico (Al-Ni-Co) puis aux ferrites, céramiques à base d'oxyde ferrique Fe_2O_3 fritté additionné de Ba... On pourrait multiplier les exemples en allant jusqu'au passage des aciers à coupe rapides (au carbure de tungstène) aux carbures de tungstène frittés dans une matrice de cobalt (WC-Co).

La très grande diversité des propriétés des alliages de la famille du fer et par conséquent l'extrême variété de leurs applications ne sont plus à démontrer. Les progrès dans ce domaine font appel à des connaissances relevant de plusieurs disciplines : chimie, chimie-physique, physique du solide, mécanique des milieux continus et s'ils sont nombreux et continus, ils sont également dispersés à travers une grande quantité de nuances et de produits différents. Or les nécessités de l'industrie automobile puis des industries aérospatiale et nucléaire en ce qui concerne la constante de qualité, la propreté et les performances des aciers ont conduit à une véritable révolution des procédés de fabrication en ces vingt dernières années. Les impératifs d'économies d'énergie comme la recherche de compromis ductilité/résistance plus favorables ont provoqué l'apparition des traitements thermomécaniques dont on peut attendre une large extension dans les prochaines années. L'apparition de nouveaux moyens d'étude permet d'aborder maintenant et de façon prometteuse, les problèmes des surfaces que ce soit leur protection par des revêtements appropriés ou que ce soit leur renforcement par des traitements superficiels. Enfin, ces matériaux considérés comme traditionnels sont capables d'engendrer des matériaux nouveaux : verres métalliques, fibres (whiskers), pièces en solidification monocristalline, eutectiques orientés, composites à dispersion d'oxyde, poudres ultrafines... dont les propriétés d'emploi sont encore loin d'être bien connues.

Conducteurs ioniques : stockage de l'énergie et véhicule électrique

Pour affranchir la France d'une dépendance critique à l'égard du pétrole, le développement des accumulateurs à hautes performances semble être la meilleure solution, tant pour le stockage de l'électricité que pour le véhicule électrique.

Robert COLLONGUES

Les superconducteurs ioniques apparaissent aujourd'hui dans de nombreuses applications, les unes mettant en jeu de très faibles puissances – c'est le domaine de la micro-ionique – les autres au contraire faisant intervenir des puissances importantes. Dans ce domaine l'application majeure est leur utilisation comme électrolyte solide dans les batteries nouvelles.

Depuis la crise pétrolière de 1973, l'objectif de la politique énergétique nationale est d'affranchir la France d'une dépendance critique à l'égard du pétrole, importé en quasi-totalité ; la réalisation de cet objectif passe certes par les économies d'énergie, la diversification des sources d'énergie primaire mais également par la rationalisation des consommations (tableau I).

Nous envisageons deux aspect particulièrement caractéristiques de ce problème : le stockage statique et le véhicule électrique.

Des marges de manœuvre notables existent pour réduire la consommation de pétrole dans les secteurs industriel (substitution au fuel du charbon et surtout de l'électricité d'origine nucléaire...) et résidentiel (meilleure isolation thermique, géothermie, énergie solai-

□ Robert Collongues est professeur à l'université Pierre et Marie Curie et à l'Ecole nationale supérieure de chimie de Paris, laboratoire de chimie de la matière condensée (LA 302), 11 rue Pierre et Marie Curie, 75005 Paris.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

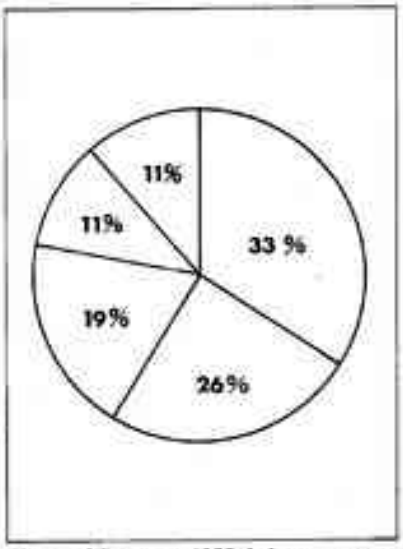


Fig. 1 – Bilan pour 1980 de la consommation du pétrole en France : transport : 33 %, résidentiel et tertiaire : 26 %, industrie : 19 %, production d'électricité : 11 %, divers (agriculture, etc.) : 11 %.

re...). Qu'il s'agisse du développement de l'utilisation de l'électricité ou de celui des énergies nouvelles généralement intermittentes (solaire, éolienne) le problème de la rationalisation de la consommation d'énergie par son stockage se posera avec une acuité jusqu'ici inconnue.

Les transports eux n'offrent dans l'immédiat qu'une alternative majeure au véhicule thermique : le véhicule électrique mû par des générateurs rechargeables.

Nous examinerons ces deux problèmes importants de notre politique énergétique (stockage de l'électricité et véhicule électrique) et nous verrons que dans les deux cas le développement des accumulateurs à hautes performances fondés sur l'utilisation des électrolytes solides constitue, pour notre pays, une solution accessible et rentable.

Le stockage statique

Un important programme de recherche et développement a été consacré aux méthodes de stockage statique de l'énergie électrique aux Etats-Unis. En Europe occidentale sa nécessité est apparue moins immédiate.

Le problème le plus évident est cependant commun : les variations journalières et hebdomadaires de la consommation d'électricité représentées figure 1a. L'Electricité de France répond à ces variations en utilisant trois types de centrales.

- La demande de base est fournie par les grandes centrales thermiques (fuel, charbon, nucléaire) fonctionnant en continu avec un rendement optimal
- Pour répondre aux fluctuations quotidiennes, on utilise selon un emploi du temps pré-établi d'autres centrales thermiques moins performantes et des centrales hydro-électriques (environ quatre mille heures par an)
- Enfin, pour répondre aux pointes de consommation, on met en service des centrales hydro-électriques, des turbines à gaz ou des générateurs Diesel à démarrage rapide (au maximum mille cinq cents heures par an).

Pour réaliser une économie de combustible, il est nécessaire de réduire au minimum l'utilisation des centrales d'appoint au fuel ou au gaz et d'utiliser au maximum les grandes centrales (notamment les centrales nucléaires). Il faut donc stocker l'énergie produite pendant les heures creuses (la nuit et en fin de semaine) pour la réutiliser pendant les heures de pointe (fig. 2b). Parmi les méthodes envisageables on peut citer :

– le pompage hydraulique de surface consiste à pomper pendant les heures creuses l'eau d'un bassin inférieur pour la stocker dans un bassin supérieur. Pendant les heures de pointe, le processus inverse se produit. C'est actuellement la seule méthode de stockage utilisée.

– le stockage hydraulique souterrain, fondé sur le même principe utilise comme bassin inférieur un réservoir creusé dans une roche dure à une profondeur compatible avec les techniques de forage actuelles (plus de 1000 m)

– le stockage souterrain par air comprimé présente sur le précédent l'avantage de pouvoir utiliser une cavité souterraine de plus petite dimension creusée dans une roche quelconque y compris du sel. Le problème principal est l'échauffement de l'air comprimé qui pourrait entrainer l'éclatement ou le fluage des parois de la grotte. Il est donc nécessaire de le refroidir au cours du stockage puis de le réchauffer au cours de la détente. C'est cette opéra-

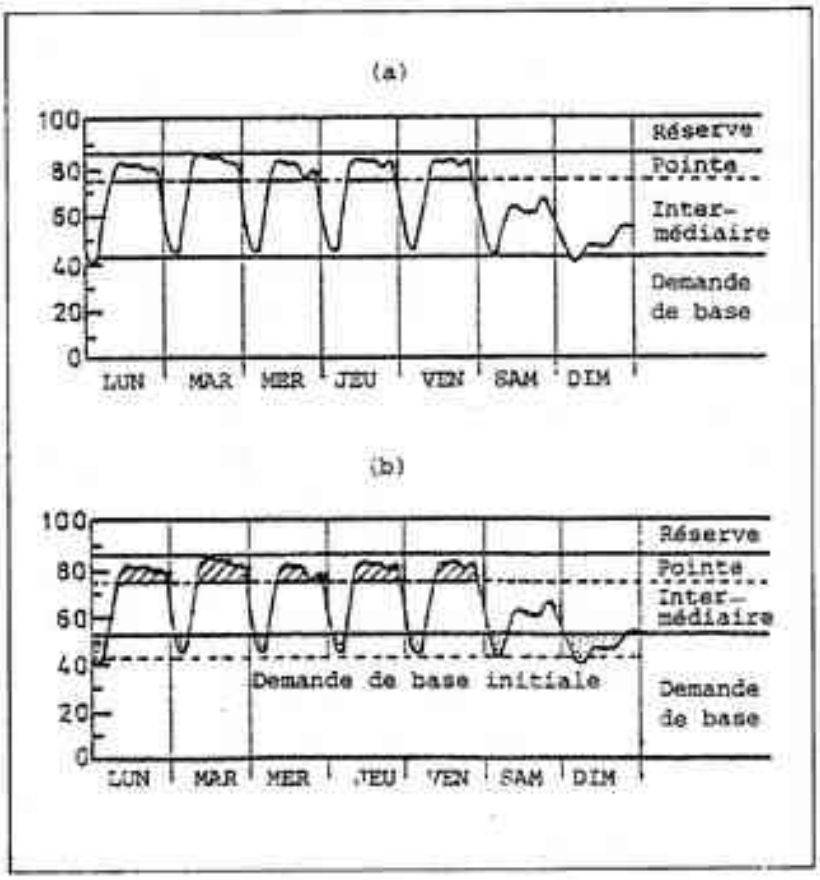


Fig. 2 – Variations journalières et hebdomadaires de la demande en électricité. Actuellement la consommation de base représente environ 42 % de la production totale. La réalisation du programme nucléaire permettra d'élever le niveau de production des grandes centrales jusqu'à 53 % environ. L'énergie excédentaire (zones en grisé) de la nuit et du dimanche pourrait être stockée et ré-injectée dans le réseau de manière à passer les pointes sans avoir recours aux systèmes actuels peu économiques (zones hachurées).

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

QUELQUES METHODES DE STOCKAGE STATIQUE DE L'ELECTRICITE							
	Stockage hydraulique	Air Comprimé	Stockage de l'hydrogène	Stockage cinétique	Stockage magnétique	Batteries au plomb	Batteries nouvelles
Seuil de rentabilité	200-2000 MW	200-1000 MW	20-50 MW	10-50 MWh	10 000 MWh	20-50 MWh	20-50 MWh
Rendement %	70-75 %	(a)	40-50	70-85	70-85	60-75	70-80
Durée de vie espérée (années)	50	20-25	10-25	20-25	20-30	5-10	10-20
Coût $ /kW $ /kWh	90-160 2-12	100-210 4-30	500-850 6-15	65-75 100-300	50-60 100(?)	70-80 65-110	60-70 20-60
Durée de construction (années)	8-12	3-12	2-3	2-3	8-12	2-3	2-3
Disponibilité commerciale	Actuelle	Actuelle	2000	2000	Après 2000	1985	2000

(a) fonction de la récupération de la chaleur

tion qui limite le rendement de ce mode de stockage dont l'avenir passe par la récupération de la chaleur produite pendant la compression.

– le stockage de l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau, soit sous forme de gaz comprimé dans des cavités naturelles, soit sous forme d'hydrures métalliques

– le stockage cinétique au moyen d'un volant mû par des champs magnétiques surtout destiné à pallier les coupures de courant

– le stockage par aimants supraconducteurs dont la rentabilité reste à démontrer.

Face à ces méthodes qui sont toutes lourdes de mise en œuvre, le stockage par batteries présente d'énormes avantages :

– stockage directement sous forme électrique

– réponse instantanée aux variations instantanées de la demande en électricité

– construction de la station de stockage rapide et peu onéreuse (comparativement aux autres méthodes)

– stockage réellement local, réduisant les coûts de distribution. Ceci est particulièrement important aux Etats-Unis où la densité de population est sept fois plus faible (d'où distances de distribution énormes) pour une consommation d'électricité par habitant deux fois plus élevée.

– absence de pollution et de bruit

– grand nombre de sites disponibles pour l'implantation de la station, ce qui n'est pas le cas pour le stockage hydraulique de surface

– pas d'altération du site et faible encombrement au sol (0,2 ha pour une station de 100 MWh).

Le véhicule électrique

Si les transports n'utilisent que 20 % de l'énergie totale mise en jeu dans le pays, ils absorbent 33 % du pétrole consommé. Il est aisé de prévoir qu'en 1990, compte tenu de la baisse attendue des consommations dans les autres secteurs économiques, les transports absorberont plus de la moitié de nos importations pétrolières. (tableau 2)

Le poids des transports routiers apparait particulièrement lourd dans le bilan :

transports routiers :	83 %
" aériens :	10 %
" ferroviaires :	4 %
" maritimes :	3 %

Affranchir de leur dépendance les transports routiers actuellement captifs à 100 % du pétrole apparait donc comme une priorité.

On peut distinguer deux catégories de sources d'énergie électrique pour véhicules routiers :

a) les générateurs rechargeables mécaniquement : les piles à combustible. Leur intérêt majeur réside dans une recharge en combustible aussi rapide que celle d'un réservoir d'essence. D'autre part, la possibilité d'utiliser directement des combustibles liquides tels que des alcools d'origine diversifiée et nationale constitue pour l'automobile un atout considérable. Il est difficile actuellement d'évaluer les performances que l'on peut attendre de ces filières nouvelles dont le développement apparait peu probable avant 1995. Nous ne les envisagerons pas dans cet article.

b) les générateurs rechargeables électriquement : les accumulateurs dont le développement apparait moins lointain.

Bien entendu, si la seule volonté de desserrer la contrainte pétrolière dans les transports apparait comme suffisante, il ne faut pas négliger les autres effets positifs de la propulsion électrique : absence de bruit et d'émissions polluantes.

Il faut cependant bien considérer, dès le départ que, sur de nombreux points, le véhicule électrique ne pourra jamais concurrencer le véhicule à essence. L'énergie massique fournie par une batterie d'accumulateurs est faible et se situe pour l'accumulateur au plomb dans un rapport d'un à cent comparativement à celle fournie par l'essence. Le développement des batteries nouvelles devrait permettre d'abaisser ce rapport d'un à vingt. Mais même avec un poids de batteries très supérieur à celui de l'essence la faible autonomie (100 km environ en cycle urbain pour un véhicule équipé d'un accumulateur au plomb) nécessitera des recharges fréquentes.

C'est pourquoi les actions de recherche et de développement s'orientent vers une augmentation de l'énergie massique compatible avec les caractéristiques de puissance, de durée de vie et de coût. Atteindre une autonomie de 400 km parait un objectif raisonnable.

Accumulateurs traditionnels ou nouveaux ?

Plus de trente systèmes électrochimiques sont des candidats potentiels pour le stockage de l'électricité ou le véhicule électrique. Plusieurs peuvent être écartés dès le dé-

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

2 LES PERFORMANCES DES BATTERIES A HAUTE TEMPERATURE (Li/FeS_2 et Na/S) APPARAISSENT PARTICULIEREMENT ATTRAYANTES

Accumulateur	Actuellement				Objectif			
	Energie massique Wh/kg	Energie volumique Wh/l	Durée de vie (a) (cycles)	Prix F/kWh	Energie massique	Energie volumique	Durée de vie (a)	Prix (b)
Pb/PbO_2	32	65	700	650	45	95	1200	275
Fe/Ni	50	100	1000		60	110	2000	600
Zn/Ni	50	100	200		75	120	800	500
Zn/Air					100	100	1000	300
Zn/Cl_2					100	100	1000	500
Li/FeS_2					120	210	1000	1000
Na/S					160	200	1000	400

(a) à 80 % de décharge (b) en grandes séries

part parce qu'ils font appel à de grandes quantités de matériaux rares ou chers. Il reste une quinzaine de batteries qui possèdent chacune un groupe d'avocats affirmant que leur système est nettement le meilleur et que la commercialisation est certaine à court terme. En réalité, le développement d'une batterie nouvelle est une entreprise à haut risque avec des obstacles majeurs à la commercialisation. (W.J. Walsh)

Compte-tenu de la complexité des problèmes à résoudre il apparait raisonnable de prévoir trois étapes :

– à court terme (avant 1985), seuls les accumulateurs améliorés au plomb ou au fer-nickel peuvent être développés

– à moyen terme, la famille des accumulateurs utilisant l'électrode zinc tels que Zn-Ni, Zn-air, $Zn-Cl_2$ permettrait d'améliorer l'énergie massique de 50 à 100 %.

– à long terme l'obtention d'une énergie massique la plus élevée possible passe par l'utilisation de matériaux très actifs comme le sodium ou le lithium, excluant ainsi celle d'électrolytes aqueux. L'obtention de milieux à conductivité ionique élevée implique un fonctionnement à température élevée de ce type de batterie (les superbatteries).

En fait les deux seules « superbatteries » actuellement en développement sont les batteries lithium (ou alliage lithium-aluminium) – sulfure de fer et sodium – soufre. La première utilise comme électrolyte un mélange eutectique LiCl-KCl ; la seconde un électrolyte solide (l'alumine β) et les températures de fonctionnement sont respectivement 400 à 500 ° C et 300 °-350 ° C.

Les caractéristiques d'utilisation (énergie massique, densité de courant, tension) sont assez nettement en faveur de l'accumulateur sodium-soufre. Le point fort de l'accumulateur Li/FeS_2 est la sécurité d'emploi (très soigneusement étudiée aux Etats-Unis pour le véhicule électrique) surtout lorsque l'on utilise comme électrode l'alliage solide lithium-aluminium au lieu de lithium liquide. Le principal obstacle à son développement demeure l'incertitude sur le prix et surtout la disponibilité du lithium. La production mondiale actuelle est très largement insuffisante. Par exemple celle de 1975 suffirait à peine à l'équipement de trois cent mille véhicules avec des batteries de 25 kW. La production devrait être au moins décuplée, ce qui est peut être possible, mais nécessitera un très gros effort de prospection minière.

Finalement, l'accumulateur sodium-soufre utilisant comme électrolyte un conducteur par ions Na^+ est le seul dont l'utilisation à grande échelle ne soulève pas de problème d'approvisionnement en matières premières.

Quels électrolytes solides ?

Les conducteurs par ions Na^+ sont très nombreux. Parmi eux bien peu présentent l'ensemble des qualités indispensables pour l'utilisation en accumulateur : conductivité ionique maximale, conductivité électronique minimale, bonnes propriétés mécaniques de l'électrolyte et des scellements à la température d'utilisation, réactivité chimique et porosité minimales, bas prix...

En fait, deux électrolytes solides seulement sont réellement envisagés pour l'accumulateur sodium-soufre.

L'alumine β. Le nombre de travaux qui lui a été consacré est impressionnant et malgré quelques incertitudes sur le mécanisme exact de conduction, la connaissance scientifique de ce matériau a atteint un niveau satisfaisant.

Un effort important est consacré à la lutte contre sa détérioration au cours de cycles successifs charge-décharge. Rien ne prouve que l'alumine soit le meilleur superconducteur ionique pour l'application envisagée par suite des inconvénients inhérents au caractère bidimensionnel de sa conduction. Mais il est actuellement le seul pour lequel des actions de développement puissent être, à moyen terme, sérieusement envisagées.

Le Nasicon (Na superionic conductor). Sa découverte est beaucoup plus récente. C'est une phase du système $Na_{1+x}Zr_2Si_xP_{3-x}O_{12}$ possédant un réseau tridimensionnel de tétraèdres SiO_4 et PO_4 reliés par leurs sommets à des octaèdres ZrO_6. Certaines de ses propriétés sont très attrayantes : conductivité tridimensionnelle, frittage à température plus basse que l'alumine β, bonne résistance au sodium fondu, existence sous forme de céramique ou de verre. Mais il est difficile de l'obtenir pur et son domaine d'homogénéité est mal connu. De plus de nombreuses transitions structurales interviennent entraînant une dégradation des céramiques. Enfin ses propriétés dépendent très fortement de son histoire et de son mode de fabrication.

Et la micro-ionique ?

En passant de l'électrolyte en solution à l'électrolyte solide, la science « ionique » subit une révolution comparable à celle qu'a connue, longtemps avant, l'électronique en passant de la triode au transistor. L'immense marché de l'automobile semble prêt à s'ouvrir aux conducteurs ioniques.

L'étape suivante est dès maintenant amorcée : à la micro-électronique correspondra la micro-ionique (dispositifs d'affichage, jauges,...). Dans ce cas le nombre de matériaux utilisables sera beaucoup plus élevé que pour les applications de puissance envisagées dans cet article.

La micro-ionique est une nouvelle chance très sérieuse pour les conducteurs ioniques.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

C.N.R.S. 84,
IMAGES DE LA RECHERCHE : LA COMMUNICATION

La préparation de l'opération nationale « C.N.R.S. 84, images de la recherche : la communication » est entrée dans sa phase finale. Au cours d'une réunion qui rassemblait au siège du C.N.R.S., le 6 mars, les responsables des présentations (directeurs d'unités et chercheurs de Paris et de la région Ile-de-France) à l'exposition parisienne le Directeur Général et le Directeur de l'Information Scientifique et Technique ont fait le point sur les manifestations parisiennes, sur l'état des dossiers régionaux et sur les opérations conduites nationalement avec les médias.

A Paris, des manifestations ouvertes au public du 6 au 26 juin auront lieu à l'intérieur de structures mobiles implantées sur la promenade du quai Branly, au pied de la Tour Eiffel (7e arrondissement).

2 000 m² de chapiteaux abriteront une exposition au sein de laquelle grâce à de très nombreuses maquettes animées, jeux, expérimentations... les visiteurs seront les véritables acteurs d'une découverte au fil de thèmes tels que :

- la communication chez l'être vivant,
- la transmission d'information et la communication avec les machines,
- la communication gestuelle, linguistique ou musicale dans plusieurs sociétés humaines,
- la communication et les rapports sociaux,
- la communication d'un savoir.

DES ANIMATIONS DESTINEES A TOUS LES PUBLICS

Les jeunes en particulier bénéficieront d'un espace privilégié : « l'atelier de communication » dans lequel des chercheurs, des journalistes et animateurs de télévision seront à leur disposition pour les aider à concevoir et à réaliser des produits d'information écrits, audiovisuels et artistiques, à l'aide de moyens techniques performants.

Tout au long de la durée de l'exposition, le C.N.R.S. organisera, chaque jour, une série de rencontres entre les scientifiques, le public et les professionnels des médias. Débats, tables rondes, mettront en présence des chercheurs et des spécialistes ayant des approches scientifiques et culturelles différentes ou complémentaires par rapport aux sujets abordés.

Par ailleurs, des journées thématiques placées sous la responsabilité des Directions Scientifiques seront plus particulièrement consacrées à exposer, d'une manière globale, les développements et enjeux des recherches menées dans les différentes disciplines du C.N.R.S.

Enfin, à l'occasion de certaines nocturnes, des spectacles (théâtre, musique, chant, danse) ainsi que des grandes conférences seront offerts au public.

Les manifestations parisiennes seront inaugurées officiellement le 5 juin à 16 heures par le Ministre de l'Industrie et de la Recherche.

LES MANIFESTATIONS REGIONALES

Au sein des régions, les équipes du C.N.R.S. établiront simultanément le même dialogue avec le public au cœur de leur ville ou dans leur laboratoire.

Quelques exemples de manifestations :

A Besançon : Une importante exposition dans les locaux du centre culturel P. Bayle portera sur les thèmes :

- la communication au sein des êtres vivants et à l'intérieur des sociétés organisées ;
- les supports de la communication : signaux et signes parcourant l'espace et le temps ;
- la communication entre les hommes, les peuples et les cultures dans l'espace et dans le temps.

Par ailleurs, des visites guidées conçues spécialement à l'intention des enseignants de toutes spécialités et des classes du secondaire seront organisées en liaison avec le centre régional de documentation pédagogique.

A Montpellier : Des expositions prendront place dans divers lieux de la ville autour de thèmes fédérateurs tels que :

- images et banques de données,
- télématique et cablage,
- la communication moléculaire,
- le passé éclaire le présent, le présent éclaire le passé... Le public pourra également, à l'occasion des conférences, des débats, des journées portes ouvertes dans des laboratoires se familiariser avec les recherches menées régionalement dans le domaine de la communication.

A Toulouse : Les chercheurs du C.N.R.S. se sont regroupés pour réaliser :

- une exposition sur le thème de « l'imagerie » à la Galerie municipale du Château d'eau.
- des journées portes ouvertes dans les laboratoires,
- des conférences et projections tant à Toulouse que dans la région Midi-Pyrénées.

A Lyon : Sont prévues au cœur de la ville diverses animations dans le cadre d'une série de journées thématiques :

- dialogue présent-passé,
- restitution de l'espace et de l'écosystème (cartographie, paysage, fleuves...)
- communication intra et inter-cellulaire,
- communication au sein de l'organisme vivant,
- les matériaux de la communication,
- les nouveaux modes d'expression et de communication,
- les mutations présentes dans l'entreprise (problèmes et enjeux...).

Des journées portes ouvertes dans les laboratoires et des émissions de télévision compléteront le programme. Par ailleurs, des animations ponctuelles se dérouleront à Grenoble, Saint-Etienne, Clermont-Ferrand.

A Strasbourg : Présentations, expérimentations, journées portes ouvertes dans les laboratoires, cycle de conférences, projections audiovisuelles réuniront des chercheurs et les différentes communautés régionales.

etc...

LA JOURNEE NATIONALE DU CNRS

La journée nationale du C.N.R.S. placée sous la Haute Présidence du Ministre de l'Industrie et de la Recherche est fixée à la date du 7 juin. Elle est destinée à présenter tant à Paris que dans les régions, la politique scientifique de l'organisme ainsi que les nouvelles orientations et enjeux de cette politique.

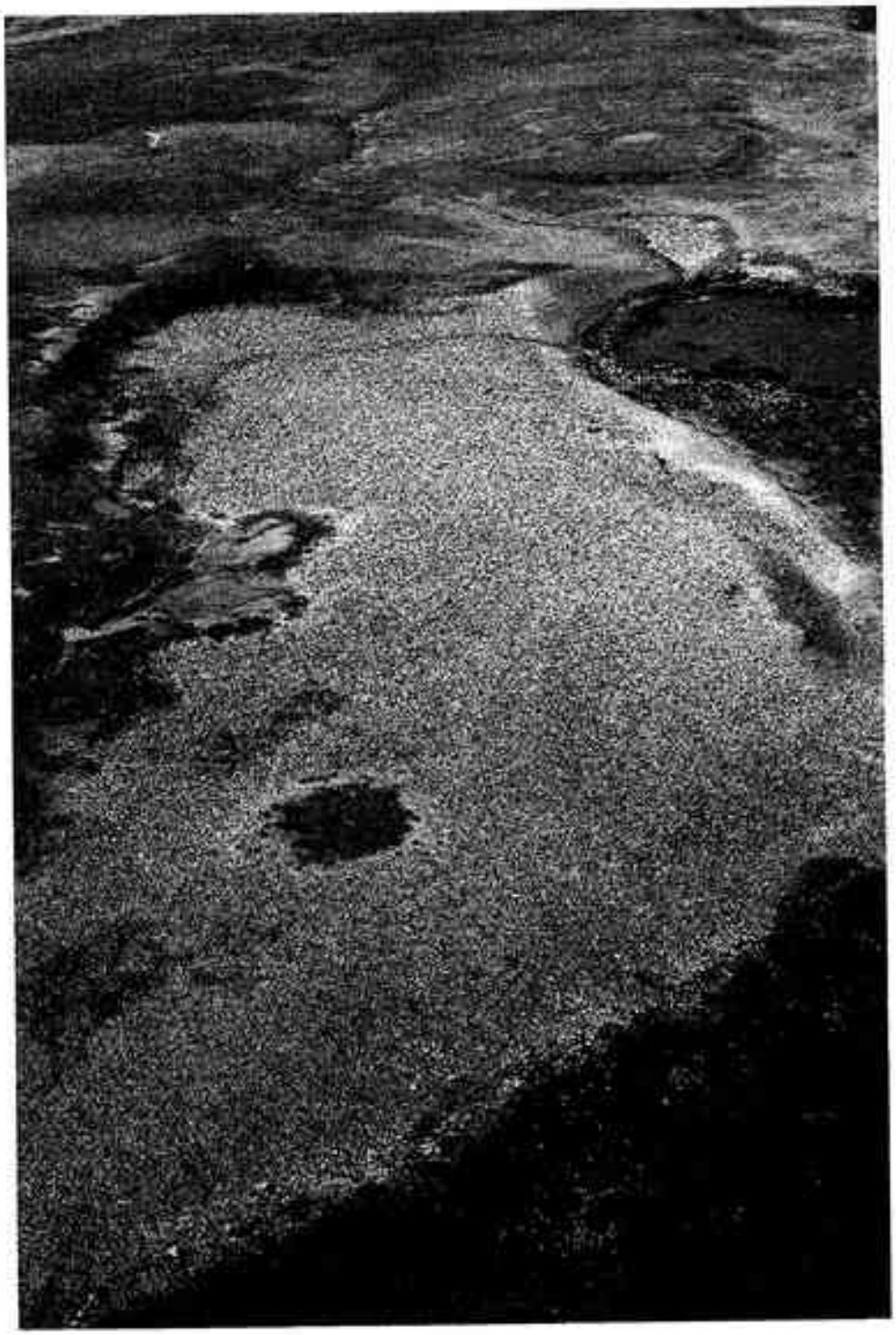
Une importante action d'information sera effectuée à l'intérieur et à l'extérieur de l'organisme notamment en direction des grands médias et des partenaires scientifiques, économiques, sociaux et culturels.

Pour toute information concernant l'organisation générale de cette opération, prendre contact avec Madame Kéty Lecoq. Tél. : (1) 555.92.25 poste : 20-64.

Au sein des régions, tous les contacts doivent être pris auprès des délégués scientifiques régionaux. Nous vous rappelons qu'afin de faciliter les contacts entre les différentes personnes concernées par l'organisation de cette opération, la DIST met à leur disposition une ligne téléphonique supplémentaire, (1) 555.72.06, équipée d'un répondeur automatique. Tout message relatif à l'opération communication pourra être laissé sur cet appareil. Le demandeur devra préciser son nom, ses coordonnées et le motif de son appel afin que son correspondant puisse y donner suite.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf

LE COURRIER DU
CNRS



Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/148?context=pdf