

Le courrier du CNRS 46

Auteur(s) : CNRS

Les folios

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

59 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 46, 1982-07

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

Consulté le 24/02/2026 sur la plate-forme EMAN :

<https://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/141>

Copier

Présentation

Date(s)1982-07

Mentions légalesFiche : Comité pour l'histoire du CNRS ; projet EMAN Thalim (CNRS-ENS-Sorbonne nouvelle). Licence Creative Commons Attribution - Partage à l'Identique 3.0 (CC BY-SA 3.0 FR).

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

Information générales

LangueFrançais

CollationA4

Informations éditoriales

N° ISSN0153-985x

Description & Analyse

Nombre de pages 59

Notice créée par [Valérie Burgos](#) Notice créée le 05/10/2023 Dernière modification le 06/12/2024

LE COURRIER DU
CNRS

46



Bimestriel — Juillet 1982 — 15 F



LE COURRIER DU CNRS

46

Bimestriel — Juillet 1982

3 L'océanographie de demain	Roger Chesselet
6 Entretien avec Lucien Laubier : l'océan, un domaine d'une prodigieuse richesse pour les scientifiques	
14 Le programme international de forages profonds (IPOD)	Jean Aubouin
18 Des nodules polymétalliques à l'hydrothermalisme sous-marin	Claude Lalou
20 La découverte et l'étude des grands fonds : de l'accrétion à la subduction	Xavier Le Pichon
23 Les interactions océan-atmosphère à grande échelle et le climat	Jacques Merle
28 L'évolution paléoclimatique de l'océan mondial	Jean-Claude Duplessy
30 Les tourbillons océaniques	Jean-Claude Giscard
40 Les réseaux trophiques en milieu abyssal	Claude Monniot
44 Les récifs coralliens	Bernard A. Thomassin
50 La zone côtière	Jean-Marie Martin
54 Les stations marines françaises	Guy Jacques
55 Les ressources de l'océan	Robert Letacconnoux
58 Les compagnies interocéaniques au temps de Colbert	Etienne Tallemité
61 Le droit de la mer	Jean-Pierre Quéneudec

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

Directeur de publication : Vladimir Mercouhoff

Secrétaire de rédaction : Martine Chabrier-Elkik

La vie des laboratoires : Véronique Brossollet

Entretiens : Monique Mounier

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

Abonnement et vente au numéro, le numéro 15 F.

Abonnement annuel : 55 F - 60 F pour l'étranger (voir bulletin p. 31-34).

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

Revue bimestrielle comportant 5 numéros par an qui paraîtront ainsi pour l'année 1982 : n° 44 - mars, n° 45 - mai, n° 46 - juillet, n° 47 - septembre, n° 48 - novembre.

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

Les intitulés et les chapéau 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 : Prest'Agence - 75, rue de Villiers, 92200 Neuilly-sur-Seine.

Réalisation ALLPRINT - 8, rue Antoine Chaptin, 75014 Paris.

C.P.A.D. 303 - ISBN 2-222-03130-3 - ISSN 0153-985 X. © Centre national de la recherche scientifique.

La planète Océan

La diversité des articles accueillis dans ce numéro spécial du Courrier du CNRS illustre bien la pluralité des disciplines qui s'attachent à une meilleure compréhension du domaine de la mer et contribuent à une maîtrise plus adéquate de sa gestion.

Il est important qu'un responsable de haut niveau du Centre national pour l'exploitation des océans (CNEXO) et biologiste de renom, exprime ses vues sur ces questions au cours d'un entretien avec la rédaction de la revue. La perspective historique à la fois conceptuelle et technologique dans laquelle s'inscrit l'avancée de l'océanographie contemporaine y est amplement analysée (M. Laubier).

La géologie marine, qui comprend de nombreux sous-ensembles, tels que la sédimentologie, la géophysique, la géochimie, a permis aux sciences de la terre d'accomplir une percée d'une importance considérable. Les mécanismes primordiaux dont résultent, par exemple, les ressources minérales contenues dans les fonds océaniques sont mieux expliqués grâce à une perception nouvelle de la dynamique de la croûte terrestre, dans une théorie unificatrice, qui réunit dans une même approche la géologie terrestre et la géologie des fonds marins (M. Aubouin, Mlle Lalou, M. Le Pichon).

Dans quelle mesure l'océan subit ou contrôle-t-il le cycle des changements de nos climats ? La plus grande partie de l'océanographie physique, à laquelle se joint la géochimie, cherche à percer ce mystère. Sous l'impulsion de ces recherches, grâce aussi au développement des techniques ultra-sensibles, les mécanismes de transfert d'énergie entre l'océan et l'atmosphère ont fait l'objet de découvertes mobilisatrices (MM. Merle, Duplessy, Gascard).

Le plaidoyer en faveur de l'océan, source de vie, n'est plus à faire. Dans ce numéro sont abordés deux thèmes que l'océanographie biologique a rénovés. Il s'agit d'une part de la mise en évidence de l'intensité de la vie dans les grands fonds marins que l'on considérait, il y a peu de temps encore, uniquement comme des déserts-reliques de l'histoire de la Terre. Par ailleurs, une approche nouvelle de la dynamique de formation des récifs coralliens montre que ceux-ci sont les constructions organogènes les plus puissantes de notre planète (MM. Monniot, Thomasin).

La connaissance des interactions océan-continent, et toute l'écosociologie de la zone côtière doivent faire l'objet d'une mise en œuvre de nouveaux moyens interdisciplinaires. Ceci s'avère indispensable pour évaluer les conséquences de l'influence de l'homme sur ce milieu. Cette influence est un phénomène majeur de notre temps. Les stations marines françaises, qui tirent leur prestige d'une longue histoire, constituent les pôles d'ancre de l'océanographie côtière, qui connaît, à l'heure actuelle, un renouveau certain (MM. Martin, Jacques).

Le panorama pluridisciplinaire ainsi offert serait cependant resté incomplet sans le point de vue de l'histoire, du droit et de l'économie. La mise sur pied des compagnies interocéaniques par Colbert donne aux activités marines et à l'océanographie actuelles des racines profondes dans l'histoire de France (M. Taillemite). Le droit de la mer et la gestion des ressources de l'océan, nous projettent au contraire, dans une problématique de préparation des décennies à venir qui devra répondre aux préoccupations de ceux qui dirigent les Etats modernes et aux débats des grandes instances internationales (MM. Queneudec, Letaconnoux).

de la Délégation Paris Michel-Ange
Depot des archives
Bâtiment 19
1, avenue de la Terrasse
91198 Gif-sur-Yvette

CNRS
Délégation du Siège
Logistique
Archives - Bâtiment 19
Centre de la Terrasse
Gif-sur-Yvette
Tel : 01 69 82 39 17

L'océanographie de demain

Les recherches menées au cours de la dernière décennie, sur les planètes les plus proches de la Terre, Mars et Vénus, ont confirmé avec éclat le caractère unique de la planète Terre dans le système solaire.

Chacun sait maintenant que l'Océan, qui recouvre près des trois quart de la surface de la Terre est une caractéristique unique et essentielle de notre environnement. L'émergence de ce concept a donné lieu à l'apparition du vocable Planète-Océan, qui est extrêmement fructueux pour situer l'océanologie dans l'ensemble des sciences modernes.

La Planète-Océan est en fait une formidable machine qui assure les régulations essentielles nécessaires à la vie. Son rôle dans les transferts d'énergie et de matière est capital pour la conservation du fragile équilibre écologique. Les mystères de l'origine de la vie sont contenus dans l'Océan et l'ensemble du vivant en porte encore la trace. Ainsi, la connaissance du milieu marin continue de féconder les nombreuses branches des sciences de la vie.

Toute la recherche océanologique tend à démontrer à quel point les équilibres océaniques sont vulnérables mais aussi à quel point les mécanismes d'adaptation du système sont puissants.

Une politique de recherche en océanologie doit maintenant être formulée en terme de décennies à l'échelle mondiale par les chercheurs eux-mêmes. De multiples réflexions dans les instances nationales et internationales y conduisent.

De très nombreux problèmes résident dans le choix des échelles de temps et d'espace, qui serviront de « mailles » d'observation des phénomènes.

□ Roger Chesselet, directeur de recherche au CNRS, directeur du programme interdisciplinaire de recherches en océanographie.

nes étudiés. Nous devons nous accorder de ces problèmes d'échelle par lesquelles la nature impose aux chercheurs de difficiles sinon d'insupportables limitations à leur démarche.

Après s'être intéressée surtout aux phénomènes à échelle moyenne depuis les années 1970, en focalisant ses recherches sur les structures telles que tourbillons, fronts et remontées d'eau profonde, l'océanographie physique retourne maintenant aux questions posées par la circulation générale de l'Océan en utilisant bien sûr au maximum les connaissances acquises sur les phénomènes ayant lieu aux échelles plus réduites. Les chimistes s'intéressent davantage actuellement aux larges mouvements des masses d'eau qui entraînent avec elles les substances chimiques indispensables et qui approvisionnent tous les compartiments de l'Océan. L'océanographie biologique commence à tirer parti de ce qui s'est fait jour récemment, c'est-à-dire les dépendances observées des systèmes écologiques vis-à-vis des structures physiques à «vie moyenne» (comme les tourbillons océaniques par exemple). Son champ d'activité va devoir s'étendre aux conséquences écologiques des changements à long terme et ce surtout dans le domaine côtier. Les géologues travaillent depuis longtemps aux échelles de temps longues. On connaît les succès obtenus grâce à leur approche à long terme des événements liés par exemple à la tectonique des plaques qui servent d'exemples impressionnantes et instructives aux autres disciplines.

A l'échelle de temps de dix ans, l'Océan interagit profondément avec l'atmosphère. A l'échelle du mois ou de l'année, l'Océan intervient certainement comme régulateur des conditions limites qui régissent les climats. Aux échelles de temps plus longues, la chimie de l'Océan et la biologie apparaissent dominer les grands cycles tels que celui du CO₂ ou de l'azote. La nouvelle page qu'ouvre la tectonique des plaques conduira à rechercher les mécanismes sous-jacents et à long terme qui déterminent leurs mouvements et ce dans des recherches dans les zones «critiques» de la croûte océanique. Cependant, tout en poussant les efforts en direction de la recherche sur des événements océaniques à grande échelle, nous ne pourrons jamais ignorer les échelles plus petites. Il y a donc une très grande difficulté pour l'élaboration d'une stratégie et d'une planification raisonnable de la recherche océanologique.

LES QUESTIONS INTERDISCIPLINAIRES ACTUELLES

Les questions ci-dessous permettent de souligner à quel point les sciences marines françaises se situent dans le peloton de tête de l'océanographie mondiale. En effet, elles font l'objet d'études approfondies dans les laboratoires de notre pays.

L'INTERIEUR DE L'OCEAN

• Climatologie océanique et la dynamique de la couche supérieure de l'Océan.

Quel est le temps de vie moyen de cette couche ? S'agit-il de constante de temps à l'échelle de la décennie ? Quels sont les effets de la dynamique de cette couche sur l'échange air-mer de CO₂ ? Quels changements interviennent du fait des micro-climats sur l'approvisionnement de la surface en sels nutritifs provenant de l'océan profond ? Est-on à même de construire des modèles pour prévoir des modifications à très grande échelle ?

• Productivité océanique.

Quelle est la quantité de la production primaire qui est recyclée dans la couche supérieure de l'Océan ? Quel est le bilan des sels nutritifs dans ce compartiment ? Quelles sont les conséquences des changements dans les taux d'approvisionnement lors des changements climatiques ? Quel effet ces modifications ont-elles sur le flux de CO₂ ? Quelle est la productivité réelle des vastes zones océaniques considérées encore comme des «déserts marins».

• Flux verticaux de particules.

Nous savons maintenant que le flux de particules est un vecteur très actif provoquant des échanges chimiques rapides entre la surface et l'Océan très profond. Quel est le taux de ces échanges ? En quoi ces échanges dépendent-ils de la variation de production dans les eaux de surface ? Quels sont les effets géochimiques de la remise en suspension depuis les flancs et le fond des bassins océaniques ?

• Volcanisme sous-marin.

Les événements hydrothermaux sont probablement la meilleure illustration des mécanismes interactifs de l'Océan, depuis la vie relativement courte constatée pour les événements jusqu'à leurs implications géochimiques vis-à-vis de l'Océan global, à l'échelle des millénaires... Il est certain que les implications scientifiques et économiques de la découverte de l'hydrothermalisme actif au fond des océans constitueront un objectif majeur de la recherche dans les dix prochaines années.

• Histoire récente de l'Océan.

Nous n'avons pas de connaissances suffisamment précises de la variabilité des phénomènes océaniques aux échelles de temps comprises entre 10 et 1 000 ans. Cet intervalle de temps n'est actuellement pas couvert. Les techniques géologiques modernes permettent-elles d'établir le spectre de la variabilité des échelles de temps ? Ceci est absolument nécessaire si l'on veut prédire les effets sur l'environnement des changements climatiques futurs.

• Paléo-océanographie.

Il est probable que le seul moyen d'obtenir des informations sur la variation macro-

LE PROGRAMME INTERDISCIPLINAIRE DE RECHERCHES EN OCEANOGRAPHIE (PIRO)

Près de six cents chercheurs se consacrent dans les laboratoires des universités et du CNRS à la recherche océanographique. Ils représentent la majeure partie du potentiel dans ce domaine.

La direction de la recherche du Ministère de l'Éducation nationale et la direction générale du CNRS ont proposé en 1981 de mettre en place une structure incitative et légère, le Programme interdisciplinaire de recherches en océanographie, pour coordonner l'action de ces chercheurs.

FONCTION DU PIRO.

La fonction essentielle du PIRO est de proposer et de mettre en œuvre des actions incitatives de recherche destinées à développer l'étude de la Planète-Océan. Le champ des recherches soutenues par le PIRO couvre le domaine côtier, qui prend une très grande importance avec l'extension à deux cent milles des eaux territoriales, ainsi que le domaine hauturier, qui est capital pour la connaissance et l'exploitation de l'Océan.

MOYENS DU PIRO.

• Moyens d'évaluation scientifique. Le directeur du PIRO est assisté pour l'évaluation des programmes de recherche par un comité scientifique de dix-huit membres dont six représentent les sections concernées du Comité national du CNRS et douze sont nom-

copique que l'Océan a vécu dans le passé et à long terme relève de l'examen des archives sédimentaires. Une énorme somme d'informations concernant les paléo-environnements de l'Océan a été accumulée. De très grands hiatus de sédimentation dans le passé ont été mis en évidence. Quelle est leur explication ? De même, des successions de changements rapides des niveaux marins extrêmement difficiles à expliquer ont été identifiées. Une coopération très étroite entre l'océanographie physique et biologique est vitale, pour que puisse être proposée une explication de ces phénomènes.

LES INTERFACES OCEANIQUES

• Les eaux polaires.

Ces eaux constituent une interface majeure entre l'eau et la glace. Ces régions de hautes latitudes sont le siège des variations de grande amplitude dans les changements atmosphériques et sont des régions essentielles pour l'absorption du CO₂ par l'eau. Quelles sont les variations inter-annuelles qui affectent ces régions limitrophes de l'Océan ? A quel point ces changements affectent-ils les mélanges profonds ? Pourquoi la production primaire de l'Océan austral est-elle aussi faible en dépit d'énormes réserves de nutriments ?

• Océanographie côtière.

Le flux de matière en suspension et des substances chimiques entraînées vers l'Océan depuis les sols émergés, est une composante majeure de l'équilibre océanique à long terme. La détermination des changements intervenant dans ce flux est une question centrale pour l'approche à l'échelle globale. La difficulté principale est de parvenir à séparer la très grande variabilité à court terme de la distribution de toutes les composantes des systèmes côtiers (physiques, biologiques, chimiques, sédimentaires) des changements à long terme. C'est aussi de distinguer les changements d'origine « naturelle » de ceux dont l'activité humaine est responsable, en particulier ceux provoqués par l'industrie des pêches, l'addition de nouvelles substances chimiques ou l'exploitation du sédiment comme matériel de construction (gravier).

Peut-on, à partir de la diversité des environnements locaux étudiés jusqu'à présent, formuler des diagnostics concernant l'ensemble de l'Océan ? Peut-on, à partir de cette diversité, formuler des avis sur les aménagements côtiers à prévoir ?

• Interaction Océan-Atmosphère.

Ces interactions montrent une très grande diversité dans la distribution des structures, à une échelle d'observation très serrée. Il faut pouvoir déchiffrer quels sont les facteurs qui déterminent ces changements dans les interactions atmosphère-hydrosphère et qui affectent aussi la dynamique des échanges chimiques, par exemple en matière de cycle du carbone et de l'azote. Ces problèmes sont essentiels dans la compréhension de la climatologie océanique.

* Ces questions ont été abordées récemment par le groupe international de travail de vingt responsables scientifiques, réunis à la station de Villefranche-sur-Mer (France). L'objectif était une réflexion sur « L'océanographie de l'an 2000 ». Ce groupe de travail avait été soutenu par la Commission océanographique intergouvernementale de l'UNESCO.

més conjointement par le directeur de la recherche (Ministère de l'éducation nationale) et le directeur général du CNRS.

• Moyens de concertation avec le CNEXO, organisme gestionnaire des moyens lourds de l'océanographie française. Cette concertation s'applique à la programmation des campagnes en haute mer demandées par les formations de recherche de toutes disciplines ; elle s'applique aussi à la programmation à long terme des reconstructions et renfonces de la flotte de haute mer et à la définition des engins sous-marins.

• Moyens à la mer. Les navires océanographiques côtiers sont au nombre de neuf en 1981. Deux navires neufs seront mis en service en 1982-1983. Les costructions et renfontes sont gérées par le Service des moyens à la mer qui a par ailleurs la responsabilité des marins océanologues du CNRS.

• Moyens technologiques. Une génération de matériels performants a commencé à être mise en place sur les navires et auprès des équipes marines de recherche. Afin d'assurer la maintenance de ces matériels et le dialogue avec les équipes pour la mise au point d'appareillages nouveaux, le PIRO a été doté de postes d'ingénieurs regroupés dans un service technique.

• Budget. La masse budgétaire mise en œuvre pour l'océanographie par les universités et le CNRS avoisine 300 millions de francs, dont environ deux-tiers recouvre les salaires. Le budget d'animation et d'incitation est confié au PIRO. En 1982, il représente environ 14 MF ainsi répartis : soutien aux recherches multidisciplinaires (6,7 MF), moyens technologiques (5,5 MF), soutien aux stations marines (1,65 MF), direction du PIRO (0,3 MF).

Les programmes d'études des phénomènes à très grande échelle sont très difficiles à organiser et à financer. Rien ne pourra se faire sans une meilleure coopération entre pays développés industriellement et les pays en voie de développement dont dépendent maintenant d'immenses domaines marins. Après l'application des clauses de la loi de la mer, la gestion de l'Océan mondial sera profondément changée. Un rapide développement de nouvelles technologies est impératif. La « télédétection » par les satellites et aussi par des méthodes acoustiques *in situ*, aura un rôle critique car elle constitue vraisemblablement le seul « outil » qui puisse couvrir de façon continue le spectre entier des phénomènes à grande échelle. La prise en compte de la fréquence des événements nous paraît une donnée essentielle de la future océanographie et le domaine d'application n'est pas loin. Rappelons que les tremblements de terre qui prennent naissance dans les zones critiques où interagissent les plaques en mouvement de la croûte océanique ont des périodicités de l'ordre de 50 à 500 ans comme le prédit les modèles théoriques de la géophysique. Il faudra faire un très gros effort pour être en mesure de stocker et surtout tirer parti de la multitude d'informations que demande cette analyse spectrale de la fréquence des phénomènes océaniques.

Pour terminer, nous dressons ci-dessous un catalogue des problèmes dont nous venons d'évoquer brièvement l'exceptionnelle importance. Ce catalogue est, bien sûr, non exhaustif. Il consigne, sous une forme directe, la majeure partie des préoccupations qui se font actuellement jour au sein de la communauté scientifique.

Il n'y a pas de lignes de démarcation franches dans ce catalogue, entre les thèmes de la recherche dite « appliquée » et ceux de la recherche dite « de base » qui sont intimement imbriqués. On sait par exemple qu'une meilleure connaissance des climats et de la prévision de leur évolution affecte l'ensemble de la politique économique mondiale, que la gestion du domaine côtier et des ressources minérales et halieutiques est dominée par la volonté de l'homme de mieux aménager sa planète.

Rappelons enfin que des catalogues de ce type doivent être considérés avec toute la prudence nécessaire car, tout en prétendant définir l'avenir de la recherche, ils ne sont que le fruit de nos connaissances actuelles.



Assistance à la pêche thonière. – Au cours des campagnes saisonnières de pêche au thon blanc (germon), des prélevements sanguins sont effectués pour étudier les relations entre les différents stocks géographiques.

Entretien avec Lucien Laubier : l'océan, un domaine d'une prodigieuse richesse pour les scientifiques

Directeur délégué à la programmation et la coordination au Centre national pour l'exploitation des océans, océanographe biologiste,

Lucien Laubier fait le point pour le Courrier du CNRS sur les recherches en océanographie, l'une des priorités de la politique scientifique française.

On aime la mer, parfois on la redoute ? Que sait-on de la mer aujourd'hui ?

Lorsqu'on parle de la mer, on insiste volontiers sur le « mystère » de l'océan : les grands fonds océaniques, qui restent pour une très large part inexplorés, des profondeurs de plus de 11 000 mètres, supérieures aux plus hauts sommets terrestres, le « sixième continent », la planète océan... que d'images et d'expressions où domine la notion de l'inconnu, d'un domaine à découvrir ! Et pourtant le développement extraordinairement rapide en France de la navigation de plaisance, de la planche à voile, contribue à familiariser le public avec la mer, ses dangers et ses splendeurs. Avant le tourisme et la vogue des sports nautiques, l'histoire a éveillé la curiosité de nos compatriotes pour tout ce qui a trait à la mer : les récits des navigateurs ont passionné et fait rêver beaucoup de jeunes.

Mais aujourd'hui le temps des探索ateurs est fini. Celui des scientifiques est arrivé... La mer, si elle n'est plus tout à fait inconnue, reste un objet d'études fascinant. Et le champ d'investigation se renouvelle avec une prodigieuse richesse.

Quelles ont été les principales étapes de notre connaissance des océans ?

Il faut attendre la fin du XIX^e siècle pour que la nécessité de donner un nom – océanographie – aux sciences de la mer, se fasse véritablement sentir. Pourtant, dès le IV^e siècle avant J.C., Aristote s'était intéressé à certaines formes vivantes de la mer Egée, ainsi qu'à la salinité de l'eau de mer. Durant le Moyen-Age, quelques auteurs abordent l'étude des marées et des courants marins. C'est au cours du XVIII^e siècle, à

la suite du renouveau scientifique général, que des impératifs politiques et économiques conduisirent plusieurs nations européennes à entreprendre des voyages d'exploration systématique dont les plus célèbres resteront les expéditions de Bougainville, La Pérouse et James Cook dans le Pacifique.

Ces voyages ouvrent la voie à l'aventure scientifique du XIX^e siècle, puissamment aidée par l'apparition des bateaux à vapeur, des premiers procédés de sondage et des techniques de pose et de relevage des câbles sous-marins. Au cours de la seconde moitié du XIX^e siècle, avec le développement des sciences de la vie, un grand défi est proposé à l'océanographie naissante : la vie connaît-elle une limite vers les plus grandes profondeurs ? On se demande aussi, à la suite de la découverte de représentants vivants de groupes d'invertébrés connus jusque-là à l'état fossile, si l'océan profond ne sert pas d'abri à d'autres groupes considérés comme éteints, tels que les Ammonites, les Bélémnites...

L'expédition du *Challenger* (1872-1876) constitue l'une des premières grandes circumnavigations dont les objectifs sont purement scientifiques. L'exemple anglais est rapidement repris par de nombreux pays : la France organise quelques années plus tard les expéditions du *Travailleur* et du *Tallisman*, dans le proche Atlantique et en Méditerranée, que suivront quelques décennies plus tard les expéditions dans les eaux polaires arctiques et antarctiques de Jean Charcot à bord du *Français*, puis du *Pourquoi-pas ?* dont on connaît le sort tragique sur les côtes d'Islande... Mais c'est sans doute à la vocation, soutenue plus de trente années, du Prince Albert Ier de Monaco que la communauté scientifique française doit ses lettres de noblesse en océanographie : les nombreuses cam-



□ Lucien Laubier, Directeur délégué à la programmation et la coordination du Centre national pour l'exploitation des océans, docteur ès-sciences, correspondant de l'Académie des Sciences, est un spécialiste de réputation internationale de la biologie marine ; il a participé à de nombreuses campagnes de recherches océanographiques et est l'auteur de plus de 150 publications. Il a été directeur du Centre océanologique de Bretagne, où il a contribué au développement des recherches en écologie marine, pêche et aquaculture.

pages réalisées par le Prince à bord de ses navires, l'*Hirondelle I* et *II*, puis la *Princesse-Alice*, ont permis aux savants de faire connaître un ensemble de résultats originaux, principalement dans le domaine des sciences biologiques, dont la qualité n'a rien à envier aux célèbres Rapports du *Challenger*... L'œuvre d'Albert Ier devait se perpétuer après lui, à travers la fondation qui porte son nom et régit l'Institut océanographique de Paris et le Musée océanographique de Monaco. Créer des institutions permanentes est en effet à cette époque une des conditions du succès des sciences océanographiques.

Au cours de la seconde moitié du XIX^e siècle, les biologistes prennent conscience de l'importance des invertébrés marins, plus variés et plus nom-

Entre 200 et 500 mètres de profondeur, vit une série de poissons carnassiers à l'inquiétante apparence. Ces poissons-vipère ne dépassent guère une trentaine de centimètres de longueur. Ce spécimen de *Chauliodus sloani* a été capturé au cours de la campagne Corailante du NO Jean Charcot en 1969 et photographié par l'auteur.

breux que leurs homologues terrestres : c'est cette nécessité qui pousse un précurseur comme H. de Lacaze-Duthiers à créer successivement les deux grandes stations de biologie marine de Roscoff en Bretagne et de Banyuls-sur-Mer sur la côte méditerranéenne. D'autres pionniers ont contribué à doter notre pays d'un remarquable ensemble de stations côtières.

Comment a évolué, au XX^e siècle, l'océanographie, avec en particulier les techniques nouvelles ?

Après une première période, que l'on peut caractériser par la prise de conscience par les grands pays industrialisés de l'Atlantique Nord que les ressources biologiques des mers, compte tenu du développement des flottilles de pêche, sont en danger d'épuisement, la seconde guerre mondiale va marquer un tournant décisif dans le développement des connaissances. De nouvelles techniques apparaissent, notamment en ce qui concerne l'utilisation de l'acoustique pour la détection du fond et des objets immergés ; des budgets de plus en plus importants sont alloués à la recherche océanographique aux Etats-Unis, en Grande-Bretagne, au Japon, en Allemagne et en Union Soviétique en particulier.

Dès 1954, à la suite des travaux de l'Institut d'océanologie de l'Académie des sciences d'Union Soviétique et de l'expédition du navire danois *Galathée*, bâtiment spécialement équipé pour opérer dans les plus grandes profondeurs des océans, on peut répondre à l'une des questions qui préoccupaient les biologistes depuis un siècle : non, la vie ne connaît pas de limite, des représentants de plusieurs groupes d'Invertébrés sont rapportés par la *Galathée* de près de 10 000 mètres de profondeur dans le Pacifique central... L'utilisation systématique des sondeurs ultrasonores au cours de nombreuses campagnes menées de manière permanente par les flottes océanographiques conduit à un renouvellement complet de l'image des fonds sous-marins, dominée par l'existence de chaînes de montagnes sous-marines, qui marquent notre globe de profonds accidents.



LE ROLE DU CNEXO LES NOUVEAUX OBJECTIFS POUR L'ETUDE ET L'EXPLOITATION DU DOMAINE MARIN

Depuis plus de deux ans, l'organisation générale de la recherche et de la technologie, dans le domaine de la mer a passablement évolué. Au cours d'un récent Conseil des Ministres (2 mars 1982), le Gouvernement a décidé d'accroître l'effort de recherche et de développement technologique, consensuel en faveur des activités marines. Un comité interministériel assurera une articulation satisfaisante entre les actions de l'Etat et les activités des différents organismes publics. Il a été également décidé au cours du même Conseil que les missions du CNEXO seraient redéfinies et renforcées, l'établissement devant poursuivre avec des moyens accrus, l'exécution des programmes de recherche engagés, la mise en œuvre des gros équipements (1) de recherches en mer et la valorisation des recherches. Le communiqué souligne la nécessité pour le CNEXO d'un effort très sensiblement accru, en matière de développement technologique, en liaison avec les organismes et les professions concernées, l'importance des questions liées à l'aménagement du littoral, à l'environnement côtier et à l'exploitation de la zone économique exclusive (200 milles nautiques), enfin, la capacité de maîtrise d'œuvre de projets complexes associant divers partenaires publics et privés. Tirant les enseignements d'une réflexion engagée il y a près de trois ans, le gouvernement décharge le CNEXO du rôle de coordination de l'océanologie française, incompatible avec ses autres fonctions. Par coordination, il faut entendre l'examen annuel fait par le CNEXO pour le compte du gouvernement, de l'ensemble des programmes et des demandes budgétaires correspondantes des organismes publics de recherche, financées par ce qu'il est convenu d'appeler, improprement d'ailleurs, la « sous-enveloppe recherche océanologie ». En fait, ce travail n'a été conduit dans sa totalité qu'entre 1976 et 1979, période où le CNEXO présentait l'analyse d'ensemble de la « sous-enveloppe océanologie », incluant ses propres demandes, devant le Conseil de la recherche océanologique. Il est certain qu'un tel exercice ne pouvait guère convaincre... Depuis le début de 1979, ce travail de coordination a été abordé au sein du Comité d'orientation de l'océanologie sans intervention particulière du CNEXO.

Comment vont se traduire, dans la réalité, les récentes décisions gouvernementales dans le domaine de la mer ? Il est encore trop tôt pour le voir clairement.

Depuis sa création en 1967, le CNEXO est chargé pour le compte de la communauté nationale, de la gestion et la programmation de la flotte océanologique, qui comprend aujourd'hui sept navires et un submersible qui descend à une profondeur de 3 000 mètres.

Le CNEXO a rencontré dans l'accomplissement de sa mission, deux séries de difficultés. La première série de difficultés porte sur la sélection des propositions les plus intéressantes, soit du strict point de vue de la qualité scientifique et de l'originalité, soit en tenant compte de l'intégration de certains projets dans des programmes plus vastes, soit enfin vis-à-vis de certaines orientations, pour l'ensemble des demandes quelle qu'en soit l'origine. Ce travail d'évaluation exige le recours à une instance consultative, représentant convenablement les différentes catégories d'utilisateurs de la flotte. Si certains organismes disposent d'une instance représentative (c'est le cas du CNRS avec les sections du Comité national), il n'en est pas de même pour d'autres, comme l'ORSTOM ou le CNEXO par exemple, et il n'a pas été jusqu'à présent possible de constituer une instance unique, capable d'appréhender convenablement l'intégralité des demandes de campagnes à la mer. Cette difficulté est à l'origine de nombreuses critiques formulées à l'égard du système actuel.

En même temps, les données géophysiques permettent d'élaborer l'hypothèse de l'expansion continue du fond des océans à partir des dorsales médio-océaniques, hypothèse rapidement confirmée et qui fournit le mécanisme de base de la théorie générale de la tectonique des plaques. Il s'agit là non seulement d'une véritable révolution des sciences de la terre, révélée par les géologues et les géophysiciens marins, mais surtout de la première théorie générale cohérente.

La France d'après-guerre a su rapidement retrouver sa place dans le concert des grandes nations océanographiques, et l'effort des universités et de leurs stations marines, du CNRS, du Service hydrographique de la Marine, du Muséum national d'histoire naturelle, a été important ; cet effort a été

amplifié, notamment au niveau des équipements (navires, infrastructures à terre) par la création d'une action concertée en 1961 à la DGRST, puis en 1967, par la création du CNEXO.

La période actuelle semble particulièrement riche en découvertes dans ce domaine si vaste qu'est l'océanographie.

Depuis le début des années 1970, les sciences océanographiques ont fait des progrès considérables. Parmi les découvertes majeures, j'en retiendrai trois : tout d'abord le renouvellement complet de nos connaissances sur la circulation marine : l'image classique des grands courants traversant les océans comme de véritables fleuves, obtenue à partir des multiples mesures

ponctuelles ainsi que de l'exploitation des livres de bord des grands voiliers fait place à une image dynamique, évolutive dans le temps comme dans l'espace, faite de méandres et de tourbillons. L'utilisation de flotteurs immergés à une profondeur constante, et localisés acoustiquement, a permis de mettre en évidence ces tourbillons de 50 à 200 kilomètres de diamètre, que l'on a également observés, à partir de la surface à l'aide de bouées dérivantes ou par observation spatiale de la surface de l'océan. Homologues des dépressions atmosphériques, ces tourbillons d'échelle moyenne jouent un rôle important dans les transferts énergétiques.

Une découverte peut-être moins spectaculaire, mais au moins aussi importante dans ses implications, est celle des mécanismes physiques, chimiques et biologiques qui président au développement permanent ou saisonnier de l'intense production biologique des zones de remontée d'eau de profondeur riche en sels nutritifs : à partir d'une connaissance descriptive très imparfaite, on est peu à peu parvenu à élaborer des modèles de fonctionnement de ces systèmes qui sont à l'origine d'une grande partie des ressources vivantes exploitées par l'homme.

Une découverte plus récente, et sûrement plus spectaculaire, est celle des phénomènes hydrothermaux sous-marins qui se développent dans le magma en cours de solidification à l'axe des dorsales océaniques à taux d'expansion élevé (de l'ordre de 6 à 16 cm/an de vitesse moyenne d'écartement). On a pu mettre en évidence des dépôts massifs de sulfures polymétalliques, sous forme de hautes « termitières » déposées autour des cheminées hydrothermales d'où sort un fluide, dont la température dépasse 350°C. Autour de ces bouches, les événements, une faune exubérante, constituée de formes souvent inconnues, s'installent, tirant vraisemblablement parti des ressources offertes par des bactéries chimiosynthétiques. Ce mode étrange et fascinant, totalement inconnu il y a cinq ans, est d'autant plus intéressant qu'il représente peut-être un cas unique sur notre planète : celui d'un écosystème fonctionnant indépendamment de l'énergie solaire.

Parmi bien d'autres résultats, ces exemples suffisent à montrer la vigueur des sciences de la mer, en même temps que le passage progressif du stade descriptif qui caractérisait l'océanographie de la première moitié du siècle à un stade explicatif, voire prédictif.

On voit moins facilement l'importance tout à fait réelle d'une seconde série de difficultés. Etablir, projet par projet, les priorités relatives des diverses demandes de campagne constitue une première étape. Il faut ensuite construire les différents scénarios d'activité des navires, en combinant le classement d'intérêt scientifique à toute une série de contraintes techniques, logistiques et budgétaires et cela en respectant une série d'équilibres généraux entre les grandes disciplines océanographiques d'une part et, pour chacune d'entre elles, d'autre part, entre la recherche de base et les recherches finalisées ou les programmes de développement technologique. L'expérience montre que l'exercice est complexe, et en tout état de cause conduit fréquemment à une intégration en contradiction partielle avec les priorités scientifiques d'origine. Quelle que soit l'instance consultative à installer, il est clair en tout cas qu'elle devra d'une manière ou d'une autre être, associée à la préparation des divers scénarios possibles, pour éviter de retomber dans la situation passée. Enfin, la décision finale doit revenir à l'organisme gestionnaire, responsable en dernier ressort de l'emploi des moyens lourds. D'autres problèmes moins importants se posent parfois, notamment dans le domaine des équipements communs à vocation nationale dont le CNEXO a la responsabilité.

Un second interface existe entre le CNEXO et le CNRS : il s'agit de la politique d'incitation. Depuis quelques années, des progrès réels ont été accomplis en matière de concertation inter-organismes pour les actions initiatives. Le CNEXO et le CNRS, à travers le rôle particulier conféré au Programme interdisciplinaire de recherches océanographiques (PIRO), ont tous deux un rôle essentiel à jouer en matière d'incitation, chacun avec sa sensibilité propre : le CNRS/PIRO sera normalement plus soucieux de qualité et de politique de recherche fondamentale, alors que le CNEXO sera naturellement plus sensible aux besoins de connaissance exprimés par les programmes d'application, ainsi qu'à la fédération d'équipes et de moyens, gage de réussite de nombre de programmes ambitieux.

Il faut sans doute, sans bouleversement de structures, sans logique excessive, trouver des procédures telles que les diverses équipes puissent travailler ensemble. Il est plus important d'assurer cette symbiose que de mettre une étiquette sur un organisme. Des progrès réels ont été accomplis, on peut rappeler les résultats :

- dans le domaine de l'aquaculture, l'existence d'une ATP collégiale à parts égales, par le CNRS/PIRO et le CNEXO au niveau national et de deux groupements d'intérêt scientifique fédérant les efforts de tous les organismes de recherche à l'échelle d'une façade littorale : un « GIS » pour le littoral méditerranéen, un autre « GIS » en voie de constitution pour le vaste ensemble Bretagne-Normandie jusqu'au Nord/Pas-de-Calais ; un troisième groupement semblable est envisagé pour la façade Atlantique du pays Basque jusqu'au golfe du Morbihan ;
- dans le domaine de l'océanographie côtière et des études d'aménagement du littoral, le financement réparti entre le CNEXO et le CNRS (PIRO et PIREN) des deux GRECO qui groupent l'essentiel des équipes nationales sur l'étude de la baie de Seine et des interactions continent-océan au niveau des estuaires et des lagunes ;
- enfin, dans le domaine des sciences de la terre, d'un « GIS » associant le CNRS, l'Université de Bretagne Occidentale et le CNEXO.

C'est certainement par de telles formules que l'on peut favoriser le travail de l'ensemble de la communauté scientifique et technique, vers un avenir commun à la mesure des ambitions légitimes de notre pays et de ses besoins.

(1) Il s'agit principalement de la flotte océanographique gérée par le CNEXO pour le compte de la communauté nationale, et qui comprend sept navires de haute mer, et un sous-marin capable d'atteindre 3 000 mètres de profondeur, en attendant l'entrée en service en 1984 du SM 97 qui atteindra 4 000 mètres.

Quelles sont nos spécialités actuelles ? Et comment se situent nos équipes par rapport aux équipes étrangères ?

Si l'on s'en tient à l'aspect fondamental de l'océanographie, la communauté scientifique française est schématiquement caractérisée par une maturité indéniable dans les domaines des sciences de la terre et des sciences de la vie : les effectifs de chercheurs, d'ingénieurs et de techniciens, ont atteint une dimension qui permet le développement de programmes de niveau international.

La communauté géologique, qui participe à de grands programmes internationaux tels que le Programme interdisciplinaire de forages océaniques (IPOD), est particulièrement soucieuse d'une coordination interne encore insuffisante chez les biologistes marins, et réalisée autour de quelques programmes majeurs chez les écologistes. Les océanographes physiciens, et plus encore les chimistes marins, sont insuffisamment dotés en effectifs de recherche ; le lancement de quelques grands programmes, notamment en ce qui concerne la climatologie, permet cependant un réel optimisme.

L'océanographie, par sa nature même, implique des actions de coopération internationale. Quelles sont les missions les plus importantes ? Et quels sont nos principaux partenaires ?

La dimension même des problèmes posés conduit bien souvent les océanographes à travailler en coopération avec d'autres communautés nationales. Parmi les principaux pays avec lesquels la France coopère activement, les Etats-Unis, l'Allemagne et la Grande-Bretagne occupent le premier rang ; d'autres coopérations existent avec les pays méditerranéens, et avec différents pays en développement : par exemple, l'Indonésie, et dans une moindre mesure le Mexique et le Brésil.

Un aspect particulièrement intéressant, et encore insuffisamment exploré, est celui de la mise en commun entre divers partenaires nationaux d'un même outil de recherche. C'est d'une certaine façon ce qui se passe dans le cadre du programme international IPOD qui utilise le navire américain *Glomar Challenger*. En France, le CNEXO, responsable de la gestion de la flotte océanologique nationale, cherche à favoriser des opérations similaires permettant, outre une coopération

réelle des équipes de deux pays, une meilleure utilisation de certains gros équipements : ainsi, dès 1982, une campagne de plongées franco-allemande se déroulera à partir du sous-marin *Cyane* sur la marge continentale marocaine dans la région de Mazagan ; la France prépare actuellement vers le Japon une campagne commune du *Jean Charcot* sur la fosse du Japon, campagne qui devrait être suivie par une série de plongées du nouveau sous-marin *SM 97* actuellement en construction qui atteindra 6 000 mètres de profondeur. On peut également utiliser à bord d'un navire porteur étranger un engin tel que le sous-marin *Cyane*. Bien entendu, ces collaborations impliquent une participation financière équivalente des deux pays intéressés.

Vous êtes vous-même océanographe biologiste. Cette mer vivante, comment apparaît-elle à l'observateur de 1982 ?

L'une des caractéristiques actuelles de l'océanographie biologique, c'est peut-être le décalage qui existe entre l'étude d'une série d'écosystèmes que l'on sait relativement bien caractériser dans leur structure, dont on commence à appréhender le fonctionnement et les relations d'échange avec d'autres écosystèmes, en d'autres termes une approche écologique moderne et une série de questions mal résolues, depuis le simple inventaire des formes vivantes présentes dans l'océan, encore très imparfait, jusqu'à la démographie des espèces marines qui posent, étant donné leur très grande fécondité potentielle, un problème original de régulation naturelle des effectifs. Cette situation contrastée entre une conception écologique moderne et une approche descriptive indispensable est peut-être ce qui caractérise le mieux l'océanographie biologique actuelle. Et je ne parle pas ici de la biologie marine proprement dite, où à côté d'une contribution à des recherches de pointe en matière de neurosciences et de biologie du développement par exemple, on rencontre toute une série de recherches réalisées par un ou deux chercheurs, d'intérêt très divers.

Quelles sont, d'après les recherches que vous menez, les promesses des sources hydrothermales et des communautés animales qui s'y développent ?

La découverte des communautés animales, associées aux phénomènes hydrothermaux sous-marins, apporte

de manière tout à fait inattendue, une série de résultats scientifiques originaux qui intéressent la microbiologie, la biologie et l'écologie marines. Au point de vue écologique, voilà un écosystème dont la plupart des espèces constitutives ne dépendent sans doute pas de l'énergie solaire et de la photosynthèse, mais des apports hydrothermaux et de la chimiosynthèse bactérienne ! L'étude approfondie du grand Pogonophore Vestimentifère géant *Riftia* vient d'apporter la première réponse satisfaisante à un problème posé depuis la découverte du premier Pogonophore, il y a une soixantaine d'années : comment se nourrissent ces animaux dépourvus de bouche et de tube digestif ? Des bactéries symbiotiques concentrées à l'intérieur du corps et qui effectuent sur place, la synthèse organique, à partir de l'énergie apportée par l'oxydation des sulfures et du dioxyde de carbone véhiculés par le système circulatoire du ver fournissent en grande partie la source de nourriture de *Riftia*. Et il y a peut-être là une découverte de portée plus générale.

L'origine même des organismes qui composent la communauté hydrothermale, les processus de propagation d'un site favorable à un autre, les phénomènes d'évolution et d'apparition de nouvelles espèces, autant de problèmes posés aux écologistes marins. En schématisant, le problème écologique est le suivant : ces organismes liés de manière indissoluble à l'existence d'un hydrothermalisme actif ont une croissance excessivement rapide et une vie très courte (de l'ordre de la dizaine d'années) ; or, les phénomènes hydrothermaux eux-mêmes sont également fugaces, du moins à petite échelle. Actuellement, on ne connaît encore que quatre sites relativement bien étudiés au point de vue biologique, et tous les quatre sont situés dans une même zone de moins de 1 500 kilomètres de rayon, ce qui, pour l'océan profond et au plan biogéographique, constitue une distance très faible.

Quelles expressions faunistiques nouvelles prend la communauté hydrothermale dans des zones plus lointaines, dans la région de l'île de Pâques, dans l'océan Indien ? Beaucoup de travail reste à faire avant que l'on puisse aborder ces questions. Voilà en tout cas, un programme de recherche passionnant pour les écologistes et les biologistes marins français, notre pays disposant avec *Cyane* et bientôt le nouveau sous-marin *SM 97* des outils nécessaires.

D'un poids dans l'air de 8 tonnes environ, le submersible Cyana a effectué ses premiers essais en 1969. Il peut atteindre 3 000 mètres de profondeur et emmène un équipage de trois personnes. Il vient, au cours du premier trimestre de l'année, d'effectuer une série de plongées sur un site hydrothermal actif de la dorsale du Pacifique oriental, par 12-13° de latitude Nord.



Coquilles mortes de *Calyptogena magnifica*. - Par 21°N, sur la ride du Pacifique oriental, le sous-marin français Cyana découvre de vastes champs de coquilles mortes de *Calyptogena magnifica*. Ces cimetières de bivalves témoignent de la présence récente dans ces fonds d'un hydrothermalisme actif : lorsque les sources hydrothermales se tarissent, la vie, du moins pour les espèces bien adaptées à ce milieu particulier, ne peut subsister. (Photo Cyana, Centre national pour l'exploitation des océans).



Pogonophore Vestimentifère. - Parmi les animaux découverts à proximité immédiate des sources hydrothermales actives du Pacifique oriental, le grand Pogonophore *Riftia pachytilla* forme des colonies très denses de tubes parcheminés d'où dépasse l'extrémité antérieure vivement colorée en rouge. La longueur du corps du ver peut dépasser 1,50 mètres. Les tubes sont utilisés comme support par des moules. (Photo R.R. Hessler, Scripps Institution of Oceanography, ride des Galapagos).

Où en est en cette fin de siècle la pêche, l'une des activités les plus anciennes de l'homme ?

Dans le domaine des pêches, une notion s'est progressivement imposée depuis une quinzaine d'années : non seulement, les potentialités des océans sont finies, mais surtout le niveau actuel d'exploitation n'est pas très éloigné du maximum possible. Au moins si l'on s'en tient aux espèces, ou plus précisément aux niveaux de production exploités aujourd'hui, le prélèvement annuel maximal autorisé est compris entre 80 et 120 millions de tonnes, soit une fourchette très proche du niveau des captures qui oscille depuis une dizaine d'années entre 55 et 65 millions de tonnes (les fluctuations constatées proviennent en grande partie d'une seule pêcherie, celle de l'anchois du Pérou). Il n'y a guère d'espoir de dépasser sensiblement ces chiffres, même si les résultats actuels en matière de dynamique des populations exploitées fournissent les bases d'une gestion rationnelle des stocks et d'une planification des pêcheries.

Les problèmes que rencontre aujourd'hui la pêche française sont nombreux : accroissement sensible des coûts énergétiques depuis le premier choc pétrolier de 1973, problèmes internationaux en particulier dans le cas des négociations au sein de la communauté européenne, surexploitation de certains stocks traditionnels. L'une des pêches les plus actives, et dans laquelle notre pays a pris une place de leader en Europe, est la pêche du thon tropical, en particulier dans l'Atlantique. On s'efforce également d'apprecier la faisabilité économique de l'exploitation de stocks « nouveaux » tels que deux poissons antarctiques qui fréquentent le plateau des Kerguelen. De manière générale, toute amélioration de la productivité des unités peut contribuer à redresser une situation économique difficile.

Du point de vue de la recherche, toute population animale ou végétale peut faire l'objet d'une étude dynamique : dans le cas particulier des espèces exploitées, biomasse et structure démographique varient en fonction de facteurs anthropiques connus, ce qui constitue un élément intéressant notamment dans une optique prédictive.

Les richesses des fonds marins sont considérables. Pouvez-vous faire le point sur les ressources énergétiques, en particulier les espoirs français pour le pétrole sur notre plateau continental.



tal ? Quelles possibilités s'offrent dans le domaine des matériaux et des minéraux ? On pense de plus en plus aux nodules et également aux sables, aux graviers...

Dans le domaine des ressources minérales et fossiles, il faut tout d'abord souligner l'importance croissante des hydrocarbures d'origine marine, pétrole ou gaz. Pour le pétrole, la production d'origine marine est actuellement de cinq cent cinquante millions de tonnes pour une production totale de trois milliards de tonnes, soit un peu plus de 1/6ème. La situation est plus favorable en ce qui concerne les réserves : les réserves marines connues représentent vingt milliards de tonnes pour un total de quatre vingt dix milliards de tonnes, et l'évolution prévisible des réserves va dans le même sens, les réserves marines pouvant représenter à terme, plus de la moitié des réserves totales. La plus grande partie de ce pétrole marin est contenue dans la zone située par moins de deux cents mètres, profondeurs couramment atteintes avec les techniques actuelles. Il y aurait entre 30 et 40 % des réserves de pétrole marin entre deux cents et deux mille mètres, sans tenir compte des potentialités pétrolières des mers profondes.

On connaît également les possibilités offertes par la mer en matière de matériaux meubles ou granulats : l'inventaire établi par le CNEXO et le Bureau de recherches géologiques et minières avec l'aide financière de divers organismes a recensé plus de cinquante

L'AQUACULTURE : DES PROGRAMMES RAISONNABLEMENT AMBITIEUX

A l'échelle mondiale, l'aquaculture se développe rapidement depuis une trentaine d'années, et les experts de la FAO envisagent dès l'an 2 000 une production mondiale de l'ordre de 30 millions de tonnes, soit la moitié environ des pêches mondiales. Déjà on totalise pour l'année 1981, plus de 8,5 millions de tonnes de poissons élevés en aquaculture.

Quelle place la France peut-elle prendre en ce domaine ? où ? avec quelles techniques ? à partir de quelles espèces ? Telles sont les questions que l'on se pose aujourd'hui.

Après le démarrage de l'ostréiculture actuelle au cours de la seconde moitié du XIX^e siècle grâce aux procédés de collecte de naissain, et de la pisciculture en eau douce, notre pays s'était également préoccupé de l'élevage des poissons marins. Ces débuts ambitieux sont curieusement suivis d'une désaffection presque totale, après la première guerre mondiale. La grande épidémie des années 1921-1922, qui détruisit presque complètement l'ostréiculture bretonne de l'huître plate pour près de six ans, n'encourage pas au développement des recherches sur l'élevage d'autres espèces.

Au lendemain de la seconde guerre mondiale, les recherches menées dans les stations maritimes s'orientent vers l'écologie, au détriment des travaux biologiques à caractère expérimental. On sous-estime alors en France un vaste courant de recherche qui se développe au Japon, aux Etats-Unis, en Grande-Bretagne. Plus grave, on voit s'élever au nom d'un « particularisme » exacerbé des frontières entre les différents domaines d'activité scientifique : aux stations marines universitaires tout ce qui ne fait pas l'objet de pêche ou de cultures, à l'Institut des pêches, les espèces comestibles. En 1960, un étudiant de D.E.A. d'océanographie biologique, connaît la systématique des grands groupes de poissons, mais serait bien en peine de décrire les techniques utilisées en ostréiculture...

C'est en 1967 que l'occasion m'est donnée de rencontrer le « père » de l'élevage de la crevette Penaeide au Japon, le professeur Fujinaga, en voyage d'études en France. La préparation un an plus tard du programme d'orientation « Octan » du CNEXO, me permet de prendre la mesure des résultats obtenus par de nombreux pays, et, partant, du retard général de notre pays (malgré quelques rares initiatives, dont celle du professeur J. M. Péres, directeur de la Station Marine d'Endoume). Qu'il s'agisse de mollusques comme les huîtres et les palourdes américaines, de crustacés comme les crevettes Penaeides ou de poissons comme la plie, des résultats spectaculaires ont été obtenus en matière d'élevage larvaire et de reproduction en captivité ; des écloseries (que l'on appelle un temps des « hatcheries ») ont vu le jour, destinées d'abord à l'expérimentation, puis à la production ; des méthodes fiables de production d'algues unicellulaires et d'organismes zooplanctoniques variés ont été mises au point ; les élevages commerciaux se multiplient...

C'est alors que commence l'aventure moderne de l'aquaculture française. Il faut créer des outils nouveaux, former des jeunes chercheurs, des techniciens, des ingénieurs, enfin, et c'est à quoi je me suis personnellement attaché, inciter l'ensemble de la communauté nationale à aborder cette voie de recherche. Les particularismes évoqués plus haut, ont malheureusement dès cette époque, maintenu l'ostréiculture à l'écart du renouveau scientifique, exception faite de l'étude des agents pathogènes responsables d'une série d'épidémies.

milliards de tonnes de granulats par moins de cinquante mètres de profondeur, dont environ un milliard de tonnes serait immédiatement accessible.

En coopération avec des industriels et le Commissariat à l'énergie atomique, le CNEXO s'est attaché depuis une dizaine d'années à la reconnaissance des champs de nodules polymétalliques du Pacifique. Ces nodules, dont l'abondance sur les grands fonds du Pacifique Nord subtropical varie entre 10 et 15 kg/m², contiennent couramment 1,4 % de nickel, 1,2 % de cuivre, 0,25 % de cobalt et près de 30 % de manganèse (il s'agit là des métaux valorisables). Pour l'instant, et en dehors des problèmes techniques liés au ramassage, les conditions économiques ne permettent d'envisager un démarrage des exploitations que dans la mesure où s'opérerait une hausse sensible du prix des métaux valorisables.

La crevette japonaise *Penaeus japonicus* constitue sans doute l'une des plus belles réussites de l'aquaculture moderne, et sa production dépasse aujourd'hui au Japon 1 500 tonnes, soit un peu plus que le tonnage pêché. Complétant de manière décisive les techniques d'élevage mises au point au Japon, les travaux effectués en France ont permis d'aboutir au contrôle et à la programmation au cours des différentes saisons de la reproduction en captivité de cette crevette qui peut dépasser 150 grammes de poids individuel.

On oppose trop souvent, d'une façon caricaturale une aquaculture intensive, à haute densité et s'intéressant à des espèces à valeur marchande élevée, et une aquaculture semi-intensive ou extensive à densité plus basse et s'appliquant à des espèces à valeur marchande plus faible et on affirme que l'aquaculture intensive n'a rien à voir avec l'aquaculture extensive, la première faisant appel à des technologies sophistiquées, la seconde recourant de manière exclusive aux mécanismes naturels... En fait, il n'y a pas d'opposition radicale, comme le montrent de nombreux exemples actuels : la production d'animaux juvéniles, destinés à être confiés à des éleveurs fait appel aux techniques d'élevage, en élevage à très haute densité rigoureusement contrôlé, et pourtant, aquaculture intensive ou aquaculture extensive utilisent les mêmes juvéniles... Ainsi, un programme récent, qui s'avère un succès technique et économique, concerne l'élevage de la palourde du Pacifique à partir de naissain produit dans une écloserie française : une telle filière fait intervenir successivement les deux formes d'élevage. On pourrait développer bien d'autres exemples.

Il ne serait guère prudent d'affirmer aujourd'hui avoir fait l'inventaire des espèces qui présentent les meilleures caractéristiques. A court terme, il faut souligner l'importance des recherches en nutrition (aussi bien pour les stades larvaires et juvéniles, que durant la phase de grossissement), en pathologie et parasitologie (la dernière épidémie qui a atteint l'huître plate n'est pas encore en phase de recul), en physiologie de la reproduction. A moyen terme, on pressent le besoin de recherches en matière génétique, d'éthologie, etc... Il faut également poursuivre les recherches écologiques qui ont trait aux relations et aux interactions, entre l'espèce que l'on désire élever, et le milieu d'élevage. Le problème revêt une importance croissante, lorsqu'on cherche à tirer parti de la production naturelle et à en optimiser l'utilisation.

Dans le cadre de sa politique d'incitation, le CNEXO propose en 1975, un programme d'étude des mécanismes de production dans des volumes de dimensions variables, le programme ECOTRON, qui aborde différents aspects de la valorisation et du contrôle de la production naturelle des lagunes littorales, des anciens réservoirs à poissons (dont l'exploitation a dû être abandonnée pour des raisons économiques) ou des bassins ou des « claires » ostréicoles où se pratiquent l'affinage et le verdissement des huîtres. Ce programme auquel une quinzaine d'équipes participeront pendant cinq ans, apporte des résultats intéressants autant l'aquaculture intensive que les élevages extensifs, y compris en milieu ouvert. Des programmes plus spécifiques en matière de « searanching » de salmonidés (1), d'accroissement de la productivité naturelle des gisements de coquilles St-Jacques par captage de naissain ou d'élevage extensif de l'ormeau, ont été également lancés par le CNEXO.

Une voie de recherche particulièrement importante, qui se situe à la croisée des problèmes d'aquaculture et d'halieutique, a trait aux processus qui régulent les effectifs des générations successives. La réduction du nombre s'effectue sans doute à une période très précoce et de courte durée : il est essentiel d'élucider les mécanismes, dépendants ou indépendants de la densité initiale des œufs et des jeunes larves, qui interviennent.

(1) Ce terme qui n'a pas d'équivalent français, correspond à une technique aquacole en développement aux Etats-Unis et au Japon, qui repose sur la mémoire olfactive des saumons : après une période d'ingestion en mer suffisante, un certain nombre de poissons reviennent à la rivière d'origine, où ils sont repris. La rentabilité de telles opérations est liée aux taux de retour des saumons.

Peut-on actuellement envisager une gestion raisonnable de l'océan, qu'il s'agisse des ressources vivantes ou des ressources minérales fossiles ?

Depuis une vingtaine d'années, cette question se pose d'une manière renouvelée, par rapport aux soucis des grandes nations industrielles au début de ce siècle, qui se limitaient à la gestion des ressources vivantes de la mer, et ont conduit à la création de commissions internationales dont l'un des exemples les plus connus est le Conseil international pour l'exploitation de la mer qui réunit les nations riveraines de l'Atlantique Nord et des mers adjacentes (en particulier, la mer du Nord).

La prise de conscience de l'ensemble des richesses potentielles des océans bien au-delà des ressources vivantes, s'est matérialisée par la Déclaration de Malte, le 1er novembre 1967, à l'Assemblée générale des Nations-Unies, qui proposait de considérer l'Océan international au-delà des 200 milles comme un patrimoine commun qui devrait être exploité au bénéfice de l'humanité tout entière.

L'importance de l'enjeu a conduit l'ONU à mettre en place une conférence internationale sur le Droit de la Mer. C'est dans ce cadre que se négocient par exemple des questions telles que le régime juridique des exploitations de nodules polymétalliques situés hors des zones économiques exclusives, dans ce qu'il est convenu d'appeler l'océan « res nullius ». Alors que l'on croyait aboutir, une réflexion nouvelle des Etats-Unis consécutive à la mise en place de la nouvelle administration du président Reagan vient récemment de remettre en cause un certain nombre de points que l'on espérait acquis. Une gestion raisonnable de l'océan, si elle ne paraît pas irréaliste au plan technique, constitue incontestablement une gageure politique.

*Entretien réalisé par
Monique Mounier-Kuhn,
chargé des relations parlementaires
et publiques au CNRS.*

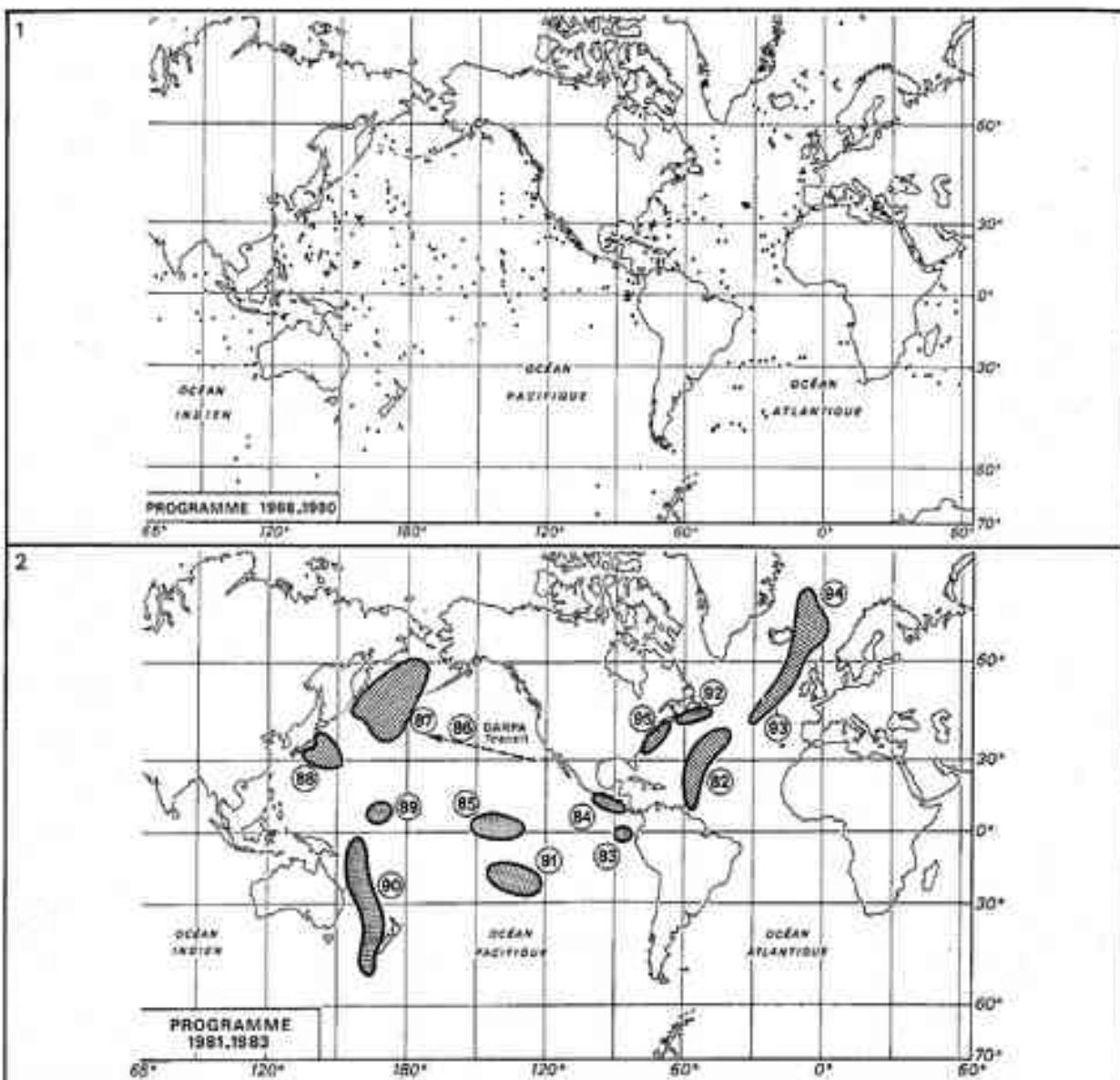


Fig. 1 – Les forages effectués dans le cadre du programme JOIDES puis IPOD, de 1968 à 1980. Les sites de forages ont été représentés par des points noirs. Au cours de ces douze années, plus de 500 sites (exactement 555) ont été forés, dans tous les océans et mers du monde. Ces forages profonds ne concernent pas le plateau continental qui reste du domaine de la recherche pétrolière et qui, à ce titre, est souvent très bien connu : il n'y a pas eu de forage IPOD en Manche ou en mer du Nord par exemple ; par contre, il y en eut en Méditerranée. La répartition des forages reflète les préoccupations scientifiques et la situation géographique des pays participants, ou les limitations du N/O Glomar Challenger. L'abondance des forages dans le Pacifique est dû à l'importance géodynamique de cet océan : c'est là que la planète est la plus active et que se forgent les montagnes de demain. Dans l'Atlantique Nord, les nombreux forages effectués reflètent l'intérêt scientifique de cet océan, modèle d'ouverture récente – depuis 180 millions d'années – entre le Nouveau et l'Ancien Monde, mais aussi l'intérêt de 4 des 5 participants au programme (Allemagne Fédérale, France, Royaume-Uni, USA). La rareté des forages dans l'océan Indien exprime l'éloignement de cet océan, par rapport aux pays participants ; cet océan est pourtant d'un exceptionnel intérêt. Aucun forage n'a été conduit dans les très hautes latitudes : la taille du N/O Glomar Challenger ne permet pas d'y travailler par les gros temps qui y sont la règle ou dans les zones de banquises ; l'éventuelle mise en service du N/O Glomar Explorer (qui jauge 63 000 tonnes), permettrait d'en entreprendre l'étude.

Fig. 2 – Le programme intermédiaire de forage en cours dans le cadre IPOD pour deux ans (octobre 1981 – octobre 1983). Le programme est divisé en Campagnes (Leg), de deux mois dont une semaine d'escale entre deux Leg ; il y a donc six Leg par an. Le programme en est actuellement au Leg 86 (Nord-Ouest Pacifique – mai-juin 1982) ; le dernier Leg 95 est prévu pour septembre-octobre 1983. Les centres d'intérêt de ces Leg sont : les marges continentales passives de l'Atlantique (Legs 92, 95) ; les marges continentales actives dans le Pacifique, fosse d'Amérique centrale (Leg 84), fosse du Japon et fosse de Nankai (Leg 88) ; la croûte océanique au niveau de la ride médio-atlantique (Leg 82) et de la ride de Costa Rica dans le Pacifique (Leg 83 – au cours de celui-ci, 1 180 m ont été forés en continu dans la croûte océanique elle-même) ; avec un regard particulier pour l'hydrothermalisme profond au niveau de la ride Est-Pacifique par 20° de latitude Sud (Leg 91) ; le paléoenvironnement océanique, équatorial (Leg 85 dans le Pacifique central), subboréal (zone de convergence de courant dans le Nord-Ouest Pacifique, Leg 87), subantarctique (zone de convergence de courants dans le Sud-Ouest Pacifique, Leg 90) ; avec un regard particulier sur l'Ouest Pacifique dans la zone où celui-ci est le plus ancien (Jurassique, entre 190 et 140 millions d'années ; éventuellement plus, Leg 89) ; l'expérimentation en fond de puits, notamment l'implantation de sismographes sensibles, dans le Pacifique septentrional (Leg 86) et l'Atlantique central (Legs 93 et 94).

Le programme international de forages profonds (IPOD)

Jean AUBOUIN

Les grands forages océaniques profonds ont débuté au cours de l'année 1968, sous l'égide d'un groupement JOIDES (Joint oceanographic institution for deep earth sampling), formé par la réunion de cinq laboratoires océanographiques américains. L'objectif était alors de vérifier la théorie des plaques, notamment en prouvant que le fond océanique avait bien une constitution différente du socle continental et qu'il était d'un âge progressivement croissant à partir de l'axe des ridges méridio-nordiques, l'âge en un endroit donné étant déduit par les anomalies magnétiques. Dès 1974, la République fédérale d'Allemagne et l'Union soviétique rejoignaient le projet ; en 1975, ce fut au tour de la Grande-Bretagne, de la France et du Japon ; le projet prit alors le nom de « Phase internationale de forages océaniques profonds » (International phase of ocean drilling : IPOD). Depuis, le programme fonctionne sur une base internationale au sein de JOIDES dans lequel la France est représentée par le Centre national pour l'exploitation des océans en accord avec le Centre national de la recherche scientifique.

Le programme dispose d'un budget autonome qui lui est attribué par la National Science Foundation, en fonction d'une participation des pays associés : actuellement le budget est d'environ 24 millions de dollars, la contribution des pays non américains étant de 10 millions de dollars, soit 2 millions par pays. Un comité de programme, Planning committee, exclusivement formé de scientifiques, choisi en proportion de la participation de chacun des pays, détermine le programme de forages et son calendrier. Un comité exécutif, Executive committee, formé par les représentants des organismes contractants, décide des aspects administratifs et financiers relatifs au projet. Un organisme opérateur est en charge du programme : c'est le Scripps Institution of Oceanography, de l'université

de Californie à San Diego, au sein de laquelle un « Deep sea drilling project » dispose de l'autonomie que lui confèrent son budget, son personnel, ses bâtiments. Enfin, les opérations de forages sont l'objet d'un contrat avec la compagnie Global Marine à laquelle appartient le navire *Glomar Challenger*.

Du côté français, la structure est calquée sur l'organisation internationale : le comité directeur IPOD-France est présidé par le Président du CNEXO et se charge de tous les aspects administratifs de la participation française et en assure le suivi ; le Comité scientifique IPOD-France, proposé par le CNRS en accord avec le CNEXO, se charge des aspects scientifiques : il transmet les souhaits de la collectivité française et propose les embarquants à bord du *Glomar Challenger*.

Quelques résultats

On peut dire que dans une première phase, qui correspond à peu près à la période JOIDES, le programme s'est attaché essentiellement à la vérification des prédictions faites dans le cadre de la théorie des plaques. Le plus spectaculaire résultat concerne l'âge du fond océanique dont il fut vérifié que celui-ci est bien toujours récent – c'est-à-dire de moins de 200 millions d'années – et toujours de plus en plus ancien en s'éloignant de la ride méridio-nordique où naît la croûte des océans. Il n'y a pratiquement pas eu de contradiction entre la vérification faite par l'âge stratigraphique du premier sédiment au-dessus de la croûte océanique et l'âge proposé par les anomalies magnétiques induites dans celle-ci. Ce résultat très remarquable, qui se vérifie toujours à l'occasion de chaque forage dans la croûte océanique, fait que la théorie des plaques peut être considérée comme démontrée. Ce fut là, à l'échelle géologique, une expérience en grande nature dans le temps et dans l'espace. C'est la première de ce genre qui ait pu être faite dans le domaine des sciences de la Terre. Elle a durablement et profondément changé les perspectives de celles-ci.

Dans une seconde phase, certains

problèmes ont été traités au fur et à mesure du progrès des connaissances et du progrès technologique. Ainsi la mise au point du carottier à piston a permis un grand essor des études de paléoenvironnement ; la mise au point de techniques d'implantation d'appareils géophysiques au fond des forages a permis de développer certaines études notamment sismologiques, etc...

La croûte océanique, dans un premier temps reconnue comme différente de la croûte continentale, montre maintenant son hétérogénéité géochimique, toujours nouvelle par rapport à l'idée qu'on en a. Au cours de la campagne de novembre-décembre 1981 (Leg 83), au niveau du rift du Costa Rica, un forage a pénétré de plus de 1 100 m dans la croûte océanique jusqu'à atteindre la zone des complexes de filons (dykes) de gabbros et dolérites sous la couverture volcanique basaltique ; ce qui représente une bonne vérification du fait que la croûte est le modèle des grands massifs ophiolitiques charriés sur les continents dans les chaînes de montagnes ; ces massifs marquent donc la cicatrice d'océans perdus. L'existence d'un hydrothermalisme au niveau des ridges méridio-nordiques, récemment découvert, fait l'objet de nouveaux forages dans les zones hydrothermales.

Dans les marges continentales, les forages ont mis en évidence ou vérifié un grand nombre de leurs caractères. Les marges passives, ainsi nommées parce qu'elles ne sont pas associées à des zones de tremblements de terre et de volcanisme – ce sont par exemple les marges de l'Atlantique –, ont vu confirmer leur double structure en extension ou en cisaillement, les blocs continentaux se trouvant basculés à l'occasion de ces mouvements ; tandis que la « trilogie d'ouverture », successivement dépôts continentaux – évaporites – dépôts marins, permet de suivre l'ouverture de chaque océan au travers de trois étapes dont les modèles sont les grands rifts africains (dépôts continentaux), la fosse des Afars (épaves), la Mer Rouge enfin (dépôts marins) ; cette dernière n'ayant plus qu'à s'ouvrir davantage pour créer un océan. Les marges actives, ainsi nommées parce qu'elles sont associées à

Jean Aubouin, Président du Comité scientifique IPOD France, professeur à l'université de Paris VI, dirige le Laboratoire de géologie structurale (LA 215) de Paris.

des zones de tremblements de terre et de volcanisme – ce sont les marges du Pacifique par exemple –, ont vu confirmer le fait qu'elles devaient leurs caractéristiques à la subduction de la plaque océanique sous la marge continentale ; suivant les cas, la marge continentale accompagne cet affaissement en se débitant en paquets failles formant autant de marches d'escalier ou au contraire s'augmente par l'accrétion progressive des sédiments océaniques « pelés » par la subduction.

Le carottage des sédiments du grand large a permis de grands progrès dans la connaissance du paléoenvironnement : des microflores et microfaunes qui se sont succédées au cours du temps ; des climats qui furent ceux de la surface du Globe et dont les effets sont fidèlement enregistrés dans les sédiments ; du régime des courants marins qui changent drastiquement à certaines périodes, en fonction des ouvertures et fermetures océaniques : l'apparition de circulation polaire en fonction de l'ouverture de l'Atlantique ou l'interruption d'une circulation équatoriale générale par la fermeture de la Téthys, cet océan latitudinal aujourd'hui disparu, furent des causes essentielles de changement des courants et, par conséquent, des climats, etc... .

Le programme international de forages océaniques profonds a apporté un renouvellement essentiel à la pensée géologique. Désormais, l'océan est une préoccupation à l'égal des continents pour le géologue. D'ailleurs, les frontières se sont effacées qui individualisaient une communauté des océanographes : désormais, géologues, géophysiciens, géochimistes travaillent indifféremment à terre ou en mer. Paradoxalement, pour certains aspects, les océans sont maintenant mieux connus que les continents ; aussi s'est-il fait jour dans la communauté internationale, le désir d'un programme de forages continentaux qui soit en quelque sorte l'équivalent du programme IPOD : un tel programme, amorcé dans différents pays au plan national, est au cœur du projet « Lithosphère » conçu par le programme international « Geodynamics » commun à l'Union internationale des sciences géologiques et l'Union géologique et géophysique internationale. Ainsi donc, ces dix années qui viennent verront-elles coexister deux grands programmes de forages, l'un dans les océans, tenant compte de leur éternelle jeunesse, l'autre sur les continents, montrant leur complexe destin.

Fig. 1 – Le N/O Glomar Challenger, vu de tribord (cliché DSDP). Ce navire a été ainsi nommé d'après le nom de la compagnie Global marine à laquelle il appartient et d'après le nom du célèbre N/O Challenger qui, affrété par la Royal Society, parcourut les mers du monde au siècle dernier. Le navire jauge 11 000 tonnes ; il est long de 121,6 m (400 pieds), large de 19,76 m (65 pieds) et a un tirant d'eau de 6,08 m (20 pieds). On observe le derrick haut de 60 m (194 pieds) au-dessus de la ligne de flottaison, sous lequel se trouve un puits de 6 m × 6 m au travers duquel passe le treuil, le train de tige et les différents instruments de forage. Sa capacité de forage est de 7 000 m de train de tige. Le Glomar Challenger a foré une fois sous 7 000 m d'eau (dans la fosse des Mariannes), plusieurs fois sous 6 000 m d'eau (dans la fosse d'Amérique centrale), couramment sous 4 000 m d'eau. Un maximum de 1 700 m de sédiments ont été carottés dans le golfe de Gascogne sous 3 900 m d'eau. En avant du derrick est le atelier où sont entreposés automatiquement les tubes qui seront montés en train de tige à mesure de la progression du forage. On observe une double turbulence dans la mer : à la poupe, à l'emplacement des hélices, à la proue, à bâbord du bateau (en arrière de la photographie), à l'emplacement du pousseur avant qui mue le bateau dans un plan perpendiculaire à son allongement ; le jeu des hélices et des poussoirs assurent le positionnement dynamique du navire (fig. 2). Après l'achèvement du programme intermédiaire de deux ans, il est envisagé de mettre en service le N/O Explorer qui, jugeant 63 000 tonnes, aurait des performances beaucoup plus grandes (10 000 m de train de tige, forage sous toutes latitudes, etc) et serait un véritable laboratoire flottant.

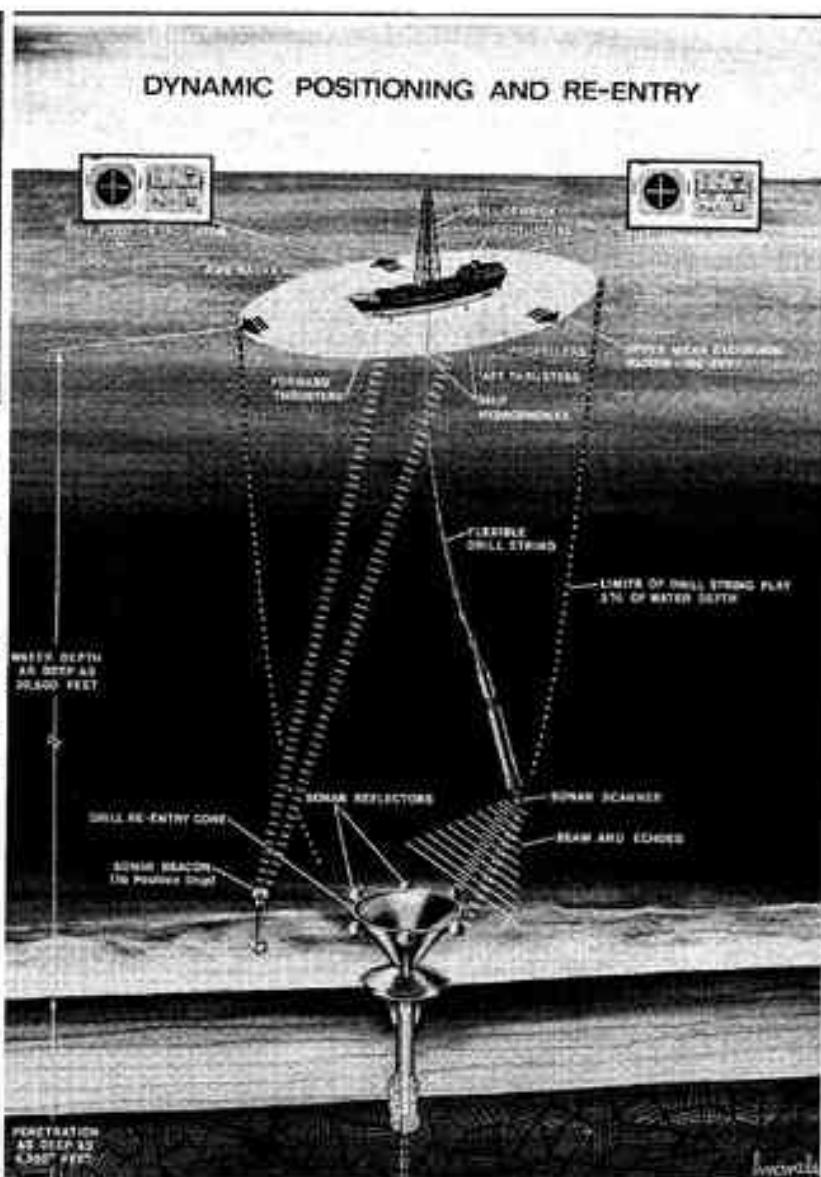
Fig. 2 – Positionnement dynamique et Re-entrée (cliché DSDP). – Positionnement dynamique : la bouée sonique mouillée sur le fond émet un signal, dans la fréquence 13,5 kHz ou 16 kHz suivant la bouée choisie, reçu par quatre hydrophones placés à l'avant et à l'arrière du bateau. Un ordinateur de bord maintient la distance à la bouée en commandant aux hélices arrières un mouvement avant-arrière ou arrière-avant et aux poussoirs latéraux avant et arrière un mouvement bâbord-tribord ou tribord-bâbord, de telle manière à maintenir le bateau dans un cercle de 30 m de rayon centré à la verticale de la bouée. – La Re-entrée est utilisée pour la poursuite d'un forage en terrain particulièrement dur, comme les formations à silice ou les radiolarites et surtout les roches ignées qui usent rapidement le treuil. Celui-ci doit donc être remplacé et le puits retrouvé, afin de reprendre le forage là où il a été arrêté. Au début du forage, un cône d'environ 5 m d'ouverture, est fixé sur le fond. Il porte trois réflecteurs soniques sur sa marge qui réfléchissent le signal émis par un scanner sonique placé à l'extrémité du train de tige ; repérée sur un indicateur placé sur la passerelle de commande, l'extrémité du train de tige est située par rapport au cône ; une délicate manœuvre d'approches successives, permet de réengager l'extrémité du train de tige dans le puits et, à partir de là, de reprendre le forage dans celui-ci. Les limites « d'excursion » du train de tige en fonction de sa relative flexibilité, ont été représentées. Elles impliquent un positionnement du navire d'autant plus strict que la profondeur d'eau du forage est faible. Ce qui peut conduire à l'abandon d'un puits, quand, par trop gros temps par exemple, le positionnement dynamique n'est plus suffisant.

Fig. 3 – Exemple de carotte foré par le N/O Glomar Challenger. Cette carotte a été recueillie dans un puits foré dans l'océan Pacifique au large du Guatemala, par 4 150 m de profondeur d'eau (Leg 67, mai-juin 1979, puits 495). On observe, vers 170 m de profondeur de forage, le contact entre le sommet d'une craie blanche à nanofossiles et la base d'une baie brune siliceuse à radiolaires. Ce changement de sédimentation, qui se situe exactement à la fin du Miocène moyen – à environ 12 millions d'années –, est dû à l'approfondissement progressif du fond océanique ; à partir d'une certaine profondeur dite « profondeur de compensation des carbonates » (en moyenne 3 000 m), les frêles coquilles calcaires des organismes planctoniques sont dissoutes et seules persistent celles des organismes siliceux. Le passage sous la CCD (Carbonate Compensation Depth) de la plaque océanique peut avoir diverses causes, les plus courantes étant le normal approfondissement (dit subsidence) de la croûte océanique à mesure de son vieillissement (se solidifiant sur une épaisseur de plus en plus grande, elles deviennent plus lourdes) ou la variation de la CCD pour des causes climatiques par exemple. L'analyse des sédiments recueillis permet ainsi de reconstituer le paléoenvironnement océanique et son évolution.

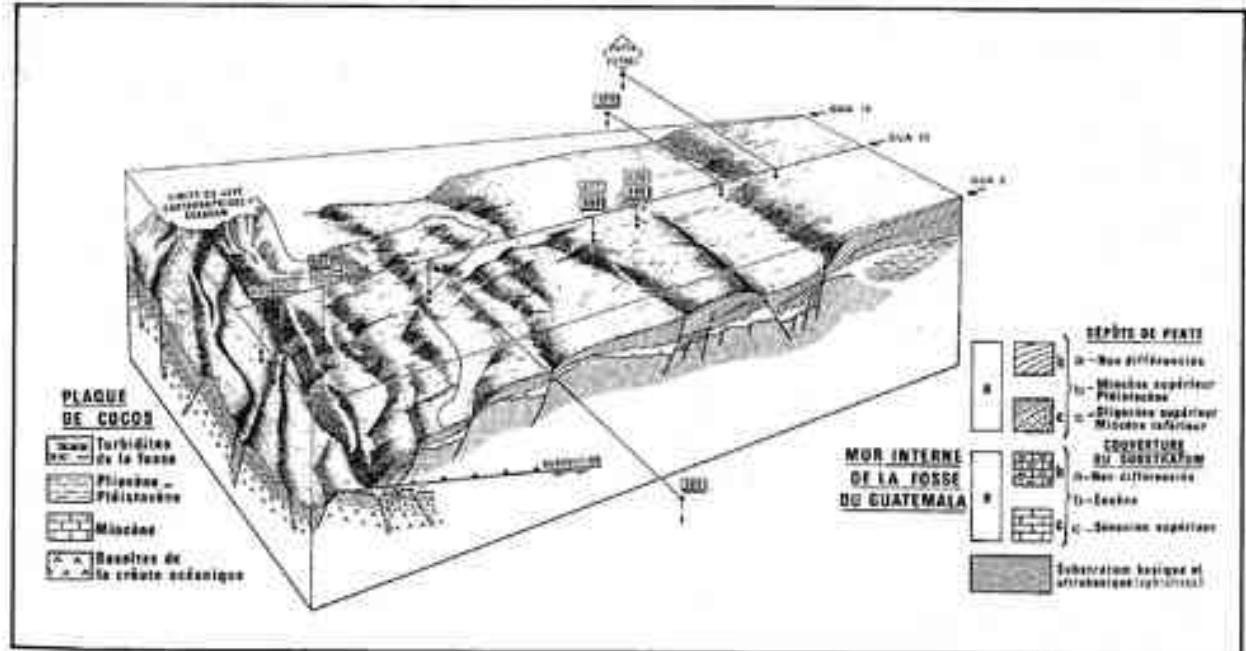
Fig. 4 – Exemple de résultat détaillé, obtenu dans le cadre du programme IPOD de deux ans, 1981-1983 : la subduction de la plaque océanique pacifique de Cocos sous l'Amérique centrale. Ce bloc-diagramme a été dessiné grâce aux résultats des forages fait par le N/O Glomar Challenger (Leg 84, janvier-février 1982), en s'appuyant sur les données sismiques et un levier bathymétrique précis, fait au sondeur multifaîceux par le N/O Jean Charcot. On y voit la jeune plaque de Cocos (d'âge miocène : 25 millions d'années) « tomber » obliquement en subduction sous la marge d'Amérique centrale, formée de terrains beaucoup plus anciens (le plus ancien foré date de la fin du Crétacé, soit d'environ 70 millions d'années) et qui accompagne ce mouvement par un effondrement en marches d'escalier. Ce n'est là qu'un des modèles de la subduction : en d'autres circonstances, le sommet des terrains sédimentaires est « pelé » à l'entrée sous le continent, en une série d'écaillles dont l'accumulation soulève la marge qui peut émerger en un arc insulaire non volcanique qui double un arc insulaire volcanique (car de toute façon, la subduction s'accompagne toujours de volcanisme comme de séismes). Cet autre modèle a été foré dans la fosse de la Barbade, aux Petites Antilles (Leg 78A, février-mars 1981).



3



4



Des nodules polymétalliques à l'hydrothermalisme sous-marin

Claude LALOU

Lorsqu'en 1873, l'expédition autour du monde du HMS Challenger, dirigée par Sir Charles Wyville Thomson, découvrit les premiers nodules de manganèse à environ trois cents kilomètres au Sud-Ouest des Canaries, personne ne pouvait imaginer l'importance que prendrait cette découverte cent ans plus tard. En effet, au cours du même voyage, des nodules furent dragués dans presque tous les grands fonds océaniques ; ils furent alors considérés comme des curiosités et plusieurs origines furent proposées qui sont toujours discutées. Cependant, peu de travaux de recherche ont été entrepris jusqu'à ce que les industriels découvrent, dans les années soixante, que les nodules pouvaient fournir certains métaux comme le nickel, le cobalt ou le cuivre qui risquaient, soit de faire défaut sur le continent, soit de rendre les pays industrialisés tributaires des pays miniers, d'où un effort considérable, à la fois dans le domaine de la recherche scientifique pour rechercher des guides à la prospection ; dans le domaine de l'industrie du traitement chimique des nodules pour l'extraction des métaux intéressants ; dans le domaine de la technologie où il fallait créer des nouvelles techniques car les champs de nodules se trouvent sous quatre mille à cinq mille mètres de hauteur d'eau, en plein océan, et enfin sur le plan du droit de la mer (à qui appartiennent ces gisements ?).

Par ailleurs, nous verrons qu'un nouveau phénomène important, l'hydrothermalisme sous-marin, a été récemment mis en évidence, jetant une lumière nouvelle sur les métallisations en milieu océanique profond.

Qu'est-ce-qu'un nodule ?

Les nodules sont des concrétions noires ou brun foncé se formant en général autour d'un corps dur ou noyau. Ils ont en moyenne la taille de pommes de terre,

mais toutes les tailles existent entre le micronodule millimétrique et le nodule « Horizon », le plus gros rencontré jusqu'à présent et qui pesait 850 kilos. Leur surface peut être lisse ou mamelonnée, et leur forme va de la sphère parfaite à des ellipsoïdes aplatis. L'oxyde est en général réparti en couches concentriques autour du noyau, ces couches internes ayant généralement des compositions chimiques et minéralogiques un peu différentes.

Répartition et composition moyenne

Des cartes de répartition des nodules ont été dressées dès les premières découvertes du Challenger et de l'Albatross, mais c'est essentiellement depuis une vingtaine d'années qu'elles ont été complétées par des études et des recherches systématiques, et l'on connaît maintenant, pour l'ensemble des océans la répartition des nodules.

Ils sont en général localisés dans les zones de faible sédimentation et dans lesquelles le volcanisme a pu introduire des débris rocheux autour desquels la nucléation a pu se faire ; cependant certains se sont formés autour de débris organiques (dents de requin, otolithes de cétoques, etc...) ; leur plus forte densité se trouve dans les plaines abyssales.

Dans l'océan Pacifique Nord, la répartition est quasi-latitudinale, les plus fortes concentrations se retrouvent entre 10°N et 20°N, et constituent la zone dite « économiquement exploitable ». Dans le Pacifique Sud, on n'a pas ce schéma latitudinal, les zones riches étant localisées dans la partie centrale de cet océan, autour des Marquises, des îles de la Société et de l'archipel des Tuamotous. Dans l'océan Atlantique Nord, il n'existe pas de grands champs, mais on trouve des nodules dans de petites zones de l'Atlantique Nord-Ouest où la sédimentation, pour diverses raisons est très faible. Par contre, on trouve dans l'Atlantique Sud, entre la ride médio-atlantique et l'Amérique du Sud, de grandes plaines abyssales riches en nodules. Enfin, dans l'océan Indien, leur répartition corres-

pond aussi aux grands traits topographiques, ils sont plus abondants dans les zones à faible sédimentation, loin des continents. Une des caractéristiques de ces champs est la grande variabilité de densité de nodules à très faible distance ; en effet, en quelques centaines de mètres, on peut passer de nodules quasi-jointifs à des espaces sans aucun nodule. En profondeur dans les sédiments, on trouve aussi des nodules, et l'utilisation des carottiers de grandes surfaces (1 m^2) a permis de montrer que, en profondeur aussi, ils se présentaient sous forme de lits interstratifiés.

Les deux principales composantes des nodules sont le fer et le manganèse (respectivement, en moyenne environ 15 à 16 %), puis viennent la silice ($\approx 8\%$), l'aluminium ($\approx 3\%$), le calcium ($\approx 2,5\%$), le sodium et le magnésium ($\approx 2\%$) ; tous les autres éléments sont en moyenne inférieurs au pourcentage. Cependant là encore, la caractéristique principale des nodules est leur extrême variabilité autour de ces valeurs moyennes. Les métaux considérés comme actuellement économiquement intéressants sont : le nickel ($\approx 0,5\%$), le cobalt ($\approx 0,3\%$) et le cuivre ($\approx 0,25\%$). Si les nodules avaient uniformément cette composition, ils ne seraient probablement pas exploitables ; en effet, on considère que pour qu'ils soient économiquement intéressants, il faut que la somme Ni + Co + Cu soit supérieure à 1,5 % à 2 %. Les variations de composition chimique des nodules sont importantes, par exemple, dans un même océan, les compositions chimiques seront différentes que l'on soit dans une plaine abyssale, en bordure des plateaux continentaux ou sur des « sea mounts ». Des relations inter-éléments ont été mises en évidence mais elles sont encore mal connues.

Du point de vue minéralogique, il s'agit généralement d'oxydes mal cristallisés, de telle sorte qu'une importante querelle se dresse entre les minéralogistes pour nommer ces oxydes, mais c'est pourtant de cette minéralogie que dépend en grande partie la richesse ou la pauvreté en métaux utiles des nodules. En effet, ces différents minéraux, quelle que soit leur dénomination, acceptent plus ou moins les impu-

□ Claude Lalou, directeur de recherche au CNRS et sous-directeur du Centre de faibles radioactivités de Gif-sur-Yvette. (Convention CNRS-CEA).

retés dans leurs réseaux.

Origine des nodules

Le problème est en fait ramené à l'origine des éléments qui les composent. Dès leur découverte, quatre origines ont été proposées, dont trois sont encore actuellement discutées.

- Le manganèse des nodules provient essentiellement de l'attaque des roches volcaniques par l'eau de mer.
- Le manganèse provient des sources hydrothermales.
- Enfin, il provient simplement de l'eau de mer elle-même.

C'est la raison pour laquelle de nombreuses recherches ont été entreprises pour trouver leur vitesse de formation. En effet, dans les deux premiers cas, on aurait un enrichissement important de l'eau de mer en métaux, donc une possibilité de formation rapide alors que dans le troisième cas, seule une formation très lente pourrait prendre place.

Toutes les mesures radiométriques conduisent à une vitesse de formation très lente, compatible avec les teneurs normales en éléments de l'eau de mer ; en outre, jusqu'en 1975, l'existence de puissantes sources hydrothermales semblait hypothétique. Cependant, quelques rares auteurs, dès 1970, émergent des doutes sur le sens des vitesses de croissance observées. Les nodules étant extrêmement poreux, il semblait difficile de considérer qu'ils représentaient des systèmes chimiquement clos, condition nécessaire à toute datation radiométrique. Des anomalies, comme le fait de trouver un noyau plus jeune qu'il ne pouvait être d'après les mesures de croissance, étaient trouvées, et surtout, même dans les zones à très faible vitesse de sédimentation, celle-ci est toujours de l'ordre du millimètre par 1 000 ans alors que les vitesses de croissance données pour les nodules sont de l'ordre du millimètre par million d'années. Comment les nodules peuvent-ils rester en surface ? Les tenants des vitesses lentes sont alors obligés de faire des hypothèses : remontée

permanente des nodules par les organismes marins, secousses telluriques les maintenant en surface, nodules flottants, etc...

Découverte des sources hydrothermales sous-marines

On avait bien, depuis quelques années, trouvé des dépôts de manganèse dont les caractéristiques un peu différentes des nodules, richesse en manganèse et pauvreté en éléments trace, et les vitesses de croissance élevées ainsi que leur proximité des zones volcaniques actives les avaient fait relier à un certain hydrothermalisme. Mais ce n'est qu'en 1973 que les plongées dans l'axe de la dorsale médio-atlantique, au cours de la mission franco-américaine FAMOUS, ont mis en évidence des sources hydrothermales, inactives au moment de la plongée et probablement de faible amplitude, mais les bouches émissives étaient aperçues directement. Plus tard, en 1977, les américains découvraient les sources hydrothermales actives des Galapagos, où à la fois des anomalies de température et de composition chimique de l'eau, permettant à une vie inconnue et florissante de se développer, étaient mises en évidence.

La découverte la plus spectaculaire, probablement un des événements les plus importants en océanographie, est encore franco-américaine. Après que la soucoupe française CYANA ait décou-

vert, à l'Ouest de la dorsale Est Pacifique, vers 21°N, des dépôts de sulfures métalliques en forme d'édifices coniques (1978) c'est, quelques mois plus tard, que le sous-marin ALVIN a découvert le spectacle le plus fabuleux et le plus inattendu : des sources d'eau chaude, à 350°C, sortant en jets puissants noirs ou blancs de cheminées de sulfures métalliques. Les quelques datations obtenues montrent que ces cheminées ont de vingt à soixante ans.

Les analyses chimiques préliminaires du panache ont montré essentiellement la présence d'hélium dont le rapport isotopique $^{3}\text{He}/^{4}\text{He}$, anormal pour le milieu océanique, prouvait que l'eau qui ressortait avait pénétré profondément dans la croûte et le manteau et que ces eaux étaient chargées en manganèse, même encore loin des sources.

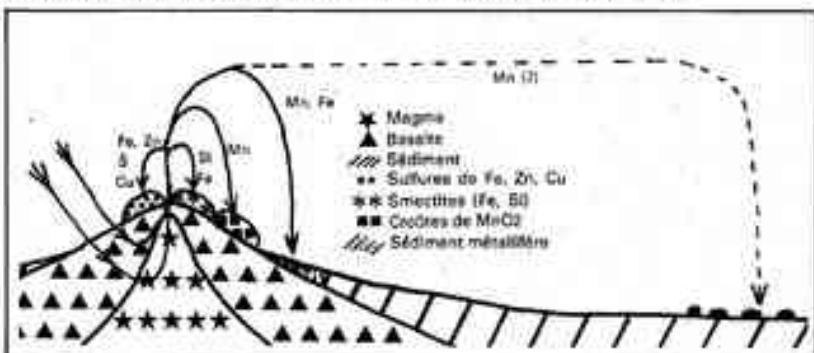
Les expériences en laboratoire sur les interactions à haute température et haute pression entre le basalte et l'eau de mer démontrent que de nombreux autres éléments sont ainsi introduits dans l'eau de mer. Par conséquent, ce sont tous les bilans des éléments (y compris de ceux formant les nodules) qu'il faut revoir. En effet, depuis ces découvertes, chaque plongée dans une zone d'accrétion rapide, montre l'existence de ces cheminées actives ou non. Il est encore trop tôt pour conclure, les bilans n'étant pas encore établis, mais il est impossible de nier, comme il y a seulement dix ans, l'impact chimique de l'hydrothermalisme sur l'Océan.



L'un des nodules Osiris de l'océan Pacifique (≈ 2 à 6 cm de diamètre, profondeur 4 400 m, 29°54' S, 61°56' E).



Champ de nodules sur le flanc d'un Seamount, dans l'océan Atlantique (28°50' N, 25°28' W).



Schématisation d'un circuit hydrothermal : l'eau de mer entrant par des fissures, ressort au centre des dorsales actives après s'être chargée en un certain nombre d'éléments qui précipitent, sous forme d'oxydes, de sulfures ou d'hydroxydes suivant les conditions d'environnement.

La découverte et l'étude des grands fonds : de l'accrétion à la subduction

Vers quelles technologies nouvelles faut-il s'orienter
et pour explorer quels domaines ?
L'auteur nous livre les réflexions que lui inspirent
ces deux interrogations.

Xavier LE PICHON

Martin Harwit, dans une réflexion récente sur l'histoire de la découverte en astronomie, fait une distinction très éclairante pour mon propos entre la découverte de phénomènes nouveaux qui suppose une nouvelle technique d'observation « indépendante et essentiellement différente des techniques utilisées jusqu'à présent » et l'analyse des phénomènes déjà découverts. Celle-ci suppose que l'on ait déjà identifié les phénomènes que l'on veut étudier. La question posée est : « Comment fonctionnent-ils ? ». L'analyse peut généralement se faire avec la panoplie d'outils disponibles : elle est plus facilement programmable et moins coûteuse. Elle a donc souvent la faveur des « décideurs ». Je voudrais pourtant ici faire un plaidoyer en faveur de la découverte dans l'océan profond sans pourtant minimiser l'importance des programmes d'analyse.

Harwit montre que les grandes découvertes astronomiques ont un certain nombre de caractéristiques communes que je reprendrai en partie ici, car ces caractéristiques s'appliquent également aux grandes découvertes dans le domaine de l'océan. C'est évidemment parce que, dans les deux cas, il s'agit de sciences qui sont d'abord des sciences d'observation, plutôt que d'expérimentation, et parce qu'elles sont toutes deux consacrées à l'étude d'un milieu très grand et difficilement observable (faut-il rappeler que l'océan est opaque aux ondes électromagnétiques ?).

• Les découvertes les plus importantes, affirme Harwit, résultent d'innovations substantielles dans les techniques d'observation.

• Dès qu'une nouvelle technique est appliquée, les découvertes les plus re-

marquables qui lui sont dues sont obtenues en peu de temps.

- Un instrument nouveau épouse rapidement sa capacité de découverte de phénomènes nouveaux.
- Les découvertes sont souvent faites par des chercheurs ayant acquis une formation dans d'autres disciplines.
- Les découvertes sont dues à une combinaison de chance (obtention d'une observation inattendue) et de volonté (décision d'appliquer sa recherche à la compréhension de cette observation).

Les découvertes majeures en géologie marine ont toutes ces mêmes caractéristiques. J'en prendrai comme exemple, l'étude des zones d'accrétion et la découverte de l'hydrothermalisme et des sulfures qui lui sont associés. En 1971, lorsque la décision fut prise d'utiliser les techniques les plus performantes de l'époque (y compris le submersible) pour explorer le Rift océanique au milieu de l'océan Atlantique, on a cherché à obtenir des informations aussi précises que possible sur la structure de cette dépression large de trente kilomètres et longue de plusieurs dizaines de milliers de kilomètres. On s'aperçut très vite que personne n'était capable de dire si les « murs » du Rift se rejoignent à la base ou s'il existe au fond ce qu'on a depuis appelé le plancher interne, une vallée large de plusieurs kilomètres où se produit la mise en place par volcanisme de la nouvelle croûte océanique. Ce n'était pas faute d'avoir étudié le Rift. Depuis vingt ans, les bateaux océanographiques s'acharnaient à le cartographier, à partir de la surface en utilisant les techniques classiques, sondage acoustique et sismique, dragages, photographies ponctuelles et carottages. Mais la résolution des techniques utilisées et la précision de la navigation alors disponibles ne permettaient pas d'obtenir ce genre de réponses.

Les nouvelles techniques

Ce fut le mérite du programme FAMOUS d'inaugurer en 1973, un ensemble de techniques d'exploration beaucoup plus précises, axé sur le submersible et utilisant un positionnement à cinquante mètres près (au lieu de cinq kilomètres). En moins de cinq ans, la poursuite de l'utilisation de ces techniques d'exploration fine conduisait à la découverte des sources hydrothermales, des sulfures et des formes de vie nouvelles qui leur sont associées. L'ampleur du phénomène est désormais établie. Un volume d'eau correspondant à celui de la totalité des océans subit le cycle hydrothermal en un temps géologiquement très court (de l'infiltration dans les fissures, au réchauffement en profondeur, à la dissolution de divers éléments chimiques et enfin à la résurgence sous forme de sources chaudes). On peut maintenant ranger au rayon des curiosités, ce qui avait été écrit sur le bilan géochimique des océans, la distribution des ressources minérales à grande profondeur et sans doute aussi sur l'origine de la vie ! Le programme de recherches « hydrothermalisme » mené par le CNEXO doit d'ici 1985 analyser ces phénomènes nouvellement découverts. Mais ne peut-on espérer qu'il sera, comme le programme nodules polymétalliques avec lequel il partage déjà la possibilité d'implications industrielles éventuelles, l'occasion de la mise au point de nouvelles techniques et donc de découvertes inattendues ? Ainsi, lorsque l'on a pour la première fois envisagé l'exploitation des nodules polymétalliques, on comparait le fond du Pacifique à un immense champ sur lequel on pourrait traîner dragues ou pompes sucreuses sans se préoccuper du relief. Les techniques d'exploration fine ont révélé un relief complexe, haché d'accidents d'ampleur considérable, ce qui n'est guère surprenant a posteriori puisqu'il

□ Xavier Le Pichon, professeur à l'université de Paris VI, travaille au Laboratoire de géologie structurale (LA 215).

s'agit d'un relief fabriqué à l'axe du Rift.

Une partie des nouvelles techniques utilisées à une limite d'utilisation voisine de 3 000 mètres, ce qui permet d'explorer 25 % du fond des océans. Passer à 6 000 mètres comme il est prévu avec le submersible en construction, met à notre portée 98,6 % des océans. Mais le submersible lui-même n'est qu'un élément dans une panoplie de technologies extrêmement mouvantes et qui s'appuie sur deux pôles. Le premier pôle correspond aux progrès récents dans notre capacité de traiter les signaux acoustiques. Ne pouvant utiliser les ondes électro-magnétiques absorbées par l'eau, il faut bien en effet se servir des ondes sonores. Ces progrès ont été à l'origine du Sea-Beam : le sondeur multifaisceaux à pinceaux étroits qui a révolutionné le sondage. Mais déjà, la seconde génération d'instruments apparaît capable d'analyser de beaucoup plus grandes quantités d'informations acoustiques pour en déduire la structure et la texture du fond sur des surfaces beaucoup plus grandes. Ce sont les sonars latéraux remorqués en surface ou en profondeur. Le second pôle correspond à la capacité qu'a l'homme désormais de déployer des systèmes qui peuvent observer, ma-

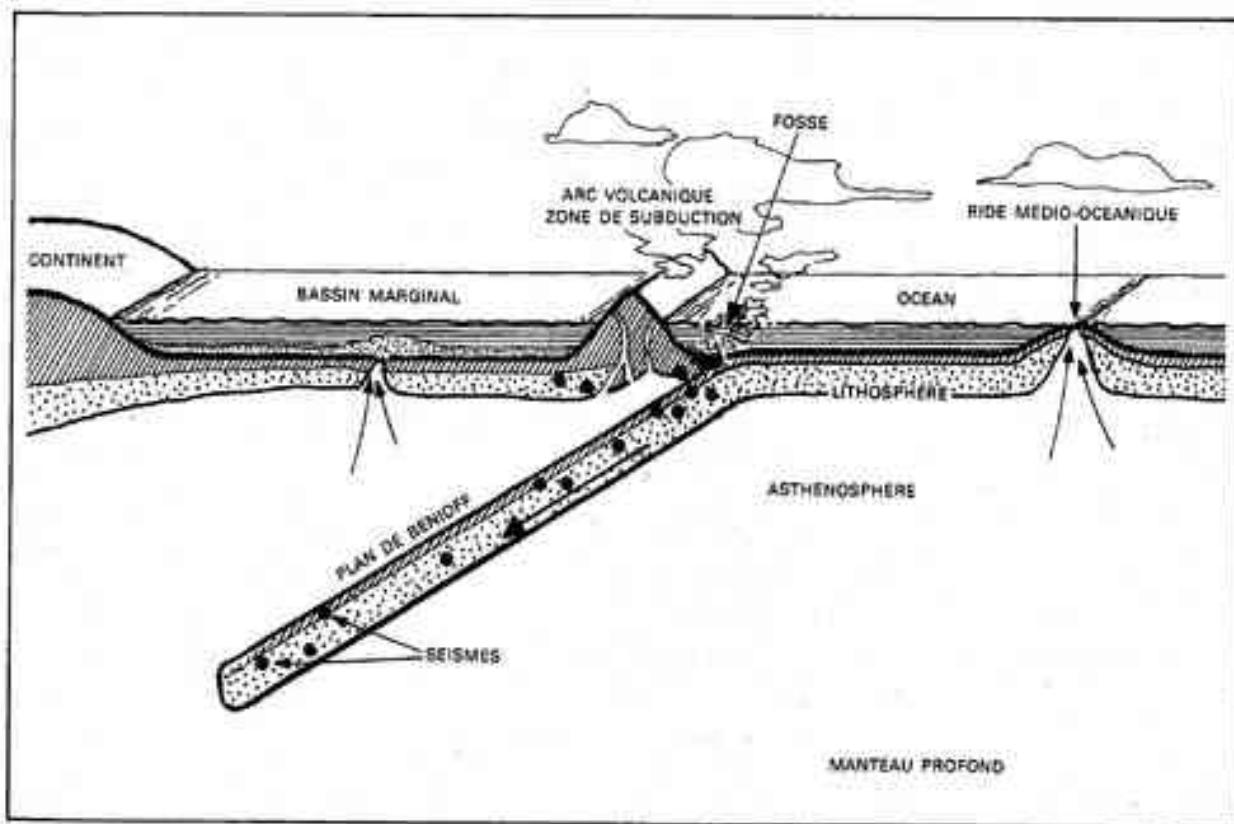
nipuler, échantillonner avec précision et, éventuellement, sur de grands volumes à grande profondeur, soit directement, soit indirectement. Appartient à ces systèmes : le submersible qui, de plus en plus, est capable d'opérations complexes ; les engins inhabités d'observation ou de prélèvement, remorqués ou autonomes ; et enfin le forage, seul capable d'échantillonner la troisième dimension.

Il n'est pas possible ici d'analyser l'ensemble de ces nouvelles technologies. J'en citerai quelques-unes à titre d'exemple. Le submersible a maintenant une possibilité accrue de travailler en profondeur, grâce à un système de navettes autonomes avec la surface, apportant des instruments ou rapportant des échantillons. Des engins inhabités permettent l'exploration photographique systématique, ce qui a conduit au repérage rapide des événements de sources hydrothermales. Dans le forage, le carottage hydraulique qui préserve la structure fine des sédiments a révolutionné l'étude des sédiments meubles.

Grâce à une politique ouverte, la France est en pointe dans un certain nombre de ces technologies nouvelles. C'est vrai pour le submersible ; ça l'est

dans une moindre mesure pour les engins inhabités ; elle fut le premier pays à posséder un Sea-Beam à usage civil. Mais ne faut-il pas se poser la question de l'emploi qui a été fait de ces technologies ? Nous avons par exemple été les premiers à avoir le Sea-Beam. L'avance de deux années que l'on possédait a-t-elle été correctement utilisée ? Était-il justifié d'attendre six ans (1984) pour un programme d'exploration globale renonçant ainsi à profiter de notre situation de monopole ? Faut-il maintenant s'attacher à obtenir un second Sea-Beam plutôt qu'à développer une technologie nouvelle de type sonar latéral, telle qu'elle apparaît à l'heure actuelle aux Etats-Unis ?

L'exploration du fond des océans attire de plus en plus les géologues, géochimistes et géophysiciens, formés à d'autres techniques sur la terre émergée. La participation de la France au programme de forage international IPOD a joué dans ce sens un rôle fondamental. La fertilisation entre disciplines dont parle Harwit est donc en cours. Songe-t-on à l'utiliser vraiment ? Fait-on dans le domaine de l'utilisation du forage et des techniques d'exploration sismique qui lui sont liées un effort suffisant d'innovation et de participation ?



Formation et subduction de la lithosphère : les deux extrémités du « tapis roulant » océanique.

Quels domaines de l'océan doit-on explorer ?

On pourrait, à partir des remarques de Harwit, se livrer à une réflexion approfondie beaucoup plus large qui serait certainement bénéfique. Dans ce qui précède, j'ai abordé la réponse à la question « Quelle sont les innovations substantielles que l'on peut attendre dans les techniques d'exploration du fond des océans ? ». Mais cette question entraîne nécessairement, étant donnée l'immensité de l'océan, la question suivante : « Quel domaine de l'océan doit-on explorer en priorité avec ces nouvelles techniques ? ».

A la suite du programme IPOD, et avec la communauté scientifique japonaise, nous avons pensé qu'un objectif prioritaire devait être l'étude des manifestations superficielles de la subduction. La subduction est le phénomène qui permet aux plaques lithosphériques océaniques, créées le long du Rift de plonger au sein du manteau pour s'y réchauffer et perdre leur identité. C'est ainsi que chaque année, un volume de lithosphère de 300 km³ disparaît dans les zones de subduction, volume évidemment égal à celui de la lithosphère produite par accrétion à l'axe des dorsales. Le circuit lithosphérique, du Rift au fossé de subduction, entraîne le recyclage d'un volume égal à la totalité du manteau supérieur en un milliard d'années. Mais si la sismicité et le volcanisme, liés à la subduction, ne permettent pas de douter du fait qu'il s'agit du phénomène énergétique majeur à la surface de la terre, il faut bien dire qu'on se trouve aujourd'hui vis-à-vis de la subduction, dans la position même où l'on se trouvait vis-à-vis de l'accrétion, il y a dix ans, au début de l'opération FAMOUS. Ce n'est certes pas faute d'études ni d'efforts. Mais les 32 000 kilomètres de fossé océanique sont situés à très grande profondeur ; l'étude des phénomènes qui les affectent exige une résolution qui ne possède pas les technologies utilisées jusqu'à présent. C'est ainsi qu'à la différence de l'accrétion qui crée une nouvelle surface qui peut ensuite être étudiée à loisir, la subduction fait disparaître de la surface. C'est chercher à démontrer qu'il y a eu crime sans pouvoir retrouver le cadavre ! Il faut donc s'attacher à trouver des témoins de la disparition.

Ces témoins, on sait qu'ils existent. Le programme HEAT d'études de la zone de subduction hélienne, en Méditerranée orientale, programme utili-

sant conjointement le Seabeam et le submersible Cyana, capable de plonger à 3 000 mètres, l'a confirmé. Toutefois, l'effort restait modeste : il ne concernait qu'une zone de subduction qui doit à son caractère anormal sa profondeur très limitée. Quelques observations essentielles sur le phénomène dynamique principal de notre planète, ont été acquises. L'on est encore très loin de pouvoir véritablement caractériser le phénomène subduction. Mais on peut prédire sans grand risque d'erreur que l'application de technologies nouvelles à ce domaine encore incompris et peu exploré amènera nécessairement des découvertes fondamentales pour la compréhension de la dynamique de la terre.

Il est important de se poser sans cesse les deux questions : « Quelles technologies nouvelles ? », « Pour explorer quels domaines ? ». L'océanographie géologique a amorcé une mutation technologique qui coïncide avec l'apparition de pré-

occupations industrielles dans le domaine profond. L'époque des découvertes est devant nous. La France est bien placée technologiquement et scientifiquement. Mais il faut prendre garde que la technologie de pointe évolue vite. Et le choix des zones d'exploration est critique. Le programme hydrothermalisme correspond à une orientation majeure où la phase d'analyse, après la découverte initiale, devient importante sans exclure la possibilité de découverte de phénomènes nouveaux. Le programme subduction devrait d'abord être un programme de découvertes où apparaîtront des phénomènes encore inconnus.

BIBLIOGRAPHIE

- Martin Harwit, « Cosmic discovery : the search, scope and heritage of astronomy », *The Harvester Press*, 334 p., 1981.
Xavier Le Pichon, *La Recherche*, 11, 273-282, 1980.
Anonyme, *La Recherche*, 13, 756, 1982.

LE PROGRAMME JASP : UNE ETUDE FRANCO-JAPONAISE DE LA SUBDUCTION JAPONAISE

L'étude de la subduction ne fait que commencer et le projet HEAT (HEllenic Arc and Trench studies) a montré tout l'intérêt de la combinaison de l'analyse morphologique détaillée des fosses et de l'observation directe et de l'échantillonnage par submersible.

Les fosses du Japon se prêtent très bien à ce type d'étude. Modèle exemplaire de zone de subduction, elles ont fait l'objet de nombreux travaux de la part des scientifiques japonais. Leur arrière-pays est bien connu et l'on y dispose en outre des données récentes obtenues lors des campagnes du programme international du « Deep Sea Drilling Project » auxquelles des scientifiques français ont participé.

Le programme franco-japonais JASP (JApan Subduction Programm), dont le CNRS, sur le plan français, assure la direction scientifique et le CNEXO la mise en œuvre des moyens à la mer, consiste en deux opérations principales qui se dérouleront en 1984 et 1985 en utilisant des technologies de pointe que maîtrise la France dans le domaine de l'exploration et de l'intervention sous-marine.

Durant la première campagne (deux mois, été 1984), le navire océanographique Jean Charcot équipé du sondeur à faisceaux étroits Sea Beam procédera à un lever morphologique détaillé des fosses au large du Japon qui permettra d'interpréter les déformations liées au processus de subduction et la définition des zones où se feront les plongées.

Locs de la deuxième campagne (deux mois, été 1985), il est prévu une trentaine de plongées sur les sites choisis, grâce au lever Sea Beam, en utilisant pour la première fois de manière systématique le SM 97. La capacité de ce submersible d'atteindre jusqu'à 6 000 m de profondeur permettra d'étudier l'axe et les flancs des fosses japonaises dans des secteurs-clés. Pendant les plongées, il sera procédé à l'observation directe des déformations sur le fond, à l'échantillonnage des roches affleurant, au lever de cartes détaillées et à des mesures géophysiques.

Une commission mixte a longuement étudié, depuis 1980, les aspects scientifiques, techniques et financiers de ce projet et conclu à sa faisabilité. Son coût total et les responsabilités scientifiques seraient entièrement partagés entre les deux nations.

Un accord de principe sur la réalisation de JASP a été conclu entre les ministres compétents lors du voyage du Président de la République au Japon.

Outre ses retombées technologiques et scientifiques évidentes, ce projet, par le tissu dense d'échanges, de collaborations et de travaux en commun qu'il implique devrait déboucher sur un renforcement considérable de la coopération scientifique franco-japonaise.

Les interactions océan-atmosphère à grande échelle et le climat

A l'interface du système océan-atmosphère, l'énergie s'échange sous plusieurs formes, à diverses échelles et selon un enchaînement complexe de phénomènes physiques.

Jacques MERLE

Ce climat est une préoccupation récente mais pressante pour l'humanité. Trop de choses en dépendent : la capacité de satisfaire des besoins alimentaires croissants ; la nécessité de planifier plus rigoureusement les équilibres économiques qui dépendent, pour beaucoup, des facteurs agricoles et climatiques ; les craintes de créer des déséquilibres irréversibles par une activité industrielle mal contrôlée (l'accroissement continu du taux de gaz carbonique dans l'atmosphère en est une manifestation). Toutes ces raisons ont conduit les nations développées à mettre sur pied récemment des programmes d'étude du climat. L'objectif général est d'arriver à une connaissance suffisante des mécanismes physiques du climat, pour pouvoir envisager d'en prévoir les fluctuations.

Il est rapidement apparu, et c'est une notion que les manuels de géographie élémentaire enseignaient depuis le XIX^e siècle, que l'océan devait jouer un rôle important dans l'établissement et la variabilité du climat. Il a fallu cependant attendre les années 1970 pour que les estimations quantitatives du rôle de l'océan sur le climat soient présentées. Oort et Vonder Haar, chercheurs météorologues de l'université de Princeton et de l'université d'Etat du Colorado et auteurs d'un travail retentissant, montrèrent que l'océan transportait globalement autant de chaleur que l'atmosphère depuis les basses latitudes de la planète où cette chaleur est

reçue en excès jusqu'aux moyennes et hautes latitudes ou au contraire, elle est déficiente (fig. 1). Ce résultat relance l'intérêt de l'océanographie physique dans l'étude du climat et donne une priorité incontestable aux études d'interaction océan-atmosphère à grandes échelles. Dans le passé, en effet, les modèles de circulation générale atmosphérique qui permettent de faire la prévision météorologique, ne considéraient l'océan que comme un plancher inerte dont il suffisait de connaître grossièrement la température de surface moyenne.

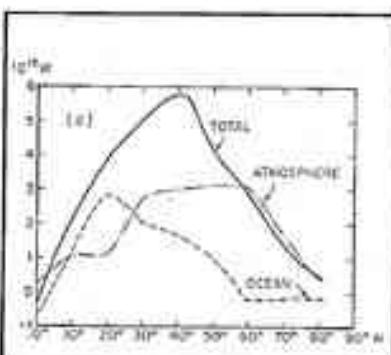


Fig. 1 - Transport méridien de chaleur dans l'hémisphère Nord par l'atmosphère et par l'océan. (D'après Oort et Vonder Haar).

La réhabilitation du rôle de l'océan dans la dynamique de l'atmosphère et du climat tient aussi à trois chiffres qui parlent d'eux-mêmes :

- La capacité calorifique de l'océan est environ 1 200 fois celle de l'atmosphère.
- Le « plancher » de l'atmosphère est en contact avec l'océan pour plus de 72 % de sa surface.
- La dynamique océanique redistribue géographiquement l'énergie thermique des océans suivant des constantes de temps beaucoup plus longues que ne le fait l'atmosphère. Une perturbation océanique peut dans certains cas avoir une durée de vie théorique de plusieurs siècles. Une perturbation atmosphérique au contraire a une durée de vie maximale de deux à trois semaines.

□ Jacques Merle, océanographe physicien, maître de recherche à l'ORSTOM, est coordinateur du programme français océan et climat dans l'Atlantique équatorial (POCAL) et membre du comité scientifique du programme national d'étude de la dynamique du climat (PNEDC) et du « committee on climate change and the ocean » (CCCO), dont dépend l'organisation, à l'échelle internationale, des programmes de recherche climatique associés à l'étude de l'océan.

Le couplage océan-atmosphère

Les chiffres précédents mettent en évidence les trois fonctions essentielles de l'océan dans ses relations avec l'atmosphère. L'océan stocke l'énergie ; l'océan échange cette énergie avec l'atmosphère ; l'océan transporte l'énergie. Mais ces trois fonctions ne sont pas indépendantes ; elles sont liées par la loi de conservation de l'énergie ; ainsi, en un lieu donné de l'océan, toute l'énergie échangée à sa surface est égale à la somme de l'énergie stockée sur place et de l'énergie qui diverge, c'est-à-dire qui est transportée par les courants océaniques. La loi de conservation de l'énergie appliquée ainsi au milieu océanique peut aussi être appliquée à l'ensemble des deux milieux océan et atmosphère. On a alors un système couplé, à l'intérieur duquel l'énergie s'échange à travers l'interface séparant les deux milieux composant le système. Si les apports extérieurs au système sont invariants, c'est le cas en première approximation pour l'énergie qui vient du soleil, on se place dans les conditions simplifiées d'un système interactif autovariant, c'est-à-dire dont les variations internes ne sont pas directement causées par des variations de facteurs extérieurs au système.

L'hypothèse suivant laquelle la variabilité climatique à courte période, de quelques mois à quelques décennies, est avant tout due à l'autovariation du système couplé océan-atmosphère est généralement bien admise. Pour des échelles de temps plus grandes, on ajoute souvent à ce système, la cryosphère, la lithosphère et la biosphère (a) ; ces milieux jouent un rôle non négligeable dans l'équilibre climatique, notamment la cryosphère.

(a) cryosphère : ensemble de la couverture de glace et de neige de la planète.
lithosphère : ensemble des terres émergées.
biosphère : ensemble des organismes vivants, animaux ou végétaux peuplant les mers et les continents.

A l'interface du système océan-atmosphère, l'énergie s'échange sous plusieurs formes (chaleur, mouvement, masse) à diverses échelles et selon un enchaînement complexe de phénomènes physiques. L'étude des processus physiques régissant les échanges, est généralement considérée comme du domaine des interactions océan-atmosphère à petite échelle. Nous considérons ici, surtout le bilan net des échanges et les effets globaux sur chacun des deux milieux des principaux termes de l'échange : c'est le domaine des interactions océan-atmosphère à grande échelle.

Le bilan net de l'échange énergétique à l'interface air-mer peut s'exprimer par la relation simplifiée suivante : $F = Q(1 - \alpha) - I - L - S$ (1)

F : flux d'énergie net entre l'atmosphère et l'océan.

$Q(1 - \alpha)$, radiation nette absorbée par l'océan, dans les courtes longueurs d'onde ; Q représente la radiation directe moins la radiation diffuse ; α , l'albedo de la surface océanique (c'est-à-dire le pourcentage d'énergie réfléchie par la surface relativement à l'énergie incidente) ; I , radiation de l'océan dans les grandes longueurs d'onde (infrarouge) vers l'atmosphère ; L , perte de chaleur latente par évapora-

tion ; S , perte (gain) de chaleur sensible par turbulence ou diffusion moléculaire.

Le terme $Q(1 - \alpha)$ dépend avant tout, de la latitude et de la couverture nuageuse ; I dépend surtout de la température de l'océan (T_s) ; L , fonction de l'évaporation, dépend surtout de la température de l'océan T_s et de la vitesse du vent ; S , qui est en général un terme faible (voisin de $1/10$ de L) dépend surtout de la différence $T_s - T_a$, T_a étant la température de l'air à l'interface. Les deux termes les plus importants, sont la radiation solaire reçue par l'océan : $Q(1 - \alpha)$ et L : l'évaporation ; ce qui privilie les paramètres : latitude, couverture nuageuse, vent, température de l'océan.

Le bilan énergétique net F peut être évalué de deux façons :

– par des méthodes directes, à partir de la mesure des paramètres de l'interface, pour chacun des termes de l'équation (1). Diverses relations empiriques relient ces paramètres et les termes de l'échange. Ces estimations sont très imprécises (de l'ordre de plus ou moins 30 %) ; néanmoins, les résultats obtenus à l'échelle de l'océan mondial par différents auteurs, sont assez concordants (fig. 2) :

– par des méthodes indirectes, comme terme résiduel de l'équation de conservation de l'énergie. Plusieurs auteurs ont récemment exploré cette voie à l'aide des données existantes.

L'un des paramètres les plus importants de l'interaction océan-atmosphère est le vent. L'action locale du vent sur l'océan a fait l'objet d'études très nombreuses. Outre l'agitation qu'il crée à la surface, le vent permet à la fois de faire passer de l'océan vers l'atmosphère, des quantités importantes de chaleur et d'eau, en favorisant l'évaporation et de faire passer de l'atmosphère vers l'océan, l'énergie mécanique qui entraîne la circulation superficielle des océans. Le vent intervient donc fortement à la fois, dans le bilan net de l'échange énergétique à l'interface, dans l'alimentation en eau de l'atmosphère et dans le transport de masse et de chaleur de l'océan.

L'action mécanique du vent et l'échange énergétique à l'interface, sont donc les deux contraintes (forcing en anglais) locales, non indépendantes, de l'atmosphère sur l'océan.

Mais si l'action locale de l'atmosphère sur l'océan ne surprend pas, c'est seulement récemment que des phénomènes plus curieux ont été mis en évidence qui révèlent en certaines régions, une sensibilité particulière de l'océan à des actions lointaines de l'atmosphère et inversement des réponses atmosphériques lointaines à des conditions océaniques superficielles particulières.

Téléconnexions et théories des actions lointaines

Le terme « téléconnection » est utilisé depuis quelques dizaines d'années en météorologie et en climatologie, pour désigner des corrélations statistiques observées entre des paramètres climatologiques de l'interface océan-atmosphère, appartenant à des régions très éloignées les unes des autres, sans qu'un enchaînement clair de cause à effet, puisse toujours être invoqué. La plus ancienne et la plus connue des téléconnexions est la « southern oscillation », qui est une corrélation négative entre la pression atmosphérique superficielle de la région située au nord de l'Australie et la pression atmosphérique de la région située aux environs de l'île de Pâques. Lorsque la pression atmosphérique est plus basse que la moyenne pendant plusieurs mois, sur le nord de l'Australie, elle est, au contraire plus élevée que sa moyenne à 10 000 kilomètres de là, dans l'océan Pacifique central. Le coefficient de corrélation est supérieur à



Fig. 2 – Bilan énergétique annuel moyen en W/m^2 à la surface de l'océan Atlantique (obtenu par Bunker). Dans la région du Gulf Stream, l'océan cède à l'atmosphère des quantités considérables d'énergie.

0,6. Ces oscillations corrélées de la pression atmosphérique sont associées à des variations de la température de surface de l'océan, dans la région située plus à l'est, au large des côtes du Pérou et le long de l'équateur. Parallèlement, l'intensité des pluies sur le Pacifique central est également corrélée, à la fois avec les oscillations de pression de la « southern oscillation », et avec les variations de températures de surface de l'océan Pacifique équatorial Est (fig. 3-4).

Comment la température de surface de l'océan Pacifique oriental peut-elle être étroitement corrélée à la pression atmosphérique superficielle de la région, située à l'autre extrémité de cet océan, alors que la corrélation locale entre ces deux paramètres est au contraire faible ?

Lorsque la température de surface de l'océan au large du Pérou est anormalement élevée, ce qui entraîne une chute brutale de la productivité biologique de ces eaux et une situation très défavorable pour la pêche locale, on dénonce le phénomène « El Niño » (voir encart et fig. 5), comme responsable de cette catastrophe biologique. La cause d'« El Niño » a été recherchée, en s'aidant des corrélations existantes entre ce phénomène et les paramètres climatologiques, comme la pression et le vent, des régions lointaines situées à l'autre extrémité de l'océan Pacifique. Une explication physique d'« El Niño » fut proposée par Wyrtki, en 1976, et confirmée plus tard par une simulation numérique. C'était la première théorie faisant intervenir la dynamique océanique, pour expliquer des actions lointaines de l'atmosphère sur l'océan (fig. 6). Une augmentation prolongée de la force d'entraînement des vents alizés du Sud-Est, soufflant pendant plus de dix-huit mois, amène une accumulation d'eau chaude dans le Pacifique Ouest,

une élévation du niveau de la mer, un approfondissement de la thermocline. Dès que ces vents tombent, l'eau accumulée a tendance à s'écouler en retour vers le Pacifique Est. Le modèle numérique a montré que l'affaiblissement soudain des vents, amène l'apparition d'une onde interne de longue période, appelée onde de Kelvin, qui se déplace vers l'Est, le long de l'équateur, et provoque un enfouissement de la thermocline, près de la bordure orientale de

l'océan. Cet abaissement de la thermocline appelle un envahissement de la région par des eaux superficielles chaudes. La « courroie de transmission » de la téléconnexion est donc ici l'océan équatorial.

Mais les choses sont encore plus complexes, car on observe une rétroaction de l'anomalie de température de surface, ainsi créée, sur l'atmosphère. Cette rétroaction a d'ailleurs également un double effet : local et

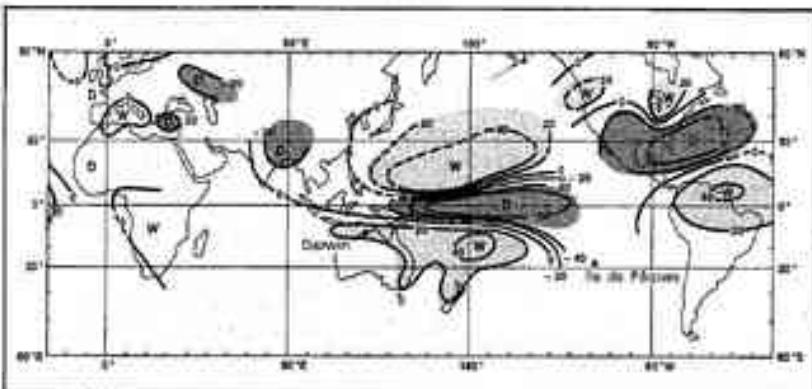


Fig. 4 - Coefficient de corrélation (multiplié par 100) entre la quantité de pluie et les valeurs successives de l'index de la « Southern oscillation » (voir fig. 3). Lorsque l'index est élevé, on est dans une situation précédant « El Niño » ; les températures de surface au large du Pérou sont relativement froides ; il y a déficit de pluie dans l'océan Pacifique équatorial central et Ouest, et dans la région des Caraïbes. C'est évidemment l'inverse, lorsque l'index de la « Southern oscillation » est faible (situation de type El Niño).

* Les pêcheurs sud-américains connaissent le phénomène d'« El Niño » depuis des siècles. Il consiste en un faible courant côtier qui, à l'époque de Noël, circule en direction du Sud, le long des côtes de la République équatorienne. Il tire son nom de la tête de Noël parce qu'en espagnol « El Niño » veut dire l'enfant et plus particulièrement l'enfant Jésus. Ce courant transporte vers le Sud, des eaux chaudes tropicales venant des régions au Nord de l'équateur. Certaines années, ce flux d'eau semble anormalement fort et les pêcheurs constatent alors que les poissons disparaissent et que les oiseaux de mer succombent en grand nombre, faute de nourriture.

Ces eaux anormalement chaudes s'étendent loin au Sud, le long des côtes du Pérou, où les eaux, même en été, sont habituellement froides en raison de remontées d'eau profonde (upwellings). Cet événement est accompagné de pluies torrentielles sur les régions côtières au Nord du Pérou qui sont ordinairement extrêmement sèches. Les scientifiques qui étudiaient le phénomène parlaient des apparitions catastrophiques d'« El Niño », en raison de ses conséquences sur la vie marine et pour la population. Bientôt, l'adjectif « catastrophique » fut omis et l'expression « El Niño » désigne maintenant à elle seule cet événement catastrophique. (Description du phénomène « El Niño » empruntée à un article de Wyrtki - La Recherche n° 106, p. 1212).

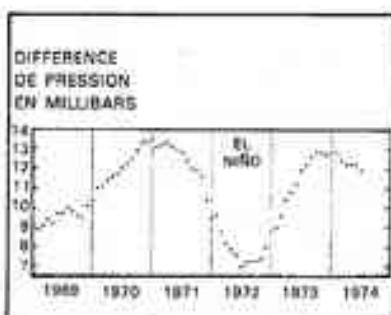


Fig. 3 - Valeurs successives de l'index de la « Southern oscillation » entre 1969 et 1974. Cet index se définit par la différence de pression entre Darwin en Australie et l'île de Pâques. Lorsque le phénomène « El Niño » s'établit, l'index est à son minimum comme ce fut le cas en 1972.

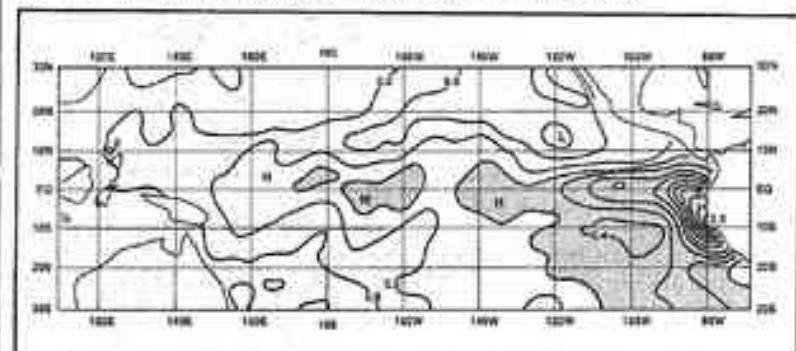


Fig. 5 - Anomalies (ou différences par rapport à la moyenne) des températures de surface de l'océan Pacifique caractéristiques du phénomène « El Niño ».

lointain. Localement, les eaux chaudes superficielles ont pour effet de favoriser l'évaporation et donc d'intensifier les pluies. On observe également une action lointaine de cette anomalie de température de surface sur l'atmosphère : le champ des vents alizés est perturbé sur l'ensemble du Pacifique central et occidental ; les alizés faiblissent et même changent de sens, ce qui a pour effet d'accentuer encore les conditions de développement d'un El Niño ; cette rétroaction est positive : le phénomène s'auto-entretenir. Cependant, de nouvelles conditions océaniques s'établissent dans le Pacifique Ouest : abaissement de la pente de la surface océanique et relèvement de la thermocline, qui permettront le retour à une situation normale.

Les effets de cette énorme oscillation affectant l'ensemble de l'océan Pacifique tropical, c'est-à-dire, le long de la moitié du grand cercle équatorial de la

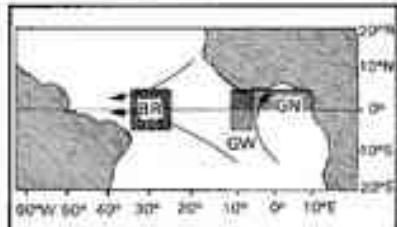


Fig. 8a - Situation des aires étudiées dans l'océan Atlantique. Les grises représentent les zones de fortes densités d'observations le long des principales routes de navigation. Les flèches schématisent le régime des vents.

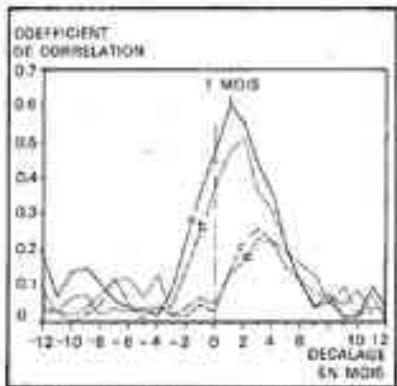


Fig. 8b - Corrélation avec décalage temporel entre : courbe a : l'anomalie de la composante zonale de la tension du vent dans la zone « BR » avec l'anomalie de la température de surface de la zone « GW » ; courbe b : l'anomalie de la composante zonale de la tension du vent dans la zone « BR » avec l'anomalie de la température de surface dans la zone « GN » ; courbe c : l'anomalie de la composante zonale de la tension du vent dans la zone « GW » avec l'anomalie de la température de surface de la zone « GW » ; courbe d : l'anomalie de la composante méridienne du vent dans la zone « GW » avec l'anomalie de la température de surface de la zone « GW ».

terre, s'étendent au-delà des régions tropicales. Des résultats très récents, montrent que les champs de pression de l'ensemble des moyennes et hautes latitudes, sont affectés par les anomalies de température de surface des basses latitudes de l'océan Pacifique, pendant et après le passage du phénomène « El Niño » (fig. 7).

L'océan Pacifique tropical n'est pas le seul à avoir permis l'observation d'interactions lointaines, entre océan et atmosphère. Dans l'océan Atlantique aussi, la réponse de l'océan équatorial oriental est plus dépendante de l'action

des vents lointains que de l'action des vents locaux (fig. 8). Un décalage temporel, d'environ un mois, entre la variation du vent dans le bassin Atlantique ouest (côté Brésil) et la variation de la température de surface, dans le bassin oriental (côté Afrique), suggère un mécanisme conforme à celui imaginé par Wyrtki, pour l'océan Pacifique.

Un pari : observer et comprendre l'océan pour prévoir le climat

Bien que l'océan et l'atmosphère soient étroitement couplés, l'océan possède une « mémoire » potentielle des perturbations qui l'affectent, beaucoup plus longue que l'atmosphère. La durée de vie maximum d'une perturbation atmosphérique est de trois semaines environ ; au contraire, l'océan peut théoriquement mémoriser des anomalies pendant plusieurs siècles, ce qui correspond au temps de résidence maximal des eaux profondes océaniques, depuis le moment où elles ont acquis leur caractéristique à la surface jusqu'au moment où elles réapparaissent à la surface après avoir parcouru les profondeurs océaniques. Plusieurs siècles sont un maximum théorique qui ne tient pas compte du taux de mélange et de la diffusion turbulente des propriétés de ces eaux, au cours de leur cheminement profond. Il est donc vraisemblable qu'on ne puisse détecter des perturbations océaniques qui soient mémorisées pendant un temps aussi long. Les observations disponibles montrent en fait clairement, une persistance des anomalies de température de surface s'étendant sur plusieurs mois et même plusieurs années.

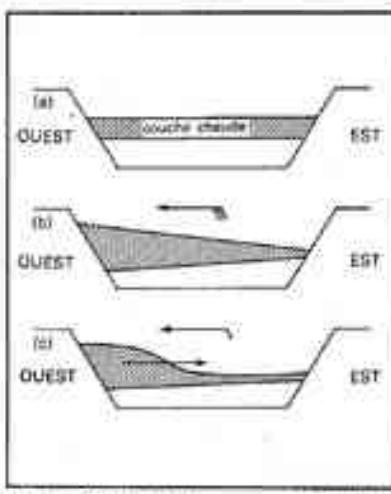


Fig. 6 - Schématisation en coupe de la réponse océanique à l'action atmosphérique dans un plan équatorial. - a) hypothèse de l'absence complète d'alizés : le niveau marin épouse le plan du géoïde ; la couche chaude est régulièrement répartie. - b) alizés forts : le niveau marin tend vers un équilibre comportant une pente ascendante Est-Ouest ; la couche chaude s'amincit vers l'Est, s'épaissit vers l'Ouest. - c) alizés faibles : le niveau marin tend vers l'équilibre du plan géoïde ; une onde et une advection compensatrice se développent, dirigée vers l'Est.

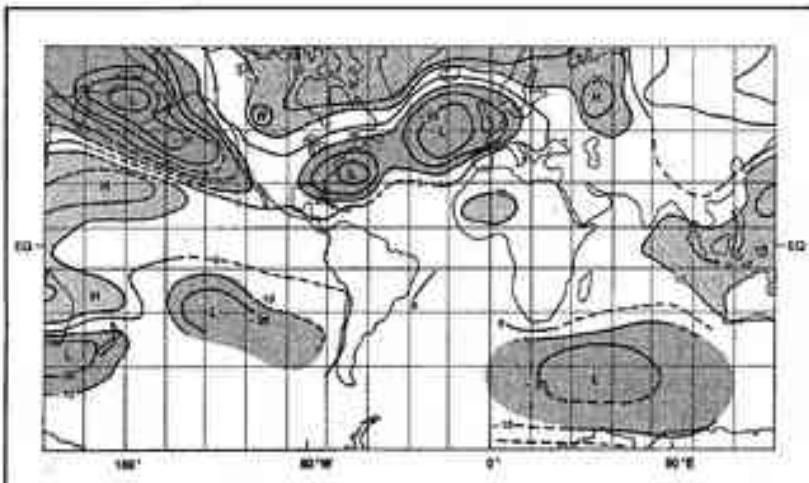


Fig. 7 - Anomalie d'altitude de la surface correspondant à la pression de 850 millibars pendant les années d'« El Niño » (voir fig. 5). La pression atmosphérique augmente considérablement sur le Pacifique Nord et sur l'Atlantique Nord.

Si les modèles de circulation générale atmosphérique, servant à la prévision météorologique à quelques jours, sont avant tout dépendants des « conditions initiales », au contraire, les futurs modèles de prévision climatique à l'échelle de quelques semaines à quelques dizaines d'années, devront avant tout, tenir compte des « conditions aux limites » et particulièrement des « conditions aux limites » océaniques ; c'est-à-dire des conditions océaniques de surface (fig. 9). Dès lors, l'observation et la prévision des conditions océaniques de surface (ce qui suppose une connaissance physique suffisante de la dynamique océanique pour avoir un bon modèle de prévision des températures de surface), de même que l'étude du couplage physique océan-atmosphère sont des actions prioritaires pour pouvoir prévoir la variabilité climatique à court terme (quelques mois à quelques dizaines d'années).

Observer l'océan a été le premier souci des océanographes et des météorologues. Les plus anciennes observations de la température de surface de l'océan, archivées et encore utilisées aujourd'hui, datent du milieu du XIX^e siècle. L'ensemble de ces observations passées, appelées « données historiques », a fait l'objet, ces dernières années, d'une étude intensive ; les données historiques sont en effet porteuses d'une information très précieuse, sur les variations passées des conditions océaniques. Ce sont ces données qui permettent aujourd'hui de faire des études diagnostiques du milieu océanique,

à partir desquelles sont bâties nos connaissances sur la dynamique interne de l'océan, sa réponse à l'action de l'atmosphère, et son action sur l'atmosphère. Ces études diagnostiques sont d'ailleurs également porteuses d'une possibilité de prévision climatique. Ainsi les relations statistiques, existant entre les anomalies de température de surface, de certaines régions tropicales et les pluies sur les continents voisins quelques mois plus tard, permettent une prévision, certes empirique et peu précise, mais déjà très utile dans des régions où le déficit (ou l'excès) en eau, peut être catastrophique. Les premières tentatives faites dans ce sens, très récemment dans l'océan Indien pour la mousson, et dans l'océan Atlantique tropical pour le Nord-Est Brésilien sont très prometteuses.

Mais les observations océaniques passées sont très inégalement réparties dans l'espace et dans le temps, et très insuffisantes : ces données ne permettent pas, ou, seulement très exceptionnellement, d'obtenir un champ synoptique d'observations sur une grande étendue océanique. L'observation systématique, continue et à une grande échelle (monitoring en anglais) est une nécessité future, à la fois pour améliorer la prévision météorologique à court terme, mais aussi pour fournir les « conditions aux limites », nécessaires aux modèles climatiques. L'outil le plus porteur d'espérance pour l'observation systématique de l'océan, au moins en ce qui concerne sa surface, est le satellite. Les satellites existants fournissent déjà des champs de tempé-

ture de surface de l'océan, avec une résolution spatio-temporelle de quelques dizaines de kilomètres et quelques jours, et une précision absolue qui s'améliore de mois en mois et est aujourd'hui comprise entre le demi-degré et le degré centigrade. Les satellites actuels permettent aussi d'évaluer avec une précision raisonnable, le bilan radiatif à l'interface air-mer. Les satellites projetés pour la deuxième moitié de la décennie laissent espérer l'accès, avec une précision et une résolution suffisantes, à la connaissance du champ de vent et de la topographie absolue de la surface de l'océan. La mesure de la topographie de la surface de l'océan permettra de connaître en temps réel, l'agitation de l'océan, ce qui est une donnée importante (ne serait-ce que pour la navigation), mais surtout permettra d'obtenir une « photographie instantanée » de la circulation générale de la surface de l'océan et de son contenu thermique.

Les satellites ne sont pas les seuls outils de l'avenir pour la prévision climatique, d'autres techniques d'observation de l'océan à grande échelle se développent : la tomographie est une méthode acoustique, utilisant un ensemble d'émetteur et de récepteur, quadrillant un domaine océanique étendu en mesurant le temps de propagation des ondes sonores, ce qui permet d'obtenir le champ de densité intégré de l'intérieur de l'océan. Différents types de flotteurs de surface et de subsurface mesureront aussi les champs de température ou de densité, et traceront la circulation océanique.

De grands projets internationaux comme le « world ocean circulation experiment » dépendant du « world climate research program » sont mis sur pied en ce moment même, par la communauté scientifique internationale pour l'étude du climat. La France participe en première ligne à cet effort. Le programme national d'étude de la dynamique du climat (PNEDC), piloté par le CNRS, rassemble les compétences et les moyens de près de deux cents chercheurs appartenant à plusieurs organismes de recherche français dont le CNRS, le Centre national d'études spatiales, le Centre national pour l'exploitation des océans, la Météorologie, l'Office de la recherche scientifique et technique d'Outre-Mer, les Terres australes et antarctiques françaises. L'objectif ambitieux de cette impressionnante mobilisation est de pouvoir comprendre et si possible, prévoir l'évolution de notre environnement climatique à l'aube du XXI^e siècle.

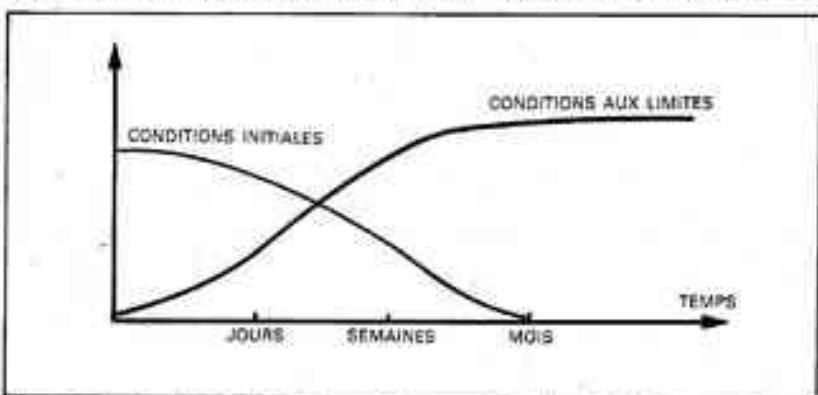


Fig. 9 - Taux de dépendance de l'atmosphère aux « conditions initiales » et aux « conditions aux limites », au cours de son évolution dans le temps. La variabilité climatique est une composition de la variabilité du temps (ou variabilité météorologique), qui dépend avant tout des « conditions initiales » et qui ne peut être prédite au-delà d'une semaine, et d'une variabilité à beaucoup plus long terme, qui dépend des « conditions aux limites ». Le schéma montre l'importance comparée des « conditions initiales » et des « conditions aux limites » en fonction du temps. On voit qu'au-delà d'une semaine, le système atmosphérique dépend plus des « conditions aux limites » que des « conditions initiales » qu'il a presque déjà totalement « oublié ». Les « conditions initiales » représentent l'état atmosphérique de départ du système atmosphérique. C'est par exemple le temps, tel jour à telle heure, à partir duquel on fera une prévision météorologique. Les « conditions aux limites », ce sont l'ensemble des conditions extérieures qui « forcent » l'atmosphère. Par exemple, la température de surface de l'océan.

L'évolution paléoclimatique de l'océan mondial

Jean-Claude DUPLESSY

Le climat de notre globe varie à toutes les échelles de temps. Depuis sept millénaires, les régions industrialisées (Etats-Unis, Europe) bénéficient de conditions tempérées très favorables, mais qui sont exceptionnelles si l'on considère l'évolution climatique des 100 000 dernières années. A plus long terme, au cours du dernier million d'années, un climat comparable à celui d'aujourd'hui n'a prévalu que pendant de brefs intervalles, de durée inférieure à dix mille ans et réapparaissant tous les cent mille ans environ. Pendant le reste du temps, les hautes latitudes de l'hémisphère nord étaient recouvertes de glace et les continents beaucoup plus froids. Une large part de l'Europe septentrionale, si elle n'était pas noyée sous les glaces, était constituée d'un désert polaire où des populations aussi denses que celles d'aujourd'hui ne pourraient subsister.

Les températures de l'océan il y a 18 000 ans

La compréhension de l'évolution de notre climat est donc un thème d'un très grand intérêt. Pour décortiquer le mécanisme de cette machine thermique complexe que constitue le système océan-atmosphère chauffé par le soleil, les dynamiciens ont développé des modèles de circulation générale de l'atmosphère qui simulent le climat actuel et calculant, avec une précision de 1°C, la température des eaux de surface de l'océan mondial. Afin de comprendre le climat régnant au cours des périodes plus anciennes, serait-il possible de reconstituer les paléotempératures océaniques superficielles avec une précision com-

parable ? Tel était le défi lancé, il y a à peine douze ans aux paléoclimatologues. Ce défi a été relevé dans le cadre du programme international CLIMAP, faisant collaborer des physiciens, des statisticiens, des géochimistes et des micropaléontologues. L'utilisation couplée des variations de la composition isotopique des foraminifères fossiles et des fonctions de transfert, liant la composition des faunes actuelles ou fossiles à la température de l'océan, a permis de reconstituer avec une précision de 1,5°C, le champ de température en surface de l'océan mondial pour les conditions d'été et d'hiver, lors du dernier maximum glaciaire datant de 18 000 ans.

La reconstitution du cycle hydrologique en climat glaciaire

Cette étape étant franchie, il restait à reconstituer d'autres caractéristiques du climat glaciaire (cycle hydrologique, vents, température à la surface des continents, etc...), afin de comparer les simulations des dynamiciens de l'atmosphère avec ce qui s'était réellement passé. Ce problème est l'un des axes de recherche en paléoclimatologie, dans le cadre du Programme national d'étude de la dynamique du climat, action concertée du CNRS et de la DGRST. Un exemple de ce type d'études est celui des variations de l'intensité de la mousson : le renversement saisonnier des vents de mousson constitue de nos jours, l'un des aspects les plus importants de la circulation générale de l'atmosphère. En été, le continent asiatique surchauffé est siège de basses pressions qui attirent l'air océanique, amenant d'abondantes précipitations qui sont à la base de l'agriculture du Sud-Est asiatique. En hiver, au contraire, l'océan est plus chaud que le continent, ce qui déclenche une circulation de vents du Nord-Est. Les pluies de mousson sont collectées par les rivières du Sud-Est asiatique qui se déversent en Baie du Bengale de sorte que, de nos

jours, il existe un fort contraste de salinité entre les deux bassins du Nord de l'océan Indien, la mer d'Arabie et la Baie du Bengale (fig. 1a). Les pluies étant constituées d'eau pauvre en oxygène - 18 (un isotope lourd de l'oxygène), les faibles salinités de la Baie du Bengale sont étroitement corrélées à de faibles teneurs en ^{18}O , lesquelles sont intégralement répercutees dans la composition isotopique des tests de foraminifères fossiles que l'on retrouve en surface des sédiments (fig. 1b). En étudiant les sédiments déposés lors du dernier maximum glaciaire, il devient alors possible de dresser la carte des teneurs en ^{18}O des foraminifères fossiles ayant vécu à cette époque dans le Nord de l'océan Indien et donc de remonter aux salinités des eaux de surface de cette zone (fig. 1c). Alors que la température des eaux avait peu varié, les conditions hydrologiques sont notablement différentes de celles d'aujourd'hui. Les eaux à très faible salinité de la Baie du Bengale ont alors disparu à cause du faible débit des rivières du Sud-Est asiatique, en réponse à une réduction drastique des précipitations continentales. Seules subsiste une nappe d'eau de salinité moyenne témoignant d'apports d'eau douce très limités. La forme de cette nappe, montre un renforcement de la mousson d'hiver pendant laquelle soufflent de forts vents secs du Nord-Est dont la présence a pu être mise en évidence par l'existence de pollens caractéristiques des steppes qui couvrent l'Iran à cette époque. Paradoxalement, à côté de continents arides, c'est sur l'océan au sud de 10°N que les mesures isotopiques montrent des pluies plus abondantes qu'aujourd'hui.

Comment change-t-on de climat ?

Comment sort-on de ce climat glaciaire, froid aux latitudes moyennes et hautes, chaud mais sec plus au sud ? Ici les réponses sont encore préliminaires. La même approche isotopique et micropaléonto-

□ Jean-Claude Duplessy, maître de recherche, travaille au Centre des faibles radioactivités de Gif-sur-Yvette, laboratoire mixte CNRS-CEA.

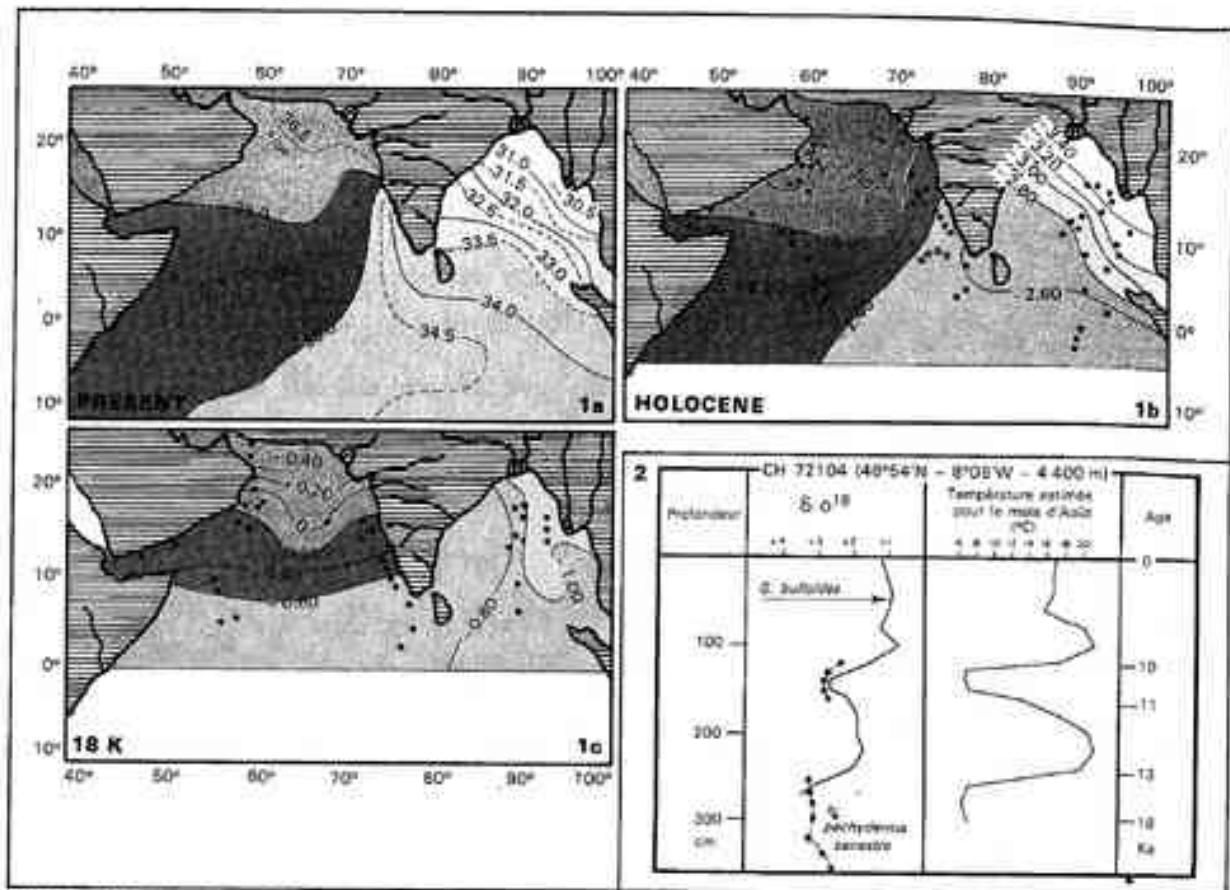


Fig. 1 - a) Variations des salinités actuelles des eaux de surface du Nord de l'océan Indien. - b) Variations de la composition isotopique de l'oxygène (exprimées en écart relatif par rapport à un standard), des tests des foraminifères fossiles trouvés en surface des sédiments. Les zones à plus faible teneur en oxygène-18 correspondent aux eaux à faible salinité. - c) Variations de la composition isotopique de l'oxygène des tests de foraminifères fossiles trouvés dans les sédiments déposés lors du dernier maximum glaciaire datant de 18 000 ans. Toutes les teneurs en oxygène-18 sont plus élevées que celles d'aujourd'hui à cause du stockage d'eau pauvre en oxygène-18 sous forme de gigantesques calottes glaciaires aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord. Un modèle simple permet de reconnaître les masses d'eau équivalentes à celles que nous observons dans les conditions actuelles. Les carottes utilisées dans cette étude ont été prélevées au cours des campagnes OSIRIS II et III du M/S Marion Dufresne, navire de relève des Terres australes et antarctiques françaises. L'étude isotopique a été menée au Centre des faibles radioactivités de Gif-sur-Yvette. Les études palynologiques sur les mêmes carottes ont été effectuées au Laboratoire de palynologie de l'université de Montpellier. Un échantillonnage complémentaire a été obtenu, grâce aux collections du Lamont Doherty geological observatory.

Fig. 2 - Variations de la température d'été des eaux de surface du golfe de Gascogne depuis 18 000 ans. Cette reconstitution a été permise par l'étude de carottes prélevées au cours des campagnes GESTLANTE, GEOGAS et FAEGAS du N/O Jean Charcot gérée par le CNEXO. Ces trois campagnes ont été organisées par l'Institut de géologie du bassin d'Aquitaine (LA 197). Les températures de l'eau de mer ont été estimées à l'aide d'une fonction de transfert, développée au LA 197 et reliant les variations d'abondance des différentes espèces de foraminifères aux températures de l'eau superficielle. L'échelle de temps a été obtenue au Centre des faibles radioactivités par des mesures de carbone-14 couplées à la stratigraphie isotopique. Sa précision est de 10 %.

logique peut être appliquée à ce problème, mais elle est rendue difficile à cause des faibles taux de sédimentation océanique et de la bioturbation qui mélangent les sédiments sur plusieurs centimètres d'épaisseur. On observe donc généralement une banale transition continue. Lorsque l'on peut étudier des carottes à grand taux de sédimentation, on découvre alors une succession de phénomènes complexes, dont le caractère le plus extraordinaire est la vitesse d'évolution. La figure 2 montre l'évolution des températures de l'eau de surface du golfe de Gascogne depuis 18 000 ans. Des conditions analogues à celles du dernier maximum glaciaire (6°C l'été, 0°C l'hiver), s'observent jus-

qu'à il y a 15 500 ans. En 2 000 ans, un brutal réchauffement dont l'amplitude est de 14°C, conduit à un épisode plus chaud que l'actuel. Simultanément, la moitié des glaces accumulées sur l'hémisphère Nord (soit 25 millions de kilomètres cubes d'eau) fondent, entraînant une remontée générale du niveau des mers de l'ordre de 60 mètres. Cet épisode chaud se termine sur une brutale avancée des eaux polaires entraînant, entre -11 000 et -10 000 ans, l'établissement de conditions aussi froides que celles du maximum glaciaire. Une nouvelle phase de réchauffement au cours de laquelle s'achève la déglaciation de notre hémisphère, s'étale sur deux mille ans et conduit aux condi-

tions actuelles après le passage par un optimum climatique bien marqué.

On ne comprend pas encore, comment des quantités de glace aussi importantes que celles qui sont en jeu lors d'une déglaciation, peuvent fondre aussi brutalement. L'étude détaillée des modalités de la dernière transition climatique, couplée à des modèles de dynamique des calottes glaciaires, doit conduire à des progrès significatifs. Il restera alors à comprendre comment on entre dans une période glaciaire et, comme il semble peu probable que l'on puisse l'éviter, déterminer comment on peut en être averti à temps pour se préparer à y faire face.

Les tourbillons océaniques

Ainsi, mon cher Morel, sur le port arrêté,
Tu regardes la mer, et vois en sûreté
De mille tourbillons son onde renversée :
Tu la vois jusqu'au ciel s'élever bien souvent,
Et vois ton Du Bellay à la merci du vent
Assis au gouvernail dans une nef percée.

(Extraits d'un poème de
Joaquim du Bellay « Les regrets »)

Jean-Claude GASCARD

In'y a pas de définition précise de ce qu'on appelle un tourbillon océanique. Ceci tient surtout à la très grande diversité des phénomènes que l'on rassemble sous cette appellation, diversité quant à leur nature et leur structure, leurs causes et leurs effets. Ce que nous entendons par « tourbillon océanique » est un phénomène d'échelle dite intermédiaire (par rapport à la dimension des bassins océaniques), dont la période de rotation est de quelques jours à quelques semaines (sa durée de vie pouvant atteindre plusieurs mois, voire l'année) et dont l'extension spatiale est de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres pour les dimensions horizontales, et de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres pour la dimension verticale. Ils peuvent s'étendre, dans certains cas, de la surface jusqu'au fond de l'océan. La vitesse horizontale des masses fluides entraînées dans ces mouvements en tourbillons est de l'ordre de quelques dizaines de cm.s^{-1} , et peut atteindre le m.s^{-1} . Un tourbillon océanique se distingue donc par un rapport de forme (rapport entre dimensions horizontale et verticale) très élevé, de l'ordre de 100. Ils sont très répandus dans l'océan, mais leur distribution spatiotemporelle est très irrégulière. Leur prise en compte, pour traiter du problème de la circulation générale océanique, implique une dynamique complexe qui s'apparente, dans certains cas, à une turbulence bi-

dimensionnelle présentant des caractères prononcés d'anisotropie, d'inhomogénéité et d'intermittence.

Ces tourbillons sont la partie constitutive majeure de ce que l'on pourrait appeler le « temps » de l'océan, par analogie avec le fait météorologique, et sont l'expression essentielle de la variabilité de la circulation océanique. Cette variabilité, il y a bien longtemps que les marins en ont conscience. On peut évoquer à ce sujet les « regrets » prémonitoires de Joachim du Bellay, d'il y a plus de quatre siècles ! Heureux qui comme Ulysse... Jonathan Williams, le petit neveu de B. Franklin ne décrivait-il pas dans ses cahiers de navigation, avant 1800, ce qu'on allait découvrir près de deux siècles plus tard : les anneaux du Gulf Stream ? En fait, à force de tenter de définir par l'observation et la théorie le « climat » de l'océan, qui est son état moyen, et de ne réussir à observer, après un demi-siècle d'effort, que son « inconstance », à la fois dans l'espace et dans le temps, il a bien fallu que les océanographes en viennent aux faits, comme leurs collègues météorologistes, mais trente ans après eux.

L'état « perturbé » du milieu fluide océanique est essentiellement imposé par l'atmosphère (tension du vent sur la surface marine). Il est influencé par la topographie sous-marine et par la circulation générale océanique, ainsi que par la stratification interne du fluide. Les tourbillons, selon les cas, peuvent intervenir comme éléments « moteur » ou « frein » de cette circulation. Si l'on considère des processus d'interaction faible dans un océan peu turbulent où la circulation est relativement « lente », le phénomène tourbillon

(pris au sens large) reste peu développé et peut être décrit dans le cadre d'une théorie linéaire en terme d'ondes (ou systèmes d'ondes) qui, à cette échelle, s'appellent des ondes de Rossby, du nom du savant suédois qui les a découvertes dans l'atmosphère en 1939. Dans ce cas, la vitesse des particules fluides, qui définissent le tourbillon, reste du même ordre de grandeur que celle de la circulation générale. Dans le cas de tourbillons pleinement développés, caractérisant un océan « perturbé » ou très turbulent, c'est la vitesse des particules fluides du tourbillon qui est beaucoup plus élevée (d'un ordre de grandeur au moins) que la circulation générale. On a alors affaire à une mécanique complexe, fortement non linéaire. Les mesures continues de courant, faites en de nombreux points de l'océan, révèlent que les niveaux d'énergie cinétique associés à la partie moyenne (stable) des courants, sont en général d'un à deux ordres de grandeur inférieurs aux niveaux d'énergie cinétique associés à la partie fluctuante. Il se trouve donc que l'océan réel ressemble beaucoup plus à un océan « agité » ou caractérisé par une forte activité liée aux phénomènes tourbillonnaires. De ceci résulte l'intérêt de l'étude des tourbillons pour une compréhension globale de la dynamique océanique.

Observation des tourbillons : méthodes et moyens

C'est très certainement l'expérience britannique, conduite par J. Swallow à bord du navire Aries en 1959-1960, dans la mer des Sargasses, qui a déclenché dix ans

□ Jean-Claude Gascard, chargé de recherche au CNRS, travaille au Laboratoire d'océanographie physique (LA 175) du Muséum national d'histoire naturelle de Paris.

plus tard, une série d'expériences soviétiques (Polygon 1970) et américaines (Mode 1973), pour l'étude de la variabilité de la circulation océanique aux échelles intermédiaires, et donc des tourbillons. Il faut dire que les progrès scientifiques dans ce domaine, comme dans bien d'autres touchant à cette discipline, ont été de pair avec les progrès techniques.

Les méthodes et moyens d'observation des tourbillons se sont considérablement développés ces dernières années. Parmi les plus efficaces, la méthode dite lagrangienne, consiste à suivre une parcelle fluide dans son déplacement. Elle emploie la technique des flotteurs de Swallow, utilisée pour la première fois lors de l'expérience Aries, pour l'observation des courants marins en profondeur, et, plus récemment (depuis 1975), des bouées dérivantes de surface munies de balises Argos, localisées par satellite pour l'observation des courants superficiels. Les flotteurs de Swallow, à flottabilité neutre à une certaine profondeur, du fait de leur compressibilité plus faible que celle de l'eau de mer, dérivent avec le courant à cette profondeur et sont localisés dans l'espace marin par voie acoustique. Cette technique a été reprise au début des années 1970 et développée par les américains : les flotteurs SOFAR (SOund Fixing And Ranging).

Une autre méthode, dite culérienne, qui consiste à mesurer les courants en un point fixe, emploie un réseau de courantomètres fixés sur des câbles dont une extrémité est ancrée sur le fond, l'autre étant sustentée par une flottabilité importante qui tire le câble vers la surface.

Une troisième méthode, dite dynamique, est basée sur l'équilibre géostrophique qui s'applique en général aux mouvements fluides horizontaux de grande échelle, et, en particulier, en première approximation, aux tourbillons océaniques. Cet équilibre s'établit entre, d'une part, la force de Coriolis, proportionnelle à la vitesse V de l'écoulement, mais orientée perpendiculairement à lui (le facteur de proportionnalité est le paramètre de Coriolis $f = 2\Omega \sin \phi$, Ω , vitesse angulaire de la rotation terrestre, ϕ , latitude), et, d'autre part, le gradient horizontal de pression. Le vecteur courant géostrophique est tangent à une isobare et le courant est d'autant plus intense, que les isobares sont plus rapprochées.

La méthode consiste à sonder, en réseau, et de la surface au fond, les températures et les salinités, pour en déduire le champ de densité, au moyen d'appareils que l'on appelle des bathy-



Fig. 1 - Télédétection, par radiométrie infrarouge depuis satellite, de la température de surface de l'océan, dans la région du Gulf Stream, au large de la côte Est des Etats-Unis. Les zones sombres (chaudes) en bordure des zones claires (froides) indiquent des mésanges anticycloniques qui se referment en anneaux emprisonnant des masses d'eaux chaudes. Image prise le 1er mai 1977 (14 h 28 GMT) par le radiomètre à très haute résolution (VHRR) du satellite NOAA 5. (Extrait de : « Oceanic and related atmospheric phenomena as viewed from environmental satellites » - NOAA - US Dpt of Commerce, Office of oceanic and atmospheric services, Washington, DC, avril 79, p. 5).

sondes, qui mesurent *in situ* la pression, la température et la conductivité électrique de l'eau de mer. Les gradients de densité selon les isobares, ainsi mis en évidence, permettent de calculer le gradient vertical du courant géostrophique. En fixant le courant à une certaine immersion, en surface par exemple, comme dans la méthode exposée ci-après, on détermine le courant à toutes les immersions.

Enfin, très récemment, des radars, fonctionnant en altimètres, embarqués sur satellite à une altitude moyenne d'environ 1 000 kms, ont été mis au point pour relever la topographie de la surface marine avec une précision de l'ordre du décimètre ou mieux, et une résolution spatiale de l'ordre de quelques kilomètres sur la trace du satellite. La connaissance du géoïde à la même précision permet donc de déterminer la pente α de l'isobare de surface par rapport au géopotential correspondant. Cette pente est directement proportionnelle au courant géostrophique de surface V :

$$\tan \alpha = \frac{f}{g} V,$$

(g = accélération de la pesanteur). La précision subdécimétrique est nécessaire pour télédéceler ainsi depuis l'espace des tourbillons océaniques pour lesquels la dénivellation de la surface libre peut atteindre, par rapport au géopotential, quelques dizaines de centimètres entre le centre et la périphérie distante de 10 à 100 kms suivant les cas. 10 cm sur 100 km pour $f = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, à une latitude de 45° , correspond à une vitesse géostrophique de 10 cm.s^{-1} .

Ajoutons enfin, à côté de cette télédétection dite active, une télédétection passive au moyen de radiomètres hyperfréquences qui captent le rayonnement infra-rouge de la surface du globe, et peuvent donc identifier au-dessus de l'océan, la présence de tourbillons, grâce à la signature thermique de ceux-ci en surface (fig. 1). Cette technique est très sérieusement affectée par la présence des nuages en particulier et de la nébulosité atmosphérique

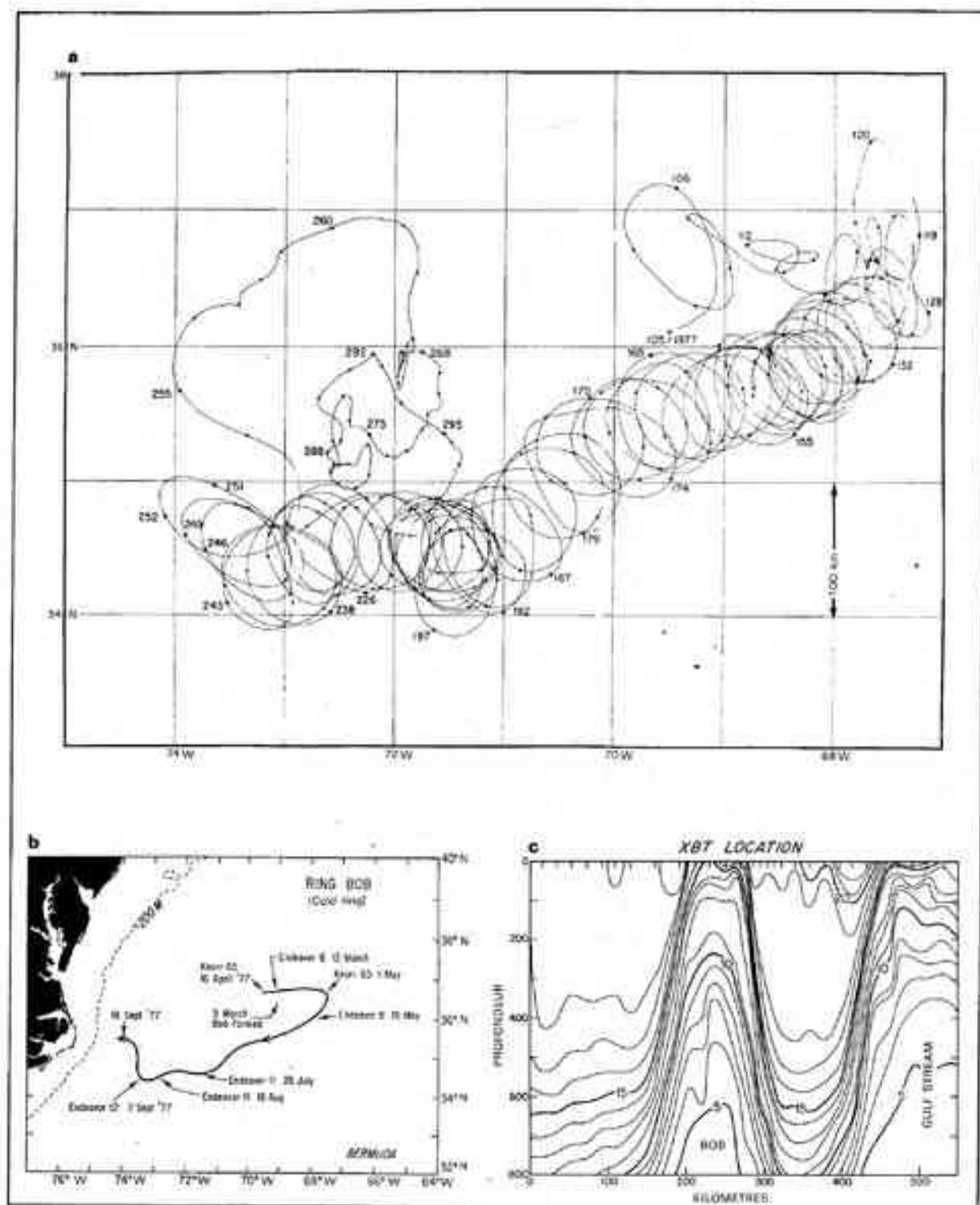


Fig. 2 - a) Trajectoire d'une bouée de surface en dérive du 14 avril 1977 (jour 104) au 26 octobre 1977 (jour 299). La bouée suit dans son mouvement de rotation et de translation l'anneau « BOB ». b) Le mouvement de translation de l'anneau est représenté du 16 avril 1977 au 18 septembre 1977 ainsi c) qu'une coupe bathythermographique XBT intersectant l'anneau et le Gulf Stream le 12 mars 1977 et représentant les isothermes de 5° à 22°C entre 0 et 800 m. (Extrait de P.L. Richardson (1980) « Gulf stream trajectories ». Journal of physical oceanography, vol. 10, n° 1, janvier 1980, pp. 90 à 104).

Fig. 3 - Relevés successifs de la topographie de la surface marine effectués à partir de l'altimètre du satellite SEASAT, du 17 septembre au 8 octobre 1978, en passant sur des traces colinéaires intersectant le Gulf Stream au Sud-Est de Long-Island (Etats-Unis). On remarque, par rapport à une surface moyenne, une dénivellation importante de la surface libre de 130 à 165 cm pour le Gulf Stream, et de 45 cm pour un anneau situé à 300 km plus au large. Le « creux » de l'anneau s'atténue au cours du temps de 45 cm à 10 cm indiquant un déplacement de l'anneau sous la trace du satellite. (Extrait de : Cheney and Marsh (1981) « SEASAT altimeter observation of dynamic ocean currents in the Gulf Stream region ». J. geophys. Res., 86, pp. 437-483). ▶

QUELQUES RAPPELS ELEMENTAIRES DE MECANIQUE DES FLUIDES APPLIQUEE AUX TOURBILLONS

Les écoulements rotationnels ou tourbillonnaires se caractérisent par un champ de vecteurs tourbillons, associés à un champ de vitesses déduites d'une fonction de courant. Le laplacien horizontal de la fonction de courant définit la vorticité de l'écoulement, c'est-à-dire la composante verticale du rotationnel de la vitesse. La vorticité absolue du fluide s'obtient en ajoutant à la vorticité relative ζ , la vorticité planétaire $f = 2\Omega \sin \phi$ induite par la rotation de la Terre (de vitesse angulaire Ω) à une latitude ϕ . Dans le cas des mouvements tourbillonnaires que nous considérons, mouvements quasi-horizontaux, la vorticité est la seule composante non nulle du rotationnel de la vitesse. Ces mouvements peuvent se décomposer en rotation, translation et déformation. En l'absence de phénomènes dissipatifs (fluides non visqueux) et dans le cas de mouvements adiabatiques, les tourbillons fluides conservent leur vorticité potentielle :

$$(\zeta + f) = \frac{\delta \rho \theta}{\delta p}$$

$\rho \theta$ densité potentielle.

Pour un tourbillon évoluant adiabatiquement entre deux surfaces isodensités, $\delta \rho \theta = \text{Cte}$. Il s'ensuit :

$$\frac{\zeta + f}{\delta p} = \text{Cte.}$$

En fluide homogène d'épaisseur H , cette expression devient : $\frac{\zeta + f}{H} = \text{Cte.}$

On retrouve, selon ces expressions, les paramètres qui influent sur le comportement des tourbillons et qui peuvent donc aussi présider à leur génération, à savoir, la topographie (variation de H), l'effet β , lié à la variation du paramètre de Coriolis f avec la latitude, et la stratification. D'autres causes génératrices de vorticité peuvent aussi être invoquées dans la formation des tourbillons, telles que l'action de la tension du vent sur la surface de l'océan, ou des mécanismes d'instabilité hydrodynamique au sein du fluide, soit barocline, quand ils sont liés au gradient vertical de vitesse (voir supplément Courrier du CNRS n° 20) soit barotrope, quand ils sont liés au gradient horizontal de vitesse, soit à la fois barocline et barotrope.

Dans les tourbillons, on trouve en général une correspondance étroite entre le rayon moyen du tourbillon et une longueur caractéristique R , dite « rayon interne de déformation », et qui est la distance que parcourt une onde (onde interne) se propageant au sein du fluide stratifié en une période de jour pendulaire. Ce rayon s'exprime par le produit de H , la hauteur fluide, par le rapport de N , paramètre de stratification verticale de densité potentielle $\rho \theta$, à f , paramètre de rotation terrestre. N est une fréquence dite de Brunt-Väisälä :

$$N^2 = -\frac{g}{\rho \theta} \frac{\delta \rho \theta}{\delta z}$$

ou fréquence de stabilité verticale, f est la fréquence angulaire de Coriolis (l'inverse de la période circulaire du jour pendulaire).

Dans l'océan, R est en moyenne de 50 km, soit un ordre de grandeur inférieur à celui que l'on calcule pour l'atmosphère. C'est aussi la raison pour laquelle les tourbillons océaniques sont en général 100 fois plus petits que les tourbillons atmosphériques, mais aussi plus nombreux.

en général qui peut être très élevée au-dessus de l'océan. Elle permet de résoudre actuellement, et dans les meilleures conditions, des gradients thermiques de l'ordre de 0.5°C sur quelques dizaines de kilomètres.

Il faut signaler que tous les tourbillons océaniques n'ont pas forcément une signature thermique en surface ou tout au moins une signature identifiable, soit parce que la technique utilisée n'est pas assez sensible, ou parce que la signature thermique en surface du tourbillon est bien trop complexe (fronts instables).

Résultats d'observations

Pour présenter quelques résultats d'application de telles méthodes à l'observation des tourbillons, nous avons choisi deux cas typiques.

Le premier concerne les anneaux du Gulf Stream (« rings ») (fig. 2). Ces anneaux forment un ensemble très particulier de tourbillons très énergétiques, présentant de forts contrastes par rapport au milieu environnant, donc très faciles à détecter. On les trouve à proximité de forts courants-jets où les vitesses sont typiquement de l'ordre de 75 cm.s^{-1} (Gulf Stream, Kuro Shivo), car ils sont engendrés par des instabilités hydrodynamiques de ces jets. Ces instabilités dont la(s) cause(s) n'est (ne sont) pas encore clairement établie(s), apparaissent sous la forme de méandres qui s'amplifient, puis se détachent du courant « jet » pour former des anneaux qui emprisonnent des masses d'eaux qui se trouvaient sur la rive gauche du courant pour ceux (cycloniques à cœur froid) qui se détachent sur la rive droite, et inversement pour les anticycloniques. La période circulaire est de l'ordre de deux à trois jours pour les anneaux les plus rapides et de dix jours pour les plus lents. Leur diamètre est de l'ordre de 100 km et les vitesses circonférentielles peuvent atteindre 125 cm.s^{-1} . La dénivellation de la surface libre au centre de l'anneau peut atteindre près d'un demi-mètre par rapport à la périphérie à 50 kms, comme l'indique le relevé effectué par l'altimètre de SEASAT (1) en 1978 (fig. 3), ce qui correspond effectivement à une vitesse géostrophique d'environ 1 m.s^{-1} .

Les anneaux sont des exemples très particuliers de tourbillons océaniques

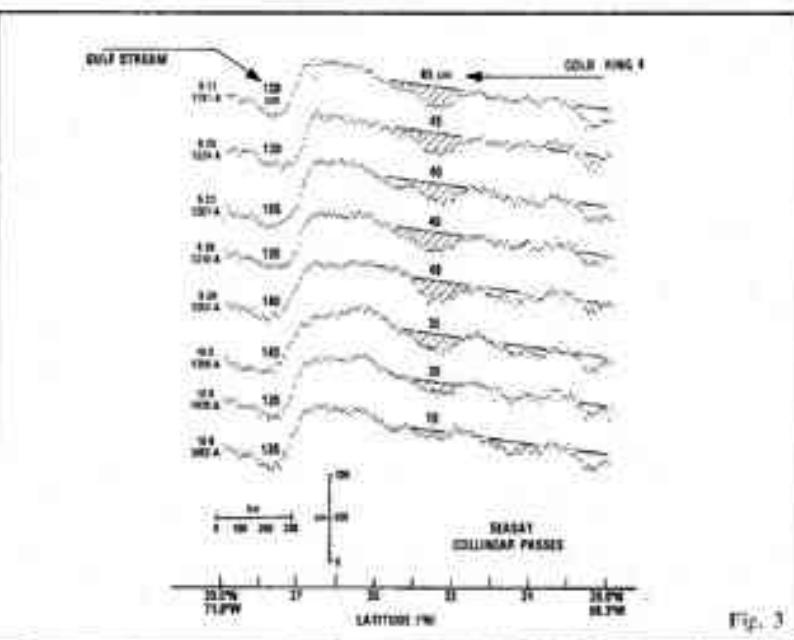


Fig. 3

(1) SEASAT : satellite d'observation de l'océan, lancé à l'automne 1978 et qui n'a fonctionné que pendant trois mois.

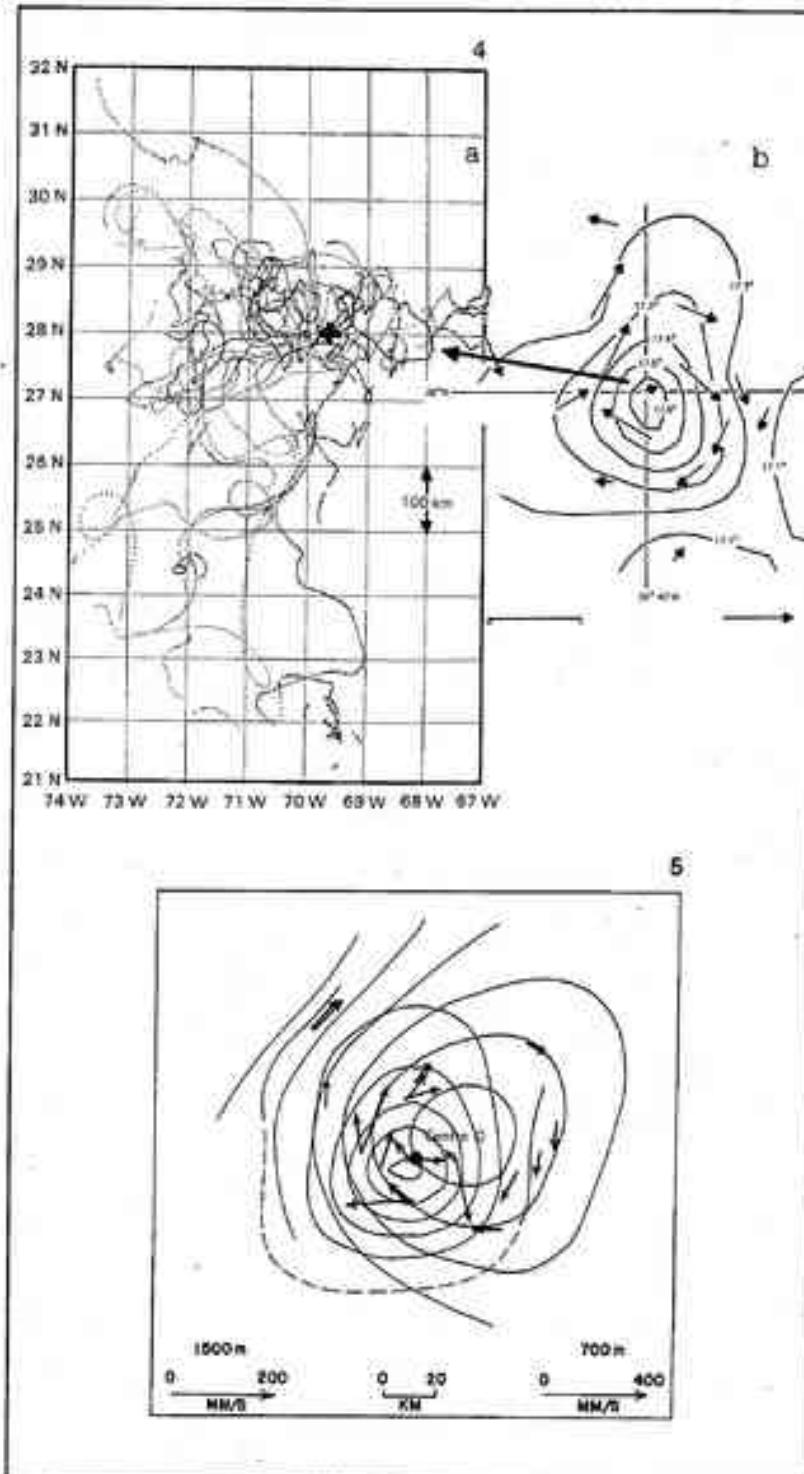


Fig. 4 - a) Trajectoires de flotteurs SOFAR de novembre 1972 à décembre 1974 à une immersion moyenne de 1 500 m environ en mer des Sargasses. Comme les points le long des trajectoires correspondent à des positions journalières, les parties de trajectoires représentées par des points espacés sont parcourues par les flotteurs à des vitesses élevées, et, au contraire, pour les points rapprochés, où, de plus, les trajectoires ont un aspect plus erratique. - b) Une vue d'un tourbillon de l'expérience MODE-I. Schéma synoptique, pour la période du 23 au 26 avril 1973, des isothermes et des vecteurs « courants » à 500 m de profondeur environ. (Extrait de : T. Rossby, A.D. Vosough and D. Webb (1975) « A quasi-lagrangian study of mid-ocean variability using long range SOFAR floats ». J. Mar. Res., vol. 33, n° 3, pp. 355-382).

Fig. 5 - Expérience TOURBILLON 79 : tracé synoptique de la fonction de courant à 700 m et 1 500 m, par analyse objective des mesures de courant effectuées à ces immersions au moyen de flotteurs dérivants et de courantomètres fixes le 4 octobre 1979. Les mesures sont filtrées sur une période de quatre jours autour du 4 octobre, et les lignes de courant sont espacées respectivement de 0.75 et 1.5 m.km.s⁻¹ à 1 500 m et 700 m. Le centre du réseau 0 est par 47° Nord et 14°50 Ouest à environ 750 km à l'Ouest de Brest.

car ils n'existent que près des veines de courants intenses. Loin des courants, en plein océan, on rencontre très fréquemment, aux latitudes moyennes notamment, d'autres tourbillons que l'on pourrait qualifier de « tourbillons standard ». Leur taille est assez semblable à celle des anneaux, mais leur structure est notablement différente. Leur période circulaire est de l'ordre du mois et les vitesses circonférentielles, de 10 cm.s⁻¹ en moyenne, varient entre 5 et 15 cm.s⁻¹. De tels tourbillons ont été mis en évidence, notamment, lors de l'expérience américaine Mode 1973 (fig. 4), en mer des Sargasses (Sud-Ouest des Bermudes), loin du Gulf Stream, dans une région où l'observation, pendant 2 ans (1972-1974), de la dérive, à 1 500 m de profondeur, d'un grand nombre de flotteurs Sofar, est très révélatrice de la complexité des mouvements fluides aux échelles intermédiaires, tout autant que de la difficulté à définir une composante moyenne de la circulation générale.

Un autre exemple type de tourbillon standard de plein océan est celui observé en 1979, sous maîtrise d'œuvre française, dans le poche Atlantique, au large de Brest (Courrier du CNRS n° 36), et qui fait l'objet actuellement d'études très approfondies (fig. 5 et 6). L'une des découvertes récentes les plus intéressantes est la mise en évidence de structures internes aux tourbillons, d'échelles plus petites, très énergétiques et qui apparaissent comme le « cœur » du système. Ce cœur apparaît clairement dans l'observation, faite en 1979, notamment grâce au suivi de la dérive d'un flotteur (n° 10) qui l'encercle, flotteur qui tourne à une vitesse angulaire, quatre fois supérieure au moins à celle des flotteurs plus éloignés, situés sensiblement au même niveau, et sur un cercle d'environ 35 km de diamètre. Une masse d'eau très salée, présente à cette immersion (originale de la Méditerranée) est chassée de la zone centrale tourbillonnaire où se situe le cœur et l'encercle également (fig. 7). C'est un contre exemple (ou « anti-Meddy ») d'un « Meddy » (pour Mediterranean

Eddy (2)), récemment observé par une équipe américaine en mer des Sargasses, à partir du suivi de flotteurs Sofar. Les trajectoires des flotteurs emprisonnent dans la zone centrale des eaux salées à forte teneur en eau méditerranéenne.

Beaucoup d'autres « Meddys » ont été détectés récemment, notamment dans la région des Açores, l'eau méditerranéenne constituant un excellent traceur hydrologique de ces tourbillons dans l'Atlantique Nord.

Beaucoup d'autres tourbillons ont été observés dans tous les bassins océaniques, non seulement à proximité de veines de courants intenses comme nous l'avons montré dans le cas du Gulf Stream, mais aussi à proximité des régions frontales séparant des masses d'eaux de caractéristiques différentes comme le front polaire antarctique par exemple, ou/et dans des domaines de l'Océan fortement influencés par le passage de dépressions atmosphériques nombreuses et actives et/ou à la limite des bassins océaniques à proximité des talus continentaux ou des dorsales sous-marines. La connaissance de la distribution spatiale et temporelle des tourbillons en particulier, et des mouvements aux échelles intermédiaires en général, qui concentrent une partie importante de l'énergie cinétique de la circulation océanique, est essentielle pour parvenir à une meilleure compréhension de celle-ci. Il est très clair que la qualité des modèles numériques de simulation de cette circulation en dépend, tout autant que nos progrès en matière de climatologie (flux méridien de chaleur) et en matière d'environnement marin (écosystème, pêches, pollution, énergie). C'est pourquoi nous fondons beaucoup d'espoirs sur l'emploi, à partir de 1986-1987, de techniques spatiales de télédétection active principalement, techniques qui sont les seules à permettre une observation régulière (quasi-synoptique) des mouvements d'échelle intermédiaire étendue à tout l'océan.

(2) Eddy = tourbillon

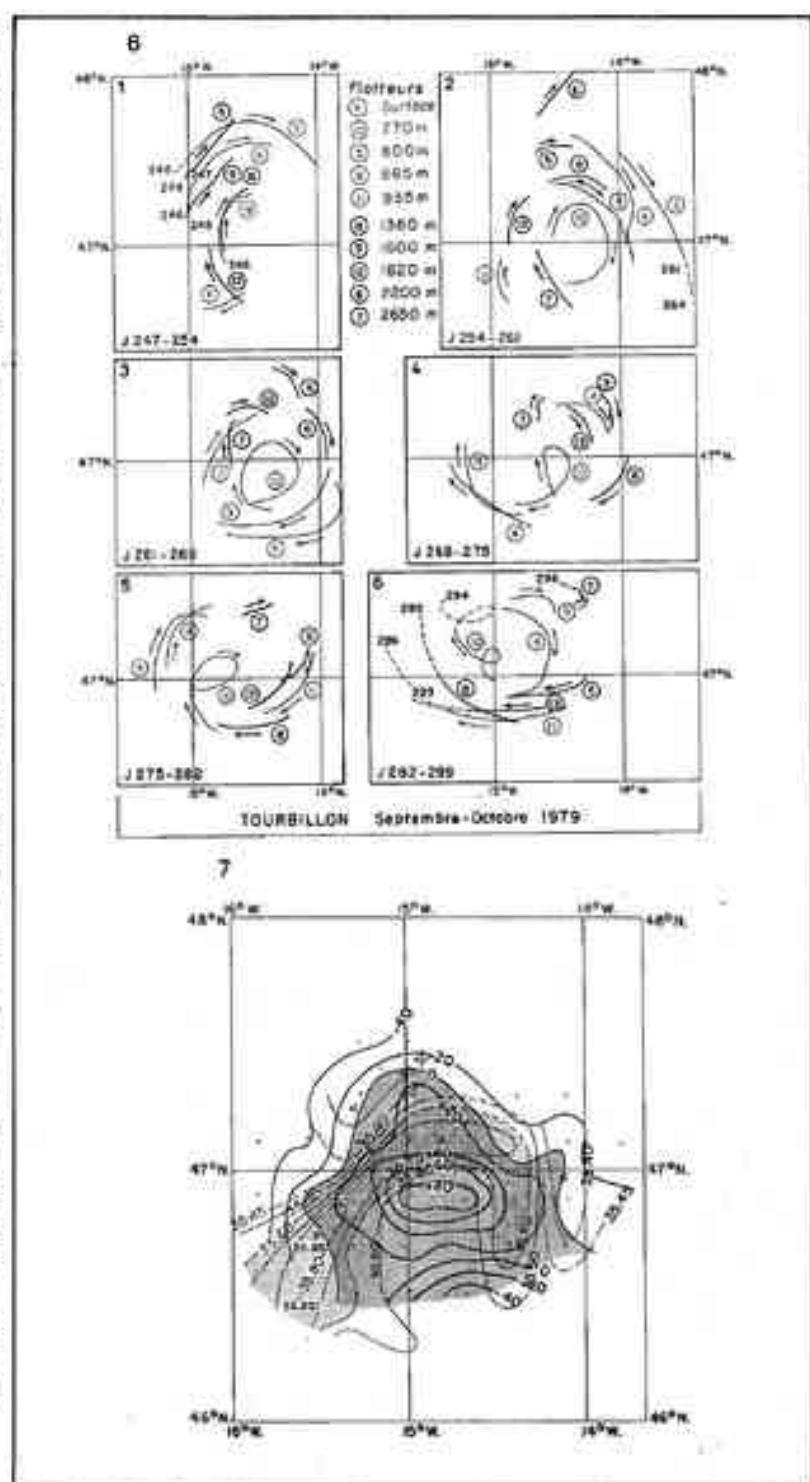


Fig. 6 - Séquence hebdomadaire du 2 septembre (pour 246) au 22 octobre 1979 (pour 296), des trajectoires décrites par des flotteurs (en couleur) dérivants entre la surface et la thermocline principale située vers 1 000 m de profondeur, et des flotteurs (en noir) situés au-dessous de cette thermocline lors de la campagne TOURBILLON 79.

Fig. 7 - Topographie en décibars (1 décibar ≈ 1 m) d'une surface isochore (volume spécifique constant) proche de l'isobare 975 décibars (environ 1 000 m de profondeur). On remarque que la signature du tourbillon à cette immersion est une « cuvette » d'environ 80 m en son centre par rapport à la périphérie. Le signe + indique un déplacement vers le bas. Trace du maximum de salinité (en g./Kg) (d'origine méditerranéenne) sur cette surface isochore. Ce tracé a été effectué à partir du 3ème réseau hydrologique « bathysonde » de la campagne TOURBILLON 79.

Les réseaux trophiques en milieu abyssal

Le fond des océans représente un immense écosystème. Sa compréhension est fondamentale au moment où on le considère soit comme une poubelle soit comme la grande réserve de matières premières minérales.

Claude MONNIOT

L'idée d'une vie possible à grande profondeur a mis longtemps à s'imposer. Sa découverte, coïncidant avec l'essor des théories de l'évolution a provoqué, à la fin du XIX^e siècle, un enthousiasme général et les travaux scientifiques se sont multipliés dans ce domaine. La faune était certes partout, mais les « monstres » ou les « fossiles vivants » escomptés n'étaient pas au rendez-vous. Les animaux sont diversifiés, parfois de grande taille ou spectaculaires, mais les espèces profondes, en dehors de quelques exceptions, ne sont que des proches parents des espèces littorales.

Après la seconde guerre mondiale, trois séries de recherches ont complètement modifié l'idée que l'on se faisait des grandes profondeurs.

L'expédition danoise de la « Galathée » a trouvé la vie aux plus grandes profondeurs connues, récolté un matériel considérable et relancé l'intérêt zoologique par la découverte du *Neopilina*, Mollusque considéré comme éteint depuis le Cambrien.

Les navires soviétiques ont quadrillé l'ensemble des mers, mesuré la biomasse benthique et établi pour la première fois, l'évidence d'une relation entre la biomasse benthique abyssale et la production primaire planctonique.

Le Laboratoire de Woods-Hole a commencé une étude répétitive de stations échelonnées sur une radiale Woods-Hole - Bermudes, mis en évidence une faune de très petite taille (négligée jusqu'alors), une diversité spécifique dépassant ce que l'on connaît des milieux littoraux, et montré qu'il n'existe pas de relation directe entre la teneur en carbone organique du sédiment et la densité de la faune.

D'autre part, un programme français a débuté en 1969 avec l'aide du Centre océanologique de Bretagne, réunissant des chercheurs du CNRS, du Muséum, des universités et du CNEXO.

D'abord lié aux programmes d'exploration géologiques et géophysiques de l'Atlantique et de la Méditerranée (Campagnes NORATLANTIC - WALDA - POLYMEDE), le programme est devenu indépendant et s'est développé dans deux directions. Le suivi de six stations permanentes, échelonnées de 2 000 à 4 700 m dans le golfe de Gascogne (programme BIOGAS) et une série de campagnes lointaines d'exploration, souvent effectuées en étroite liaison avec les géophysiciens et les géologues, ont étudié l'écosystème abyssal dans des zones où les apports trophiques étaient différents.

Dans le même temps se développait le programme ORGON de géochimie, associée à la bactériologie et à l'étude de la meiofaune, par une collaboration entre le CNRS, l'université et l'industrie pétrolière.

Tous ces aspects se complétant, le programme français aborde presque tous les domaines touchant à la compréhension du fonctionnement de l'écosystème abyssal. L'emploi des submersibles prévu dès cette année, va donner un nouvel essor à l'expérimentation *in situ*.

Le fond des océans représente un immense écosystème dont la survie, en l'absence de production photosynthétique, dépend des apports du reste de la biosphère. Ce qui remplace la « production primaire » en milieu abyssal est très difficile à évaluer et peut provenir de trois sources : les pertes de l'écosystème planctonique, l'apport continental et la production chémooautotrophe.

Cette dernière est une véritable production primaire, qui utilise comme source d'énergie l'oxydation des sulfures métalliques. Elle ne semble pas

avoir un rôle considérable en dehors des sources hydrothermales récemment découvertes sur l'axe des dorsales océaniques en expansion rapide (+ 6 cm an⁻¹). Dans ces zones, on observe un extraordinaire foisonnement de vie. Malgré son importance ponctuelle, ce phénomène est négligeable à l'échelle d'un océan.

L'apport continental est très important mais non quantifiable à l'heure actuelle. Du matériel organique : débris végétaux, particules organiques, matière organique piégée à la surface de particules minérales et substances dissoutes, peuvent atteindre très vite les zones profondes en profitant des courants de turbidité qui existent le long de la pente continentale et dans les canyons. L'importance de ce transport a été mise en évidence au large des côtes de l'Orégon, dans la plaine abyssale des Cascades. Cette plaine est parcourue par un chenal sous-marin de 0,6 à 3,5 km de large, enfoncé de 40 à 320 m par rapport au niveau de la plaine. La faune est quatre fois plus abondante dans ce chenal que sur la plaine. Les débris végétaux d'origine terrestre, se rencontrent en quantité significative dans beaucoup de mers et sont utilisés par une faune parfois spécifique. Leur abondance peut conduire à une réduction de la teneur en oxygène et même à sa disparition dans certaines fosses (fosse de Cariboo au large du Venezuela par exemple).

Au large, en dehors des zones d'apports continentaux, l'écosystème abyssal dépend directement de la production du plancton végétal. Le transfert surface-fond de la matière organique paraît alors plus aisément modélisable. On a longtemps admis l'existence d'une « manne » de cadavres animaux et végétaux venant alimenter la faune profonde, mais l'analyse des particules organiques trouvées dans l'eau montre que la vitesse de chute de cette manne était si faible que sa chance d'atteindre le fond, non dégradée, était négligeable.

□ Claude Monniot, maître de conférence au Muséum national d'histoire naturelle est responsable de la recherche coopérative sur programme « Etudes écologiques et biologiques des communautés benthiques ».

On fit donc appel à la notion de chaîne alimentaire verticale : les animaux bathypelagiques migrant vers le haut pour se nourrir et étant eux-mêmes consommés par les populations vivant plus profondément. On a estimé à environ 1 000 m l'écart moyen de la migration ce qui pour alimenter la faune vivant à 5 000 m nécessiterait cinq échelons trophiques.

Grâce à des pièges à sédiments disposés au fond ou en pleine eau et à l'analyse d'une grande quantité d'eau pompée et filtrée en-dessous de la zone photique, on a pu découvrir que les pelotes fécales de Copépodes pouvaient traverser les masses d'eau à une vitesse importante.

Ce flux de déjections transporterait une part importante de la production primaire. Il est évident que toutes les particules n'atteignent pas le fond car elles forment une part importante de la nourriture du plancton profond.

Ce transport, mis en évidence directement par des pièges a été confirmé au niveau du fond, dans le tube digestif d'un certain nombre d'espèces d'animaux filtreurs.

La mesure du flux de matière organique qui atteint le fond des océans pose de gros problèmes et si les différents

auteurs s'accordent en général sur sa composition, il n'en est pas de même pour son importance. La mesure directe par les pièges à sédiments est délicate, ceux-ci perturbant le flux et étant perturbés par l'activité biologique. Un peu partout dans le monde, et en France au Centre océanologique de Bretagne (COB), de tels pièges sont en construction ou en expérimentation.

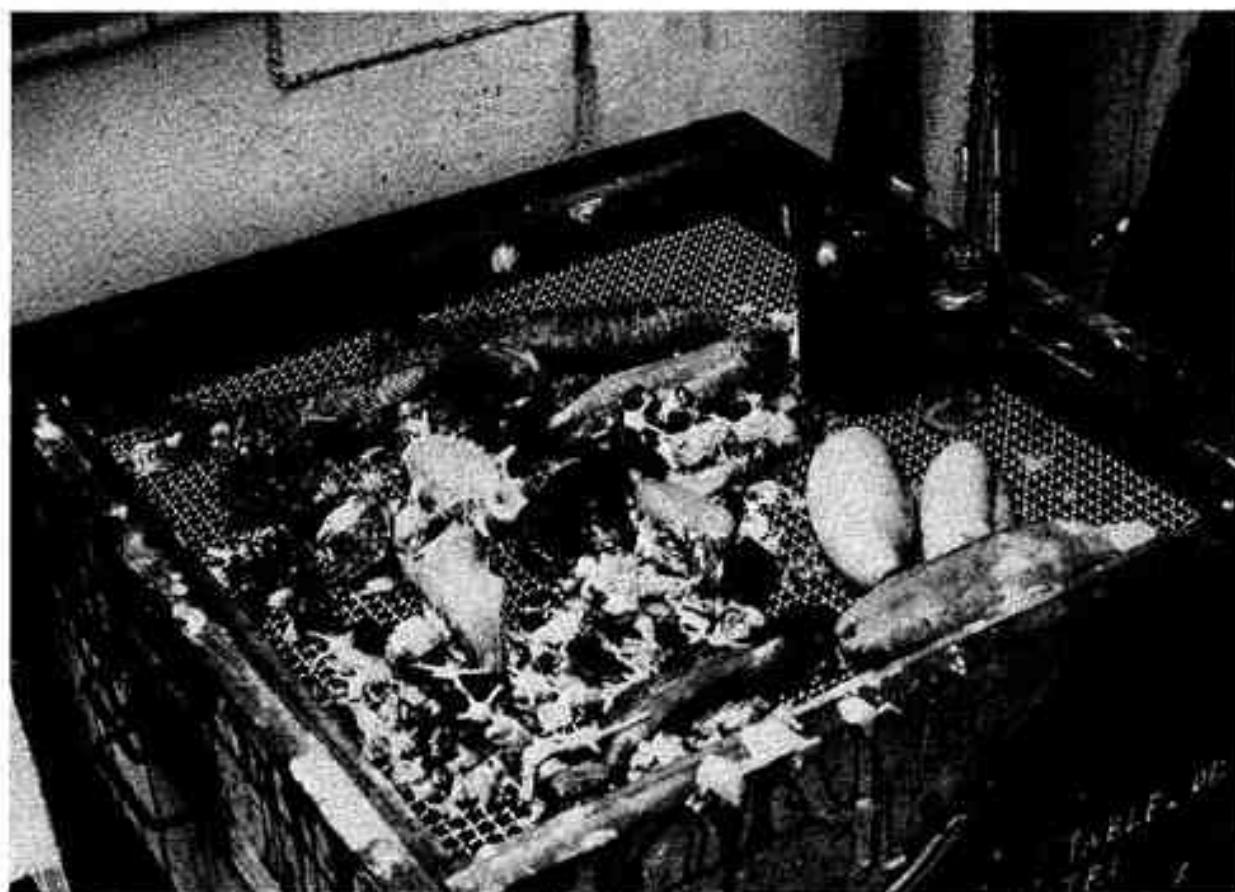
Une mesure indirecte, une estimation plutôt, est tentée en mesurant l'activité métabolique *in situ* du sédiment et en calculant l'apport d'énergie nécessaire pour maintenir le système en équilibre. En utilisant à la fois des pièges à sédiment et en mesurant la consommation d'oxygène au niveau du fond, il a été montré qu'à des profondeurs dépassant 3 500 m, le flux de matière organique semblait suffisant pour équilibrer la consommation d'énergie de la faune contenue dans le sédiment.

A cet apport permanent, il faut ajouter la chute des cadavres de gros poissons et de mammifères marins, phénomène qui provoque un enrichissement local considérable mais aléatoire. On estime globalement qu'environ 10 % de la matière organique produite en surface est susceptible d'être utilisée au niveau du benthos abyssal.

Comment se présente la matière organique sur le fond ?

Généralement ayant transité par les tubes digestifs des animaux planctoniques, les éléments les plus facilement assimilables sont en proportion plus faibles qu'en surface. La matière organique des deux premiers centimètres du sédiment a été étudié : 2 à 3 % se présentent sous une forme soluble ou particulaire (essentiellement des protéines directement assimilables par la faune), 20 % sous forme facilement hydrolysable, surtout formée par les pelotes fécales et des molécules organiques liées à la matière minérale et le reste soient les 3/4 représentent des éléments particulaires résiduels ou des molécules très stables non assimilables qui se sédimentent.

L'activité bactérienne du sédiment, mise par certains auteurs, est considérée par d'autres comme fondamentale. L'impossibilité technique actuelle de prélever et de cultiver des microorganismes benthiques sans qu'ils passent par une phase de décompression ne permet pas d'avoir une idée précise de leur activité réelle. Pourtant, il existe une corrélation entre l'abondance bactérienne et la densité de la microfaune.



Trai d'un chalut (5 270 m de fond à 200 milles au large du Portugal).



Les microorganismes sont présents dans les tubes digestifs d'animaux abyssaux en quantité notablement plus importante que dans les sédiments avoisinants mais leur rôle réel est encore mal évalué.

Tous les animaux qui vont tirer directement leur nourriture de la matière organique qui tombe de la surface et de celle déposée sur les sédiments, vont constituer l'échelon « consommateur primaire » du réseau trophique abyssal. Ils peuvent se diviser en plusieurs catégories selon leur régime alimentaire.

L'échelon consommateur primaire

Les osmotrophes se nourrissent par absorption directe de substances dissoutes ou par phagocytose de petites particules. Les filtreurs : Eponges, Hydrières, Pennatulaires, Bryozoaires, Mollusques pro parte, Polychètes pro parte, Ascidiés... se nourrissent en partie sur le flux de particules descendantes et sur celles remises en suspension par les courants et l'activité bioturbatrice du fond.

Ce sont les limivores qui constituent la plus grande part des « consommateurs primaires ». Ils sont représentés par les Echinodermes, une partie des Mollusques, des Polychètes et par des petits Crustacés. Les Echinodermes peuvent à eux seuls, représenter plus de la moitié de la biomasse abyssale. Les Holothuries pratiquent un tri parmi les particules. La teneur en carbone organique à l'entrée du tube digestif est 4 à 6 fois plus grande que celle des sédiments avoisinants. Le rendement de la digestion semble faible par rapport aux Holothuries littorales : 15 % pour le carbone, 22 % pour l'azote.

La méiofaune est extrêmement diversifiée en zone abyssale. Elle semble représenter un cul de sac de la chaîne alimentaire mais son activité sur le sédiment favorise l'activité bactérienne et par voie de conséquence aide à la fois à la minéralisation des substances azotées et à la synthèse de substances organiques utilisables par l'ensemble de la faune benthique.

Les relations énergétiques entre la matière organique du sédiment et les organismes benthiques ont été mesurées en trois stations : en zone néritique sur la Grande Vasière à 100 m de fond, dans le golfe de Gascogne par 2 100 m et à 5 000 m en Atlantique tropical sur la dorsale dans la faille Vema. Dans chaque station, la valeur calorimétrique des protéines, carbohydrates et lipides sous leur forme soluble, labile, et hydrolysable a été comparée à celle de la faune (voir tableau). Ceci montre un appauvrissement de la faune de une à vingt fois alors que celui du sédiment n'est que de un à cinq. À l'heure actuelle, nous n'avons que des hypothèses pour expliquer cette baisse de rendement : 1) Les dépenses énergétiques, liées à la recherche de la nourriture, devraient être plus importantes en milieu abyssal, du fait de la pauvreté du milieu. 2) Le rendement de la digestion semble moins bon que pour les représentants néritiques des mêmes groupes zoologiques.

PRINCIPALES CAMPAGNES FRANÇAISES EN BIOLOGIE PROFONDE

- NORATLANTE - 1969 - campagne polydisciplinaire en Atlantique Nord.
POLYMEDE - 1970-1972 - deux campagnes polydisciplinaires en Méditerranée.
WALDA - 1971 - campagne polydisciplinaire sur les côtes d'Afrique de Walvis Bay - Afrique du Sud à Abidjan.
ORGON - 1974-1978 - programme du Groupe d'étude de la géochimie organique des sédiments marins profonds.
BIOGAS - 1972-1981 - programme de campagnes de biologie dans le Golfe de Gascogne.
NORBI - 1975 - campagne Franco-Suédoise de biologie en mer de Norvège.
INCAL - 1976 - campagne Franco-Britannique d'intercalibration au large des côtes britanniques.
BIOVEMA - 1977 - exploration biologique de la faille Vema en Atlantique tropical.
WALVIS - 1978 - Exploration biologique des bassins de part et d'autre de la dorsale de Walvis Bay.
SAFARI - 1979-1981 - deux campagnes : sédimentation abyssale, faune associée, leurs relations dans l'océan Indien.
ABYPLAINE - 1981 - exploration biologique des plaines abyssales Ibérique et de Madère.
BIOCYATHERME - 1982 - partie biologique de la campagne de la « Cyana » sur les sources hydrothermales de l'Est Pacifique.



	Grande vasière 100 m	Golfe de Gascogne 2 100 m	Faille Vema 5 100 m
FRACTION SOLUBLE			
Protéines	8.3	8.1	5.2
Carbohydrates	4.2	0.9	0.7
FRACTION PARTICULAIRE LABILE			
Protéines	143.3	39.6	26
Carbohydrates	32.1	12.1	10.4
Lipides	59.1	17.3	16.1
TOTAL	248	79	58.4
FAUNE	5.04	0.59	0.35

Energie en kcal m⁻² de la matière organique contenue dans les deux premiers cm de sédiment et contenu calorique de la faune retenue par un filet de 50 µm. (Modifié de Khrapounoff, 1979).

L'échelon carnivore

Ce tableau tenu du faible rendement des « consommateurs primaires » en milieu abyssal et de leur dispersion, on pourrait s'attendre à une très faible population de carnivores. Il n'en est rien. Il existe d'abord une faune de carnivores sessiles bien développée : Mollusques bivalves Septibranches, Polychètes carnivores ou animaux piégés comme les Actinies et certaines formes de Tuniciers. Ce dernier groupe présente des adaptations à la capture de proies assez grosses, inconnues en dehors des zones profondes.



La faune vagile de carnivores nécrophages est très importante. Bien que cette faune puisse fuir les chaluts et être sous-évaluée, elle constitue une part importante de la biomasse récoltée : 34 % à 2 100 m dans le Golfe de Gascogne et plus de 50 % à 7 600 m dans la Fosse de Porto Rico, alors que l'on considère traditionnellement que l'échelon carnivore ne dépasse pas 10 % de l'échelon trophique précédent. Il est donc nécessaire de trouver une source supplémentaire de nourriture pour cette faune. L'examen du contenu stomacal des poissons abyssaux Macrouridae montre qu'une part importante de la nourriture est d'origine ba-

thypélagique. Ainsi les carnivores, surabondants par rapport aux limivores se nourriraient en partie au-dessus du fond et leur excretion augmente les apports de nourriture sur le fond, cela étaie l'hypothèse de la chaîne alimentaire verticale.

Toutes les mesures et les estimations effectuées sont exprimées en terme de biomasse. Celle-ci est faible sur le fond de l'ordre de 10 à 0,1 g m⁻², mais toutes les mesures d'activité métabolique *in situ* convergent pour montrer qu'à 4 000 m, elle est de l'ordre de 1/1 000 de l'activité en zone néritique. Il est donc probable que le « turn over » de la faune profonde est très lent.

La seule mesure directe (qui reste à confirmer) est celle de la croissance d'un bivalve provenant de 3 800 m de fond, la taille maximale de 8,4 mm était atteinte en une centaine d'années !

Deux expériences de recolonisation d'un milieu préalablement défauné ont été réalisées et leurs résultats sont contradictoires. L'équipe américaine a trouvé un faible taux de recolonisation du sédiment et au bout de 26 mois, une densité de population très inférieure aux témoins. Les expérimentations menées en France, grâce à un module autonome de recolonisation développé au COB ont donné des résultats inverses. Au bout de six mois seulement, la faune installée était cinq fois plus abondante que dans le sédiment avoisinant. Ces résultats contradictoires montrent que le problème de la vitesse de croissance en milieu profond doit encore être l'objet de nombreuses études.

La plus grande partie de l'énergie entrant dans l'écosystème benthique abyssal est consommée sur place. Une partie non négligeable est enfouie dans les sédiments sous forme de molécules non dégradables et même parfois sous formes d'acides aminés non protéiques.



Une faible partie de la matière organique du fond retourne directement à l'écosystème pélagique par l'intermédiaire de certaines larves dont le développement s'effectue dans la zone phototique : Mollusques ou Echinodermes. Une partie également de l'échelon carnivore nécrophage peut aussi servir de proie à des animaux pélagiques ou de la pente continentale. L'activité bactérienne au niveau du fond conduit à une minéralisation des produits azotés. Lorsque ceux-ci remontent en surface dans les zones d'upwelling, ils provoquent une très importante production phytoplanctonique. Ces régions sont parmi les plus productives des zones de pêche.

Les liaisons surface – benthos abyssal ne sont pas à sens unique et sont probablement plus intenses et surtout plus rapides que l'on ne supposait. Les perturbations importantes survenant dans les grands fonds pourraient se répercuter en surface dans les zones d'upwelling. Inversement, des modifications considérables de bassins fluviaux, celui de l'Amazone par exemple, pourraient modifier considérablement les conditions de vie sur les plaines abyssales. La Campagne DEMERABY au large de la Guyane a trouvé à plus de 300 milles des côtes et par 4 400 m de fond des quantités importantes de bois.

La compréhension des réseaux trophiques en milieu abyssal est donc fondamentale au moment où l'Humanité a de plus en plus tendance à considérer les zones profondes, soit comme une poubelle soit comme la grande réserve de matières premières minérales.

- Biomasse benthique : quantité de matière vivante par unité de surface existant sur le fond à un instant donné.
- Méiofaune : faune vivant enfouie dans le sédiment et en principe ne le perturbe pas. Pratiquement en milieu profond : ensemble des animaux adultes non retenus par des tamis de 250 µm de côté de maille.
- Production photosynthétique ou chlorophyllienne : synthèse de matière vivante en utilisant comme énergie l'énergie lumineuse.
- Production chémooautotrophe : synthèse de matière vivante en utilisant comme énergie l'énergie chimique.
- Bathypélagique : se dit des animaux qui vivent en pleine eau, entre la zone éclairée et le fond.
- Zone phototique : couche d'eau recevant suffisamment de lumière pour que la photosynthèse soit possible.
- Animaux limivores : animaux qui absorbent le sédiment.
- Faune sessile : ensemble des animaux fixés ou faiblement mobiles et incapables de quitter le fond.
- Faune vagile : ensemble des animaux nageurs.
- Upwelling : zone où les eaux de fond remontent en surface.

Légendes de gauche à droite : - Sipen caméra, carottier d'un mètre carré. - Mise à bord d'un chalut à perche. - Sous-échantillonage pour méiofaune, chimie, etc... dans un carottier d'un quart de mètre Carré. - Nodules polymétalliques dans un sipan.

Les récifs coralliens

Longtemps étudiés sous des aspects trop statiques, les récifs coralliens sont sous les tropiques les constructions organogènes actuelles les plus puissantes du globe. Du fait de l'évolution permanente de leurs formes et de leurs peuplements, ils figurent parmi les milieux les plus dynamiques du fond des mers.

Bernard A. THOMASSIN

Un peu d'histoire

Connus pendant longtemps des seuls navigateurs à cause des dangers qu'ils représentaient, les récifs coralliens attirèrent les naturalistes, dès la fin du XVIII^e siècle, par la richesse de leurs peuplements en poissons et en invertébrés de tous ordres, liée à la variété des formes et à la beauté des couleurs. Par ailleurs, la superficie, l'épaisseur, la morphologie variée de ces édifices coralliens intriguerent aussi tous les biologistes, géographes et géologues. Mais, en fait, si Darwin émit en 1859 une théorie sur l'origine des atolls, les études écologiques sur les récifs coralliens n'ont commencé qu'il y a une centaine d'années avec des noms célèbres : les britanniques J.D. Dana (1875), F. Wood-Jones (1902) et W. Saville-Kent (1903), mais aussi les français H. Coutière et Ch. Gravier, du Muséum national d'histoire naturelle de Paris, qui explorèrent entre 1898 et 1904 le golfe de Tadjourah, près de Djibouti, après les découvertes faunistiques et floristiques de Klunzinger et d'Erbenberg en Mer Rouge. Mais les explorations restent individuelles et il faudra attendre 1928-1929 pour que se déroule la première grande expédition pluridisciplinaire sur la Grande Barrière d'Australie, sous la direction de Sir Maurice Yonge.

Les expérimentations atomiques ont, dans un certain sens, favorisé les études sur les atolls de l'océan Pacifique, même si elles détériorent certains d'entre eux. Dès 1946, les américains étudient l'atoll de Bikini et les îles avoisinantes (Eniwetok) pour leurs explosions qui se poursuivront jusqu'en 1958. La France fera de même avec la création du Service mixte de contrôle biologique en favorisant les études dans l'archipel des Tuamotu (à Mururoa, Reao et Fangataufa notamment). Les récifs du Pacifique Central ont été bien explorés et cartographiés par les japonais, après 1918, et par les américains, surtout après 1945, pour leurs caractéristiques scientifiques mais certes aussi pour leur position stratégique.

Depuis les années 1950, les études écologiques sur les récifs coralliens n'ont fait que se développer très rapidement avec la création de nombreux laboratoires implantés sur ou à proximité d'eux-ci, et avec le développement de nombreux programmes nationaux et internationaux, dont l'Année internationale de l'océan Indien. La création, dès 1969, des premiers symposiums internationaux sur les coraux et récifs coralliens, puis la naissance, en 1979, d'une « International coral reef society » ayant son journal, attestent de ce dynamisme.

Les Français ne furent pas en reste dans ces études, avec notamment l'exploration des récifs coralliens : - de Mer Rouge et de l'océan Indien avec les campagnes de « La Calypso » ; - de Madagascar et des îles voisines, où après les recherches de Geay (1904-1907), de G. Petit (1920-1922), de A. Guilcher et R. Battistini, les chercheurs de la station marine d'Endoume, université d'Aix-Marseille, avec l'université de Tananarive, fondent la station marine de Tuléar et inaugurent, en 1961, un vaste programme qui ne prendra fin qu'en 1973, et dont l'analyse des résultats vient seulement d'être

achevée. Tandis que l'ORSTOM développe son laboratoire de Nosy-Bé, la Fondation Singer-Polignac subventionne une « Expédition française sur les récifs coralliens » (1960-1963) sur la Nouvelle-Calédonie et les îles Loyauté, dont les recherches sont poursuivies dès 1977 dans le cadre d'une convention ORSTOM-CNRS (CNRS : action thématique programmée – pays en voie de développement), et enfin les travaux en Polynésie française.

Actuellement, les chercheurs français poursuivent des études dans plusieurs régions coraliennes du globe, notamment :

- dans l'archipel des Mascareignes, ainsi que dans les îles du canal de Mozambique (Mayotte notamment) (collaboration entre le CNRS/laboratoire de « structure, fonctionnement et évolution des milieux marins » et l'université française de l'océan Indien, à la Réunion) ;
- en Mer Rouge, dans le golfe d'Aqaba (collaboration entre l'université de Nice et les universités jordanaises), ainsi que sur la côte du Soudan (collaboration entre la Maison de l'Orient méditerranéen – université de Lyon II et l'université de Khartoum) ;
- en Nouvelle-Calédonie (collaboration entre le CNRS/laboratoire de « structure, fonctionnement et évolution des milieux marins » et le centre ORSTOM de Nouméa, en association avec le Muséum national d'histoire naturelle de Paris et l'Aquarium de Nouméa) ;
- en Polynésie française (collaboration entre l'Ecole pratique des hautes études, le Muséum national d'histoire naturelle de Paris et le territoire) ;
- dans l'Atlantique tropical et les Antilles françaises (collaboration entre le CNRS/laboratoire de « structure, fonctionnement et évolution des milieux marins », l'université d'Aix-Marseille II et le centre d'enseignement universitaire des Antilles françaises).

□ Bernard A. Thomassin, chargé de recherche au CNRS, est responsable du groupe « Récifs coralliens et milieux environnants » du CNRS (LA 41), à Marseille ; après avoir travaillé sur les formations récifales de Madagascar et du canal de Mozambique, ainsi qu'en Polynésie française, il est co-responsable avec le professeur Jean-Marie Pérez du programme « Ecosystèmes récifaux et lagunaire de Nouvelle-Calédonie » (Action thématique programmée « Pays en voie de développement » du CNRS, convention ORSTOM, CNRS, DGRST).

Mais pourquoi toutes ces recherches ?

Parce que la communauté scientifique internationale, mais surtout les gestionnaires des ressources naturelles, les économistes et les politiques ont pris conscience de l'importance et de la richesse présente et potentielle des récifs coralliens. En effet, ces formations où coexistent une flore et une faune abondantes et variées constituent un écosystème modèle dans lequel chaque espèce a sa place, si bien que leur altération ou leur destruction ont des effets catastrophiques en cascade sur l'environnement côtier, avec comme corollaire un appauvrissement de la pêche, et donc une série d'impacts sur la société humaine. A côté de l'intérêt porté aux études récifales comme types des grands écosystèmes côtiers, on s'attache aussi à ces études pour leur intérêt en paléogéologie. En effet, les récifs coralliens ne datent pas d'hier et leurs dépôts sont liés à certaines couches pétrolières.

Tout corail n'est pas coraux

D'après la terminologie française, un récif corallien est une construction édifiée essentiellement par des organismes à squelette généralement calcaire, vivant plus ou moins en coalescence, s'élevant du fond en eaux peu profondes en créant une anomalie morphologique. Ce sont des organismes connus sous le nom d'Anthozoaires, les coraux et leurs commensaux, qui construisent les récifs coralliens actuels.

Mais sous le terme de coraux, on regroupe malheureusement, dans le langage commun, plusieurs types d'organismes à squelette dur ou mou appartenant à différents ordres et classes des Cnidaires : Anthozoaires et Hydrocoralliaires. Tous ont comme point commun d'être formé d'un ou plusieurs polypes, sorte de petite gastrule dont l'ouverture, la bouche, est entourée d'un ou plusieurs cercles de tentacules. Ainsi ne sont pas de vrais coraux, les « coraux mous » ou Alcyonaires, ni des Gorgonaires comme le « corail rouge ou rose » (genre *Corallium*) ou les Isididae profondes, ni divers Antipathaires (g. *Antipathes*) appelé « corail noir », ni des Zoanthaires (g. *Parazanthus*) nommés « corail or », tous utilisés en joaillerie. Les coraux, proprement dits, ont un squelette calcifié et rigide. Ils comprennent les Madréporaires ou Scléractiniaires, qui possèdent une sy-

métrie hexagonale (fig. 1) ; les Millépores ou « coraux de feu » dont la structure et le développement diffèrent profondément de ceux des Madréporaires ; les Styloceratides, qui recherchant l'ombre, vivent sous les surplombs littoraux ou à grande profondeur, et enfin certains représentants des Octocoralliaires, comme les espèces des genres *Tubipora* et *Heliofungia*, dont le « corail bleu ».

Les polypes des coraux coloniaux ne sont pas isolés, mais reliés les uns aux autres et dans chaque loge (ou calice) qui les abrite, des cloisons calcaires soutiennent les chairs. Les structures



Fig. 1 - Buissons d'*Acropora* excréant du mucus sous l'effet d'une sédimentation fine importante. Lagon de Nouméa, en arrière du récif Abord, 3 m de profondeur. (Photo B. Thomassin).

compliquées de ce squelette ont pour rôle de consolider ces constructions fragiles. Ce squelette chez les Madréporaires est à base de carbonate de calcium (98 à 99,7 %) sous forme de fibres d'aragonite. C'est lui qui sera fossilisé ou détruit par divers processus pour former des sédiments biodétritiques dont l'ensemble formera un récif corallien.

Il existe deux types biologiques fondamentaux de Madréporaires : suivant qu'ils vivent associés, ou non, avec une algue unicellulaire dans leurs tissus. Cette algue est un Dinoflagellé - *Gymnodinium microadriaticum* (Freudenthal) Taylor - communément appelé « zoanthelle ». Si certains coraux n'en possèdent jamais, d'autres en possèdent très peu, et d'autres en possèdent ou non selon leur mode de vie (notamment quand ils vivent sous une faible luminosité). Généralement, les Madréporaires qui ne possèdent pas ces al-

gues n'ont pas besoin de la lumière pour vivre et ils se répartissent dans les grottes sous-marines, sous les pierres, à des profondeurs pouvant atteindre 6 000 m, et tolérant des salinités et des températures assez basses. Au contraire, les Madréporaires associés aux « zoanthelles » profitent de cette symbiose. Les polypes fournissent aux algues un support, du gaz carbonique provenant de leur respiration (environ 2/3), ainsi que certains produits métaboliques (des phosphates et des acides aminés) ; en échange, les algues, par leur assimilation chlorophyllienne produisent des substances nutritives simples (glycerol, glucose et acides aminés) qui sont utilisées par les polypes pour couvrir une partie de leurs besoins énergétiques. Les algues symbiotiques recyclent donc des déchets des coraux. De plus, les « zoanthelles » stimulent directement ou indirectement la calcification du squelette des polypes, d'où la compétence des Madréporaires contenant ces algues à pouvoir édifier, avec l'aide d'autres organismes qui cimentent l'ensemble, ces constructions organiques considérables que sont les récifs coralliens.

Mais ces Madréporaires constructeurs, ou hermatypiques (du grec herma = appui, récif) exigent pour leur développement des conditions écologiques strictes.

Vivant en association avec ces algues photophiles que sont les « zoanthelles », qui nécessitent pour leur photosynthèse un certain flux lumineux solaire, leur distribution en profondeur se limite au maximum à 60-100 m dans les eaux les plus transparentes, mais en général leur développement est « normal » jusqu'à 25-30 m de profondeur dans les eaux continentales.

Ils ne prospèrent que lorsque la température des eaux est toujours supérieure à 20°C en moyenne (entre 20 et 30°C suivant les saisons) encore qu'ils tolèrent des abaissements momentanés jusqu'à 18°C. De ce fait, les récifs coralliens ne se répartissent qu'entre les parallèles 35° de latitude Nord et 32° de latitude Sud, et ne sont-ils pas présents en tous points de cette zone tropicale, en raison des grands courants d'eaux froides et des remontées d'eaux froides profondes (upwellings) sur certaines portions des bordures continentales notamment (sur les côtes Nord-Ouest et Sud-Ouest africaines, sur la côte des Somalis à l'Est, par exemple).

Ils ne supportent pas les eaux saumâtres, non plus qu'une trop forte teneur en particules fines en suspension (limons ou sables), d'où leur absence à proximité de tous les estuaires, notam-

ment ceux des grands fleuves indiens (Indus et Gange, par exemple), et sur les côtes à forte déflation sableuse vers la mer.

Bien que la matière organique produite par les « zoothanzelles » soit la source essentielle de ces animaux, ils ont néanmoins d'autres besoins. Ils sont carnivores et consomment du zooplancton, des détritus d'origine animale, des bactéries capturées grâce à leurs tentacules ou bien à l'aide de filets muqueux qu'ils ingèrent ensuite. Ils peuvent aussi se nourrir en assimilant par leur épiderme les substances organiques dissoutes dans l'eau de mer. Certains coraux combinent ces deux types de nutrition ; tandis que d'autres utilisent l'un ou l'autre. Ce serait la diversité de ces régimes alimentaires qui permettrait la diversité des Madréporaires dans le milieu récifal.

L'édification des récifs coralliens

Les Madréporaires ne sont pas les seuls à édifier le récif. Ils peuvent être aidés, voire remplacés, quand les conditions deviennent extrêmes (agitation de l'eau,

diminution de la lumière du fait de la profondeur ou de la turbidité des eaux, augmentation des sels nutritifs, exondations prolongées), dans cette édification par d'autres producteurs de calcaire : ainsi des algues rouges Corallinées peuvent aller jusqu'à former des récifs algues ou des crêtes algales sur les récifs coralliens très battus. Sans la participation des algues calcifiées qui cimentent des colonies et les fragments entre eux, sans celle des formes fixées des Foraminifères, des vers Serpulides, des Bryozaires et des Spongiaires de la cryptofaune des cavités, qui cimentent et comblient les vides, sans le piégeage des sédiments et des détritus organiques, sans les limons des excréments, les Madréporaires ne suffiraient pas à bâtir un récif.

En outre, nombreux d'agents destructeurs interviennent dans ces constructions organogènes et sont nécessaires aussi à l'édition d'un récif. Ainsi, des agents physiques tels les effets hydrodynamiques des vagues, les tempêtes et les cyclones brisent les colonies coraliennes, arrachent des portions de concrétions, voire même des blocs de récif de plusieurs tonnes (jusqu'à 200 t), et les transportent sur plusieurs dizaines de mètres.

Les remparts de blocs arrachés au front récifal se désagrègent et fournissent une part importante des sédiments rencontrés sur la pente externe ou sur le platier de certains récifs. Les courants de décharge des vagues et des marées, qui entraînent les sédiments (des blocs aux sables), soit vers l'avant, soit vers l'arrière du récif. Les sables et les cailloux, auxquels s'ajoutent les excréments, sont répandus vers les zones sous-le-vent (platier, pente interne), enfouissant les colonies vivantes et combiant progressivement les dépressions internes ou le lagon (fig. 2).

De leur côté des agents biologiques agissent de façon destructrice, dégradent et creusent les parties vivantes et mortes des colonies coraliennes ou des concrétions (Algues filamentées, Spongiaires telles les Cliones ou des *Spirastrella*, Vers divers comme des Siponcles et des Annélides polychètes qui creusent ou réadaptent à leur taille les trous déjà creusés pour s'en faire une loge où vivre, Mollusques lithophages qui perforent le récif). Il y a aussi des brouteurs d'algues ou de concrétions tels des Mollusques gastéropodes ou polyplacophores, des Echinides réguliers ou des Poissons herbivores (« chirurgiens », Acanthuridae,

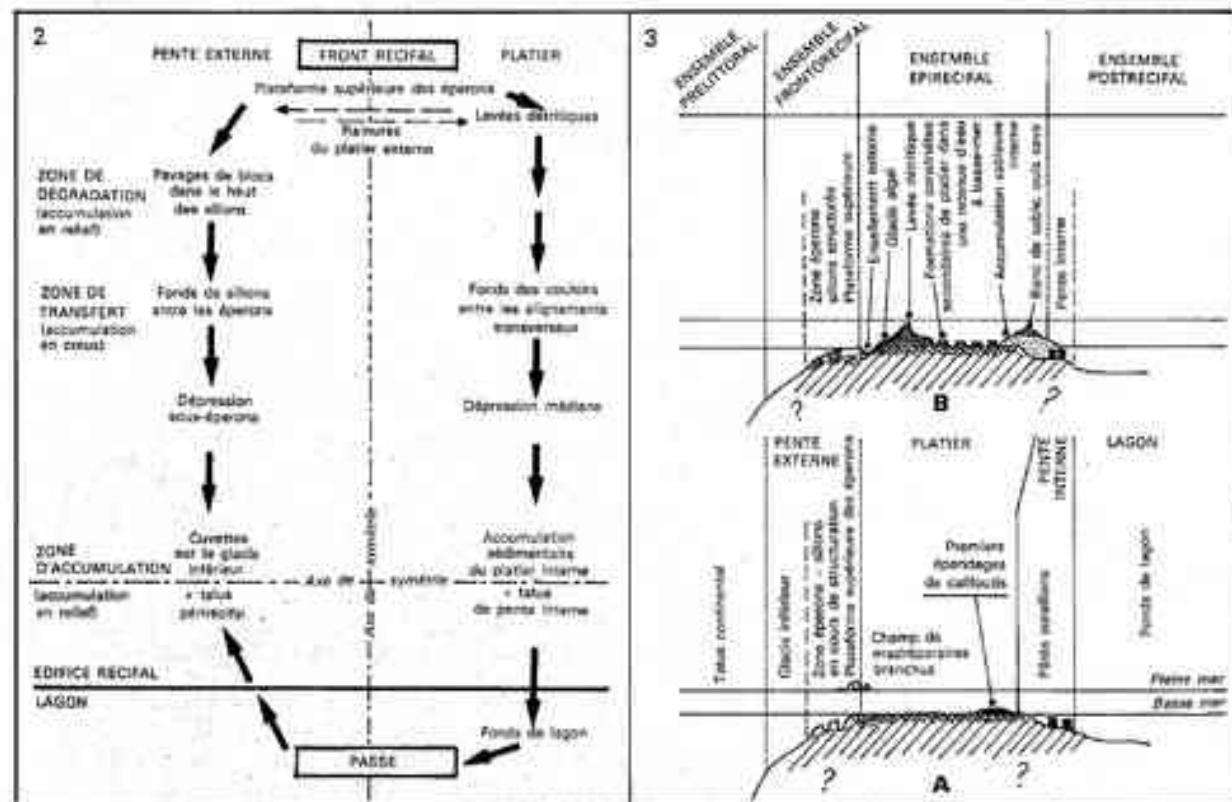


Fig. 2 - Schéma de mise en place des sédiments coralliens sur la barrière récifale de Tuléar (Madagascar), sous l'effet des vagues et des courants de marée. (d'après Thomassin, 1978).

Fig. 3 - Schéma de mise en place des principales figures d'accumulation, de construction et d'érosion sur une barrière récifale de la région de Tuléar (Madagascar) qui atteint les niveaux intertidiaux. A, récif jeune venant d'émerger aux basses-mers de vives-eaux ; B, récif mature.

ou « perroquets », Scaridae) ; il y a enfin les prédateurs de polypes de Madréporaires (tels certains Mollusques gastéropodes, des Echinides réguliers ou des Astérides, dont les *Calcaraster* et les *Acanthaster*, ou certains Poissons spécialisés).

Seule la partie externe du récif, celle qui atteint la surface, est vraiment active et permet la progression du récif vers le large. Au fur et à mesure que son niveau s'élève, atteint la surface puis exonde de plus en plus longtemps lors des basses mers ou des séches, on assiste sur l'édifice récifal à des relais de peuplement. On observe ainsi, en avant des platières, une succession de peuplements de Madréporaires, de peuplements d'algues (calcifiées et molles), de peuplements de Mollusques bivalves puis de Gastéropodes fixés ; sur l'accumulation sédimentaire interne, superposée au peuplement initial de madréporaires (comme les *Acropora branched*) et aux remblais détritiques de la pente interne, c'est une succession d'herbiers denses puis de pelouses de plantes à fleur (*Thalassodendron*, *Cymodocea*, *Halodule* et *Halophila*) (là où elles existent), de bancs de sable, puis de dunes hydrauliques dont les cayes submersibles, qui deviennent

émergées si l'apport de matériaux est suffisant et qui sont alors colonisées par des peuplements terrestres (fig. 3).

Les types de constructions récifales

Il existe plusieurs types de constructions récifales. Le banc corallien, qui croît sur un haut-fond sans encore atteindre le niveau de la mer ; il peut pousser à partir des sommets de volcans ou de plateaux submergés, ou être des portions de récifs qui par des jeux tectoniques ont été inimergées.

L'atoll, le récif-barrière (fig. 4) avec ses récifs de lagon de forme plus ou moins arquée (fig. 5), le récif frangeant, sont les principaux types de récifs atteignant la surface de la mer, et parfois dépassant lorsqu'il s'est formé une île sablonneuse, ou caye, ou encore des successions d'îles rocheuses, comme les « motu » des atolls du Pacifique (anciennes relicttes de constructions de platières édifiées lorsque le niveau marin était plus élevé de 3-4 m, au Flandrien).

Les différents facteurs historiques et écologiques induisent une zonation des récifs coralliens ; on peut la définir par grands types de biotopes ou encore par

ensembles récifaux, d'où l'importance du système photique et de la production primaire. Par ailleurs, il ne faut jamais oublier que les récifs coralliens sont construits et secondairement habitées par des organismes vivants ; aussi leur morphologie et leurs peuplements varient-ils au cours du temps et ils passent successivement par des stades « jeunes », « en équilibre » ou « mûrs » et « sénescents », selon les termes d'une évolution d'abord progressive puis régressive.

L'écosystème récifal : à la recherche de la lumière

L'ensemble récifal actuel est dominé par la végétation photosynthétique. Ce sont : les algues calcaires qui recouvrent d'un vernis tout substrat dur mort, les cimentent entre eux, les algues Chlorophycées présente dans le squelette des Madréporaires, les algues symbiotiques, dont les « zoanthelles » ; ces dernières vivant dans les tissus de Madréporaires, mais aussi dans ceux des Zoanthaires, de certaines Eponges, d'Ascidies, et de certains grands Foraminifères qui pullulent dans les lagons. Ce sont encore des algues macroscopiques



Fig. 4 – Barrière récifale en cours de construction, n'ayant pas encore atteint le niveau des basses-mers de vives-eaux (profondeur inférieure à 4 m) : la structure en éperons-sillons de la pente externe est en cours de structuration (bas de la photographie), tandis que la zone médiane qui formera le platier est déjà bien individualisée ; une zone éperons-sillons de pente interne (haut) s'est construite sous l'effet des vagues du lagon. Bordure Est du Grand Récif Sud, Nouvelle-Calédonie. (Photo B. Thomassin).



Fig. 5 – Récif de Ndo (b), Grand Récif Sud, Nouvelle-Calédonie : récif de lagon composite formé par un récif arqué (vers le bas) et par un récif plateforme à caye boisée (en haut), réunis en isolant des lagons enclavés (« T-base reef »). (Photo B. Thomassin).

ques molles, des algues microscopiques, qui vivent à la surface de la roche corallienne ou des sédiments (Cyanophycées filamentueuses, Diatomées benthiques, etc...), des herbiers de Phanérogames marines qui colonisent et envahissent les platiers et les lagons au fur et à mesure de leur ensablement. Aussi l'importance des processus photosynthétiques explique-t-elle pourquoi la dynamique récifale est liée au flux de lumière reçue ; de ce fait, elle atteint son optimum dans l'Etage infralittoral.

La productivité primaire benthique brute, atteint entre 2 et 10 gC m⁻² j⁻¹. Ainsi les écosystèmes coralliens figurent parmi les écosystèmes aquatiques ou continentaux les plus productifs de la planète. Ces valeurs contrastent avec celles de la productivité brute des eaux au large des récifs qui sont approximativement deux cents fois moindres.

Les algues, principalement celles qui se trouvent sur les platiers des atolls, jouent encore un autre rôle, d'une importance considérable ; celui de pourvoyeur de matières azotées. En effet, les atolls étant entourés d'eaux océaniques, pauvres en sels nutritifs dissous, ne devraient pas présenter de vie végétale et animale aussi luxuriante, puisque l'azote nécessaire à la synthèse des protéines est très peu abondant dans ces eaux. Mais, des Algues filamentueuses, principalement des Cyanophycées, qui vivent sur les portions émergeantes du platier récifal, fixent l'azote atmosphérique à des taux comparables à ceux employés en agriculture industrielle sur terre. Elles relarguent 40 à

60 % de cet azote de l'air sous forme d'acides aminés et de peptides, qui sont alors assimilés par le plancton aussi bien que par tous les Invertébrés vivant sur le récif. Ce plancton végétal peut se développer et servir de nourriture aux herbivores, à leur tour consommés par les carnivores.

Mais le fait que la base du réseau trophique soit sous la dépendance du flux lumineux, entraîne une lutte territoriale incessante pour capter celui-ci, avec de nombreuses adaptations fonctionnelles. Les concurrents principaux des Madréporaires sont ces algues filamentueuses et molles et les algues calcaires, qui tentent de les recouvrir. Ainsi, les Rhodophycées Corallinacées prédominent quand l'agitation de l'eau est telle qu'elle gêne la croissance des coraux, avec la formation sur les fronts externes des récifs de « crête algale » rouge-rose. Ce sont encore elles, avec d'autres espèces, qui se développent quand la lumière devient insuffisante pour les Madréporaires dans les cavités ou sur les surplombs, sur les dalles profondes (30-50 m) ou dans les lagons turbides, avec formation de thalles calcifiés (maërl ou faux-maërl) en nodules ou lames (Peysonelliacées). Ce sont des Algues brunes ou (et) vertes qui envahissent encore les platiers récifaux lorsque les apports de sels nutritifs, à proximité des côtes, sont suffisants, ou que des exondations ou des échauffements des eaux se produisent et viennent gêner la croissance des coraux.

Si sur le récif ne prospérait pas tout un compartiment de brouteurs de végétaux (Vers divers, Gastéropodes et Chiots, Crustacés divers, Oursins ré-

guliers et Poissons herbivores), celui-ci serait envahi par ces végétaux et alors disparaîtrait par accumulation graduelle de matériel organique. C'est ce que l'on observe dans les stades de dégradation des récifs, notamment ceux situés près d'apports d'eaux trop riches en sels nutritifs et autres métabolites, et de plus turbides ; cela se produit naturellement en fonds de baie, aux abords des embouchures des rivières, ou artificiellement, par la faute de l'Homme, comme sur des récifs situés à proximité de remblais, d'émissaires urbains ou industriels. Ainsi, dans l'île d'Oahu (Hawaï), les coraux de la Kaneohe Bay dans laquelle se déversaient des égouts urbains sont morts, recouverts par une algue verte (*Dictyosphaeria cavernosa*) qui a atteint des tailles gigantesques, de l'ordre du m², alors que naturellement elle n'est pas plus grosse qu'une mandarine !

Cette prédominance des processus photosynthétiques entraînent aussi des variations nyctémérales d'une très grande amplitude des constituants physico-chimiques du milieu qui induisent des comportements particuliers des animaux, sous l'influence de l'obscurité, certes, mais aussi d'une élévation de la teneur en gaz carbonique des eaux confinées (le pH de l'eau à la surface des platiers devenant acide la nuit). On note alors l'importance des migrations de nombreuses espèces animales vivant dans les cavités du récif, entre les végétaux et dans les sédiments ; ces espèces se tiennent alors à la surface des substrats ou vont nager dans l'eau, en profitant parfois pour se nourrir. En revanche, elles sont alors

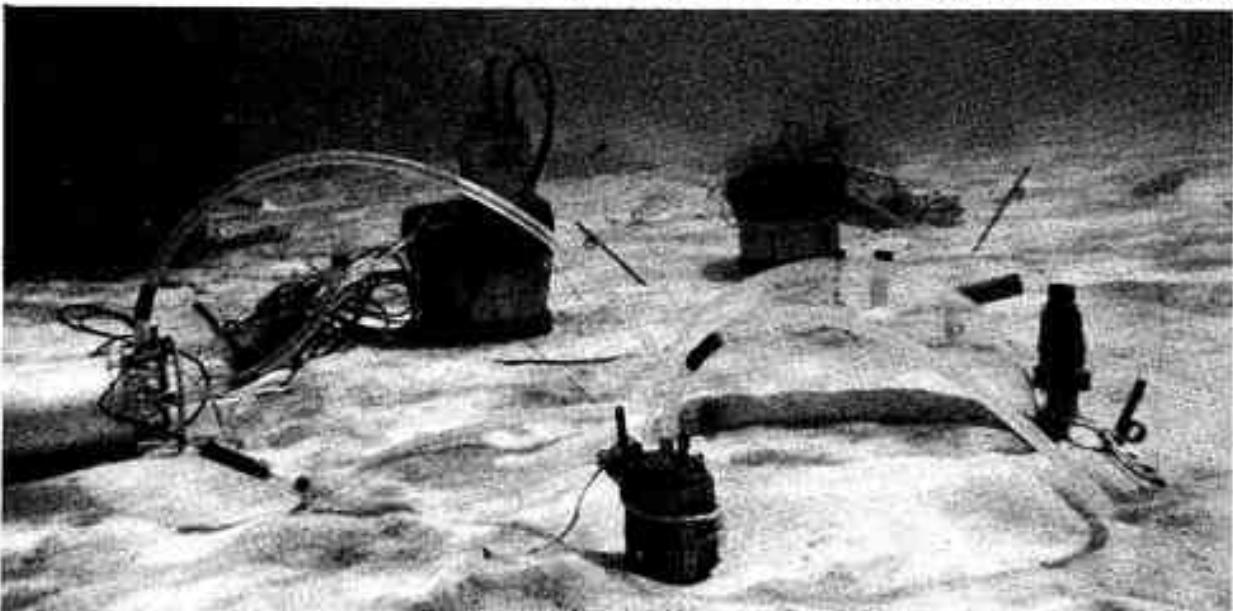


Fig. 6 - Expérimentation en milieu récifal : mesures *in situ* de la production et de la consommation d'oxygène dissous, en fonction de la température et de l'irradiance, d'un fond sableux de lagon, en arrière du récif Abord, Nouvelle-Calédonie. (Photo B. Thomassin).

plus accessibles aux carnivores dont elles deviennent la proie. Les poissons herbivores se nourrissent généralement le jour et dorment la nuit, tandis que les carnivores, même s'ils sont actifs le jour, le sont surtout la nuit.

Une usine à détritus vite recyclés

Une autre caractéristique propre à l'écosystème corallien, c'est sa production importante de détritus. Celle-ci a plusieurs origines. En premier, on note la production de mucus et d'agrégrats muqueux par les Madréporaires, mais aussi par les Algues molles, les « coraux mous » ou Alcyonaires, les Mollusques et bien d'autres Invertébrés vivant dans cet écosystème. Cette production est notamment importante quand les conditions de milieu deviennent sévères et difficiles.

Ces mucus et agrégats sont composés de substances nutritives avec de fortes teneurs en azote non protéique, présence de glycolipoprotéines où dominent des acides glutamique et aspartique et 35-45 % de lipides (notamment sous forme de phospholipides et de monoacylglycérols). Ces agrégats se chargent en bactéries et en protistes qui s'y développent, formant ainsi une production paraprimaire et sont consommés par tout un peuple d'invertébrés qui habitent le récif ou les lagons adjacents. D'autres sortes de détritus résultent de la destruction partielle ou totale des organismes, végétaux et animaux, sous l'effet des agents érosifs, mécaniques ou biologiques.

Ainsi, si le récif est approvisionné en carbone par la photosynthèse et en azote par les organismes hétérotrophes, il compense le fréquent déficit en phosphore par un recyclage rapide de cet élément, de même que de nombreux métabolites sous forme dissoute ou particulaire. Il a été ainsi démontré que la biomasse totale sur l'atoll d'Eniwetok était renouvelée 12,5 fois par an !

La richesse et la diversité spécifique

La diversité des espèces marines vivant dans les récifs coralliens est très élevée. Elle atteint ses valeurs les plus fortes dans les récifs des complexes coralliens continentaux ou des très grandes îles (plus de cinq mille espèces dans les écosystèmes récifal et subrécifal de la région de Tuléar, à Madagascar (1); près de dix mille espèces dans ceux du Sud-Ouest de la Nouvelle-Calédonie (2)). Elle décroît progressivement dans

les îles continentales, puis dans les îles hautes océaniques, les récifs d'atolls et surtout d'atolls fermés. Ceci est dû à une diminution de la variété des récifs et des biotopes, mais aussi d'une diminution de la valeur nutritive des eaux baignant ces récifs, sous l'influence du fameux « effet d'île », ainsi que de l'âge des formations récifales, de leur histoire récente, et de leur proximité des centres de distribution biogéographique des espèces.

L'une des conclusions fondamentales auxquelles ont abouti les études pluridisciplinaires sur les grands types de peuplements des récifs de la région de Tuléar (peuplements photophiles à dominance d'Anthozoaires, peuplements sessiles sciaphiles, cryptofaune vagile de substrats durs, peuplements des sédiments biodétritiques, peuplements de Poissons), est que chacun d'eux n'est constitué que par une seule Biocénose typiquement « récifale » ou « corallienne », qui présente différents aspects selon les biotopes récifaux et les conditions ambiantes propres à chacun d'eux. Ces cinq biocénoses fondamentales caractérisent l'écosystème récifal proprement dit, qui correspond au climax des mers tropicales, dans l'Etage infralittoral. On remarque que les optima de ces biocénoses se distribuent de l'avant vers l'arrière de cet écosystème. Les peuplements profonds des glaciages inférieurs de la pente externe (20-60 m) caractérisent eux l'écosystème subrécifal qui fait suite sur le bas de la pente à l'écosystème récifal. Les peuplements des herbiers de Phanérogames récifaux apparaissent comme des stades pionniers de l'installation de peuplements littoraux, en intrusion dans l'écosystème récifal.

Donc, toute côte tropicale suffisamment stabilisée, non soumise à des apports alluvionnaires ou éoliens importants, ainsi qu'à des arrivées d'eaux froides, doit présenter des formations récifales plus ou moins développées selon la largeur du plateau insulaire ou continental et son ancienneté. Toutefois ces récifs coralliens, qui couvrent actuellement 6.10^5 km^2 sur les côtes tropicales, et représentent un écosystème important à l'échelle du globe, présentent des caractères communs que les recherches actuelles tentent de définir, mais ils sont cependant différents d'un endroit à l'autre.

Les récifs coralliens, outre le rôle de « paradis » pour la flore et la faune marine, encore que la vie n'y soit qu'une infatigable compétition pour s'y faire une place

où vivre, pour ne pas être mangé par plus gros ou plus petit que soi, représentent au niveau du globe un potentiel pour les pêcheries de l'ordre de $6.10^9 \text{ kg./an}^{-1}$, c'est-à-dire à peu près 9 % des prises des pêcheries commerciales océaniques. Mais ils jouent aussi très souvent le rôle de brise-lames à la côte, protégeant celle-ci, notamment le long des barrières continentales ou en bordure des îles hautes ; et dans bien des endroits du monde protègent les ports installés dans les lagons. Ainsi font-ils partie du complexe côtier sous influence terrigène et leur économie est-elle difficilement analysable, si l'on ne tient pas compte des herbiers littoraux, des plages sablo-vaseuses littorales et des mangroves côtières, comme par exemple en Nouvelle-Calédonie, aux Philippines. Leur complexité est dans ce cas maximum et leur équilibre n'est que plus fragile.

De ce fait, ils nécessitent encore de nombreuses recherches (fig. 6), en même temps qu'une gestion saine qui implique : la lutte contre leur dégradation par les divers types de « pollution », la rationalisation de la pêche et des collectes de coquillages ou d'autres invertébrés (dont les coraux) et la création de parcs sous-marins, mais qui offre aussi divers types de valorisation dont le tourisme et certaines possibilités d'élevage.

(1) d'après les travaux du groupe « Récifs coralliens et milieux environnantes », CNRS/Laboratoire « structure, fonctionnement et évolution des milieux marins », Marseille.

(2) d'après P. Bouchet, OCESTOM/Laboratoire « malacologie et biologie des invertébrés marins », Muséum national d'histoire naturelle, Paris.

BIBLIOGRAPHIE

- R. Benthel et al. Éléments de terminologie indo-pacifique. *Téphys*, 7 (1), 1975.
Th. Goros, N. Goros et Th.J. Goros. Coraux et récifs coralliens. Pour la science, (24), octobre 1979.
M. Hamelin-Vivien, M. Peyrot-Clausade, R.A. Thomasset, P. Vassour. Biocénoses des récifs coralliens de la région de Tuléar (SW. de Madagascar) : résultats synthétiques. *C.R. Acad. sc. Paris*, (sér. II) (sous presse).
J.B. Lewis. Processes of organic production on coral reefs. *Mol. Rev.*, 52, 1977.
J. Picard. Les écosystèmes benthiques des plateformes carbonatées actuelles : définitions et délimitation, successions et biotopographie. *Diss. Lab. Géol. Paléon.*, Université Provence, Marseille (CNRS/RCP 310), (11), 1980.
H. Schumacher. L'univers incassé des coraux. Ellerier-Sequoia, Paris-Bruxelles, 1976.
A. Sournia. Analyse et bilan de la production primaire dans les récifs coralliens. *Ann. Inst. océanogr.*, Paris, 53 (1), 1977.

La zone côtière

Les zones côtières sont des milieux à fortes productivités biologiques dont l'activité humaine est très importante : une approche pluridisciplinaire est indispensable au développement rationnel de ces zones.

Jean-Marie MARTIN

La zone côtière n'est pas seulement la frontière naturelle la plus facile à repérer sur une carte de géographie. C'est aussi la plus complexe des interfaces de l'océan, celle où l'on observe le mélange entre l'eau douce des fleuves et l'eau de mer, et le contact entre l'océan et le rivage. Les zones côtières présentent des aspects variés. Certains sont relativement simples, comme les côtes sableuses ou les falaises rocheuses. Dans d'autres cas, ils correspondent à des formes complexes, comme les estuaires, les deltas et les lagunes, accompagnées d'écosystèmes tout aussi compliqués (marais maritimes, mangroves tropicales...). On considère généralement que la zone côtière s'étend vers le large jusqu'aux confins du plateau continental qui représente la limite de la zone privilégiée d'interactions entre continent et océan.

La connaissance de l'interface entre les continents et les océans est un objectif de recherche fondamentale, qu'il est indispensable d'atteindre pour comprendre le fonctionnement global du système océanique. Mais, d'une manière plus immédiate, cette connaissance présente un intérêt socio-économique. Au-delà de la diversité morphologique des côtes, il est possible de faire deux remarques générales :

- les zones côtières sont, en général, des milieux à forte productivité biologique, où se reproduisent et se développent de nombreuses espèces marines. La zone des 200 milles marins autour des côtes est celle où sont effectuées 95 % des captures de la pêche française.

- en outre, les activités humaines sont fortement concentrées dans les zones côtières, d'une part pour exploiter leurs ressources propres, mais aussi en rai-

son du développement de ces lieux d'échange humain et de transbordement des marchandises que sont les ports. Sept des dix plus grandes agglomérations du monde sont situées en bord de mer, 80 % des hommes habitent à moins de 50 km d'une côte. Les effets de ces activités humaines variées et souvent concurrentes sont importants, en particulier dans les estuaires et les lagunes, dont il convient donc de connaître avec précision, les ressources et les capacités d'acceptation.

Ces diverses raisons expliquent la création de programmes de recherches pluridisciplinaires dans plusieurs pays, parmi lesquels le Groupement de recherches coordonnées « Interactions continent-océan » du CNRS.

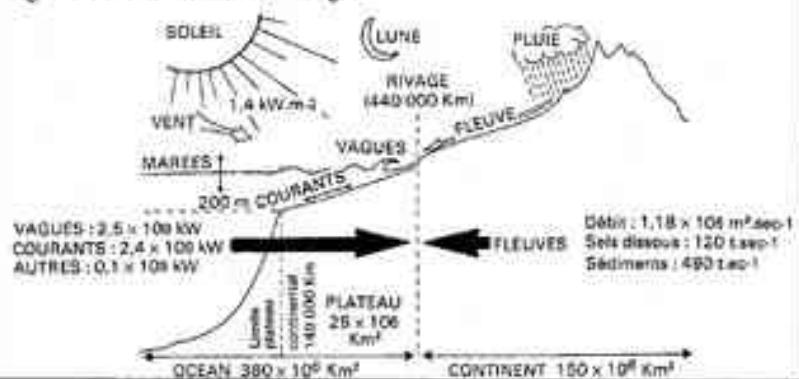
La marée, les vagues et les courants

Une première approche des zones côtières, conduit à l'analyse des flux d'énergie et des mécanismes physiques qui les gouvernent. Les grandes lignes en sont

connues, malgré l'insuffisance de nos connaissances sur la mesure des courants et des circulations résiduelles à long terme. Les énergies en jeu sont importantes (voir encadré).

Dans la zone côtière, le rôle prépondérant appartient à l'énergie des courants de marée (alors que ceux-ci ne dissipent que très peu d'énergie au-dessus des grands fonds de la haute mer). En effet, les phénomènes physiques dus au contact avec la terre l'emportent alors sur le mouvement de masse induit par l'océan. Ces phénomènes dominent jusqu'à une profondeur d'une centaine de mètres, et s'étendent parfois à l'intérieur des terres, par l'intermédiaire des estuaires (jusqu'à 150 km pour la Seine et l'ensemble Gironde-Garonne). Ils varient, parfois brutalement, selon les configurations des zones côtières : hauteur d'eau, relief et nature du fond, apports d'eau douce, influence du large... Ils varient aussi dans le temps, selon les conditions marines, fluviales et météorologiques, dont les périodicités sont indépendantes.

Fig. 1 - Flux de matière et d'énergie.



L'ENERGIE DES VAGUES ET DES MAREES

Les vagues sont dues à l'interaction du vent avec la surface de l'océan. Leur énergie globale est estimée à $2,5 \times 10^{12}$ kW.

A titre d'exemple, une vague de 3 m de haut correspond en moyenne à une énergie de 100 kW/m de crête.

Les courants de marée, dus à l'attraction lunaire, représentent une énergie globale sensiblement équivalente ($2,2 \times 10^{12}$ kW).

□ Jean-Marie Martin est maître de recherche au Laboratoire de géologie de l'Ecole normale supérieure, et responsable du GRECO « Interactions Continent-Océan » (ICO).

D'une manière plus précise, la recherche s'intéresse aux phénomènes dynamiques dont les zones côtières sont le siège. L'examen de la continuité des volumes d'eau déplacés et la mesure des énergies montrent ainsi que la diminution des profondeurs s'accompagne d'une augmentation des courants. La dissipation de l'énergie des vagues et des marées dans la zone côtière se produit sous diverses formes : réflexion des vagues, turbulence, courants, érosion et transport des sédiments. On estime à 20×10^{15} g/an la quantité de sédiments ainsi érodés : ce chiffre est du même ordre de grandeur

que celui des apports de matières par les fleuves ($15,5 \times 10^{15}$ g/an de sédiments et $3,8 \times 10^{15}$ g/an de sels dissous).

Les mécanismes de circulation des eaux sont donc, dans les zones côtières, d'une complication qui correspond à l'importance des énergies mises en jeu (voir encadré).

Sur le littoral français de l'Atlantique, et plus encore dans la Manche, cette circulation des eaux est induite essentiellement par la marée ; les courants dits généraux ont une influence inférieure à celle de la marée ou des vents. Les eaux côtières présentent

ainsi des propriétés différentes de celles du large. On peut mesurer le « temps de résidence » (ou de « renouvellement »), compris entre quelques mois et quelques années, qui est le temps nécessaire à leur remplacement par des eaux venant du large ou d'autres secteurs côtiers.

Les processus chimiques

Les caractères des zones côtières ont une influence sur les processus chimiques. Cette influence se remarque avant tout dans les estuaires, zone de mélange entre l'eau des fleuves et l'eau de mer. La concentration de l'eau des fleuves en éléments dissous est généralement faible, sauf pour les métaux de transition et les éléments nutritifs (N, P, C, Si). Ces derniers favorisent dans les estuaires ou à proximité, où il s'ajoutent à ceux apportés par la remontée des eaux profondes ou qui diffusent à partir du sédiment, une production primaire importante, supérieure à la demande des organismes consommateurs. Les processus de métabolisme et de minéralisation de cet excès de matière organique sont une source importante d'énergie chimique, qui contribue aux réactions physico-chimiques observées dans les zones côtières.

L'étude de ces réactions suppose la mesure des concentrations totales en éléments chimiques. C'est un problème ardu, parfois non résolu, pour les éléments à l'état de traces (concentration inférieure à $1 \mu\text{g/l}$). Ainsi, la décroissance des concentrations moyennes en plomb observée depuis un demi-siècle est due en réalité à l'amélioration des techniques de prélevement, de conservation et d'analyse. L'analyse des formes physicochimiques des éléments chimiques permettra par exemple de comprendre le rôle des polluants, et leur toxicité envers les organismes vivants. Les dangers du mercure sous forme organique (méthyl ou alkyl) sont bien connus. Le cuivre et le zinc, quant à eux, sont beaucoup plus toxiques sous leur forme ionique. L'identification et le dosage des métabolites secondaires (certains amino-acides halogénés, des nucléotides et stéroïdes modifiés, des terpènes...), qui font appel à des techniques très élaborées, peuvent avoir des applications dans le domaine de la santé, en raison des propriétés bactéricides, hypotensives ou antitumorales de certains d'entre eux.

Les réactions chimiques qui se produisent dans les zones côtières sont, pour la plupart, connues : elles sont de même nature que celles de la haute

LES MECANISMES DE CIRCULATION DES EAUX

L'interaction des vagues entre elles, avec les courants ou le fond, entraîne des courants de fond dirigés vers le large (transport des sédiments sur le plateau continental).

L'interaction des vagues perpendiculaires à la côte avec celles qui se déplacent le long de la côte, peut entraîner la naissance de zones de « rip-currents », avec formation de cellules horizontales (dispersion des nutriments et des apports fluviaux, notamment des polluants, sur une longue distance).

Le vent peut être à l'origine du phénomène classique de remontées d'eaux profondes, riches en nutriments (« upwelling »).

Les courants qui se déplacent dans les canyons sous-marins peuvent, lorsque leur énergie est suffisante, engendrer des courants de turbidité, véritables « masses boueuses », capables de sectionner les câbles sous-marins.

LES ESTUAIRES : UN PIEGE A SEDIMENTS (« BOUCHON VASEUX »)

Les estuaires sont des lieux d'interaction entre les eaux marines et les apports fluviaux. Un fleuve au débit élevé crée une circulation étagede : les eaux salines s'écoulent au fond vers l'amont, les eaux douces vers laval en surface.

On a cru jusqu'à des périodes récentes, que l'intensité de cette circulation gouvernait la distribution des sédiments dans l'estuaire où ils s'accumulent dans la zone d'inversion des courants résiduels.

On a démontré que, dans les estuaires à forts courants de marée, les accumulations sédimentaires sont dues à la diminution de la capacité de l'onde de marée à transporter vers l'amont des matériaux présents à l'aval et à repousser ceux provenant de l'amont. Dans les grands estuaires français (Seine, Loire, Gironde), les deux mécanismes se superposent, interagissent de façon différente selon la nature des sédiments, le cycle des marées, l'importance du débit fluvial conduisant à un phénomène d'accumulation fort complexe. On peut relier ces accumulations à la quantité d'énergie dissipée par m^2 , qui doit être suffisamment faible pour permettre un dépôt sédimentaire.



Fig. 2 - Photo satellite de l'estuaire du Yang Tse Kiang. On remarque le panache de sédiments en suspension qui interagit dans la zone côtière avec les apports provenant du Hoang Ho. Ces deux fleuves représentent près de 15 % des apports de sédiments à l'océan. La carte indique la ville de Shanghai. (Photo communiquée par le professeur Chen Chi-Yu, directeur de l'Institut de recherches estuariennes et côtières. Université de Shanghai).

mer, mais souvent amplifiées (cf. fig. 3). On ignore en revanche l'importance relative de ces réactions (surtout celles du type solide — liquide, fréquentes lorsqu'il y a des matériaux en suspension), et leur cinétique. Dans la phase solide, les propriétés du revêtement organique de surface, masquent souvent celles des particules minérales. Ce phénomène peut aider à comprendre la sursaturation de la calcite dans l'océan, la capacité d'échange des particules vis-à-vis des polluants métalliques.

L'influence humaine

Tous ces processus sont affectés par l'intervention humaine, dont on a vu qu'elle était particulièrement importante près des côtes. Ses formes sont bien connues :

- augmentation des apports dissous et particulaires par les fleuves, liée parfois à l'augmentation du taux d'érosion dû au surpâturage et à la disparition des forêts (la présence de barrages a,

évidemment, un effet opposé) ;

- introduction directe d'effluents urbains sur le littoral.

Quant à son importance, on en peut donner quelques exemples frappants :

- les apports industriels de fluor en baie de Seine, sont huit fois supérieurs aux apports naturels du fleuve ;
- la concentration de chlorures dans le Rhin a été multipliée par vingt, depuis le début du siècle : le Rhin en déverse aujourd'hui dans la mer, une quantité équivalente à celle qu'apporte l'Amazone dont le débit est près de soixante fois supérieur.

L'effet des apports additionnels d'éléments nutritifs est, dans un premier temps, favorable à la pêche, puisqu'il augmente la productivité littorale. Rapidement, la dégradation de la matière organique excédentaire conduit à des crises dystrophiques et à la formation d'un environnement anoxique, qui modifie le comportement des éléments chimiques existant sous plusieurs états de valence (manganèse par exemple).

LE RÔLE CHIMIQUE DES ESTUAIRIES

90 % des apports en sédiments fluviatiles se déposent dans les zones estuariennes ou périmontantes, en entraînant une proportion importante d'éléments chimiques létals.

Le comportement d'un élément chimique dissous, peut être prévu en comparant son temps de résidence dans l'océan (τ_x) à celui de l'eau ($\tau_{H_2O} \approx 10^8$ ans).

- Si $\frac{\tau_x}{\tau_{H_2O}} > 10$, l'élément est « accumulé » dans l'océan. Il est probable que sa concentration dans l'estuaire obéit à un simple phénomène de dilution eau douce - eau de mer.
- Si $\frac{\tau_x}{\tau_{H_2O}} < 0,1$, la faible teneur dans l'océan traduit des réactions physicochimiques liquide solide (coagulation, flocculation).
- Si $0,1 > \frac{\tau_x}{\tau_{H_2O}} < 10$, la proximité des concentrations fait que l'élément sera peu affecté dans l'estuaire, tout en pouvant être recyclé par les organismes vivants.

Cette pollution organique peut également modifier la charge électrique et les propriétés d'adsorption des particules sédimentaires.

Plus généralement, l'effet des pollutions est différent selon les cas. Pour les éléments appauvris dans l'océan, on peut penser que leur impact sera limité aux zones littorales où ils se déposent. Ainsi, la Baltique, soumise à d'importants déversements polluants, présente des concentrations en plomb, zinc et cuivre dissous qui ne sont pas supérieures à celles de l'océan Indien. En revanche, on ne dispose pas actuellement de moyens permettant de mesurer l'impact sur la composition moyenne de l'océan des éléments dits accumulés.

La recherche sur ces pollutions est compliquée par la variété des sources et des sorties du système étudié. Il ne faut, par exemple, pas négliger les apports de polluants par l'atmosphère : pour les métaux, ils représentent un flux nettement supérieur à celui des apports dissous par les fleuves (fig. 4). Il ne faut pas, non plus, oublier la possibilité de recyclage vers le continent des éléments polluants introduits en mer.

Les cycles biologiques dans la zone côtière

Les potentialités productives des écosystèmes côtiers, dépendent de mécanismes variables dans le temps et dans l'espace : capacités d'utilisation de la matière organique, interactions des organismes entre eux et avec le milieu, modifications climatiques et chimiques à long terme.

La grande productivité des écosystèmes côtiers fait leur intérêt économique. On l'explique par de nombreux facteurs :

- profondeur relativement faible et bonne pénétration des radiations lumineuses ;
- fertilisation (eutrophisation) des milieux côtiers par les rivières et apports terrigènes ;
- mouvements d'advection des eaux côtières riches en nutriments ;
- retenue des matériaux organiques.

Cette production permet de distinguer les systèmes côtiers des systèmes hauturiers : ils présentent une plus grande variabilité de la température, de l'oxygène et de la salinité, une plus forte turbidité, des niveaux plus élevés de nutriments, des rapports N/P plus bas, des productions I et II plus élevées... Ces caractères s'atténuent lorsqu'on s'éloigne de la côte.

L'étude des transferts de matière et d'énergie qui se produisent dans les écosystèmes côtiers, peut conduire à des

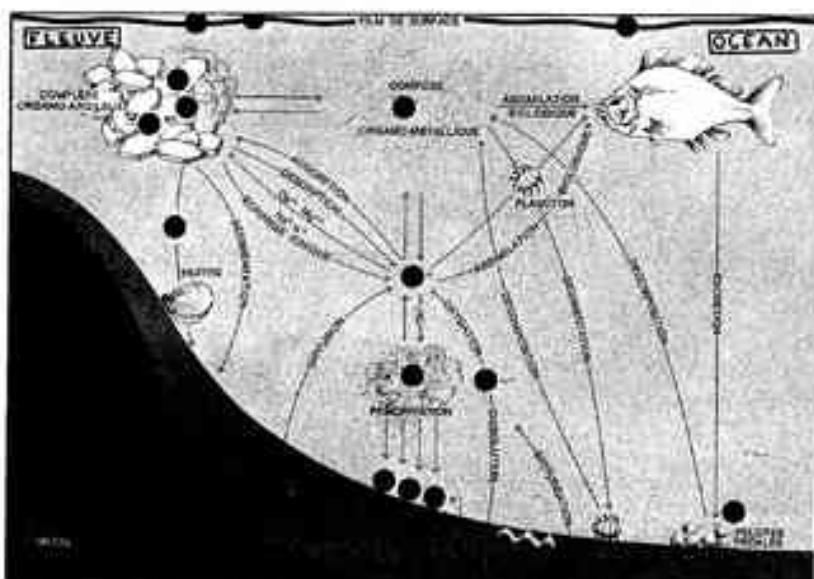


Fig. 3 - Cycle schématique des métaux à l'interface fleuve-océan, montrant les principales réactions physico-chimiques et biologiques affectant leur transfert entre les phases dissoutes et particulières (d'après J.M. Martin, 1977).

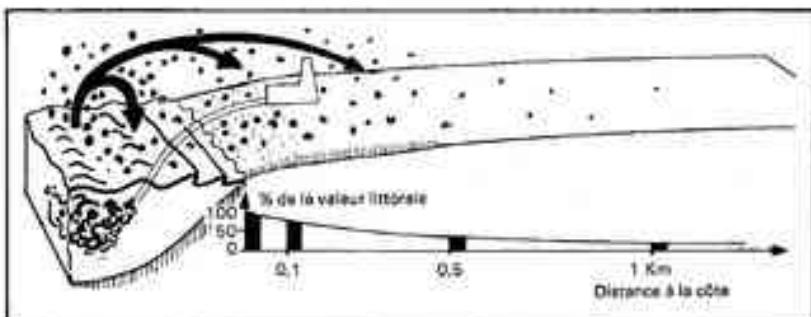


Fig. 4 – Schéma montrant le recyclage atmosphérique d'effluents liquides de l'océan vers le continent. Le mécanisme a été étudié au voisinage de la côte dans le Nord Cotentin où la présence de radionucléides artificiels a été détectée dans l'herbe. Dans le premier kilomètre de la frange littorale, ces radionucléides (isotopes du plutonium, cérium-134 et 137) proviennent essentiellement des rejets liquides de l'usine de retraitement de combustibles nucléaires irradiés de La Hague. Leur transfert jusqu'à la végétation littorale est complexe. Les radionucléides artificiels (au même titre que d'autres oligo-éléments, par exemple certains métaux) seraient susceptibles de se concentrer dans la micro-couche superficielle océanique (la « peau de la mer ») puis d'être transportés par les aérosols marins (embruns) vers le continent. Une partie d'entre eux est alors fixée par la végétation côtière. Les concentrations mesurées sont très faibles et une évaluation de la radioactivité moyenne des aérosols marins dans le Nord Cotentin montre que ces processus de transfert peuvent être tenus pour négligeables au vu des normes actuellement utilisées en matière de radioprotection. Toutefois, l'évaluation des conséquences à long terme des rejets liés à l'extension du centre de La Hague, devra prendre en compte ces processus de transfert et en étudier avec soin les mécanismes. La figure montre l'évolution des concentrations en plutonium, en fonction de la distance à la côte (valeurs normalisées au % de la valeur littorale). (d'après Martin, Thomas, Jeandel, 1981).

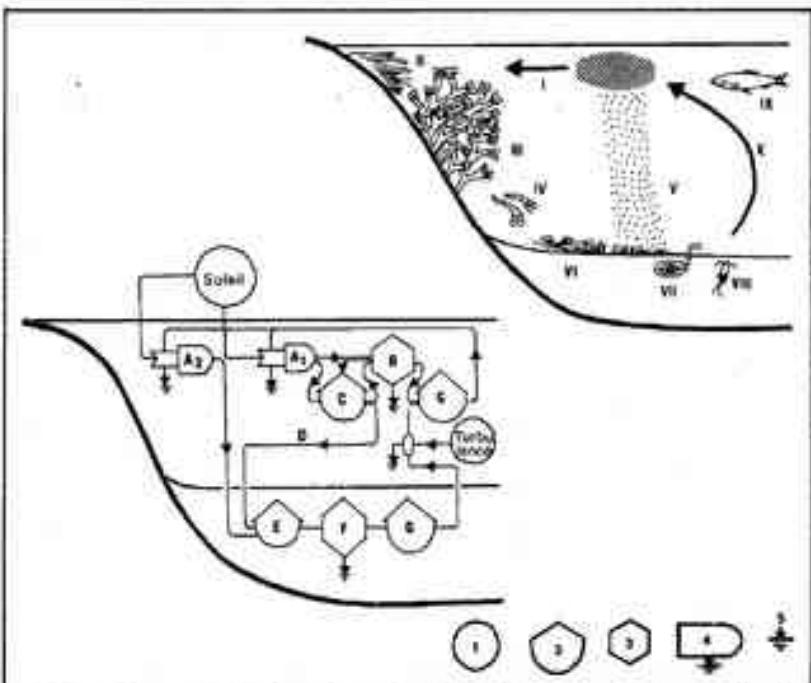


Fig. 5 – Modèle de base d'un écosystème côtier (d'après O. Jansson), en haut (5a) la vision naturaliste, en bas (5b) le même système représenté dans le langage logistique d'Odum (1972). Les caractéristiques dynamiques de l'écosystème sont réunies sous le dénominateur commun d'énergie : concentration de substances chimiques, synthèse de matière organique, flux vecteurs liés aux régimes hydrauliques (marées, courants), relations trophiques, biomasses, productions primaires et secondaires, exploitations par l'homme, effluents. Les sources d'énergie et leurs réserves, les productions, sont symbolisées par des modules quantifiables sous la forme d'équations différentielles et analogiques. Les modules sont liés les uns aux autres par des couplages de transfert. – 5a. I. plancton, II. algues vertes, III. algues brunes, IV. chute des algues vers le fond, V. sédimentation, VI. bactéries, VII. macrofaune, VIII. mélofaune, IX. poisson, X. recyclage des nutriments. – 5b. A. production primaire, B. production secondaire, C. matière organique, D. sédimentation, E. sédiment, F. faune benthique, G. nutriments. – 1. Sources externe d'énergie (soleil, marée, courants) – 2. Réserve d'énergie – 3. Organisme consommateur et production secondaire (animaux) – 4. Production primaire (végétaux, agriculture) – 5. Perte d'énergie (travail, respiration).

modèles conceptuels et prévisionnels, du type de celui qui est présenté figure 5 pour un écosystème lagunaire. Ces recherches constituent un progrès important de l'océanologie biologique, en permettant de mieux comprendre les modes de fonctionnement des écosystèmes côtiers. Les recherches suivent plusieurs directions. On a ainsi généralisé le principe du recyclage de la matière organique, produite par les marais et de son impact fertilisant sur la zone côtière, découvert par John Teal (1962). Des recherches récentes (Lasserre, 1979) insistent davantage sur les apports océaniques saisonniers en sels minéraux, matière organique et oligo-éléments, et sur leur rôle dans les processus de fertilisation des systèmes les plus eutrophes (lagunes côtières, et, sans doute, estuaires). Des équipes françaises et américaines ont mis en lumière l'importance, en provenance de l'océan, de formes oxydées inorganiques d'azote et de phosphore, qui sont ensuite restituées sous des formes réduites. L'ensemble du processus conduit à un flux net de carbone, de phosphore et d'azote de l'écosystème littoral vers l'océan ; mais il ne peut se produire que s'il existe un flux de phosphore inorganique oxydé venant de la mer, qui est l'une des conditions d'une productivité primaire élevée des écosystèmes littoraux.

L'ensemble des recherches évoquées ci-dessus, relève de plusieurs disciplines et débouche sur la mise au point de modèles d'étude et de prévision. Ces modèles, il convient de le rappeler, sont indispensables à ceux qui ont la charge de prendre des décisions en matière de développement et d'aménagement. L'exploitation intensive de la zone côtière devrait conduire à un mieux être de l'humanité, à condition d'éviter le risque de l'épuisement ou de la dégradation du littoral et dans peu de temps du plateau continental. Le développement rationnel de la zone côtière demande l'intégration d'informations scientifiques, socio-économiques, politiques. On doit reconnaître que le travail du gestionnaire et du responsable de l'aménagement est de prendre des décisions dans un contexte d'incertitudes et très souvent à court terme. Le rôle du scientifique est de l'aider à limiter cette incertitude dans la mesure où elle peut être levée par un effort de recherche adapté. C'est, s'il en était besoin, une justification de plus pour la poursuite des efforts de recherche scientifique sur la zone côtière.

Les stations marines françaises

Avec onze stations marines reliées aux Universités, neuf rattachées à l'Institut des pêches et cinq liées à d'autres organismes, la France possède une infrastructure d'une grande ampleur que seuls la Grande-Bretagne, le Japon et les Etats-Unis égalent ou dépassent pour une superficie ou une longueur de côtes supérieures. L'image qu'en retiennent les vacanciers est celle d'un aquarium où ils ont pu admirer faune et flore locales. Mais que cache au juste cette vision ? Tout d'abord une activité d'enseignement : encadrement et accueil d'étudiants des universités françaises et étrangères (environ une centaines d'étudiants par an). C'est ensuite la coopération avec des chercheurs français et étrangers des disciplines les plus variées de la biologie marine. Enfin, ces stations sont devenues de grands centres de recherche ; c'est là le souhait des fondateurs, même s'il a fallu attendre les années 1960 et le développement des 3ème cycles d'océanographie pour que l'essor soit pris. Près de trois cents chercheurs et cinq cents techniciens travaillent ainsi en permanence dans ces stations. Ils bénéficient d'installations expérimentales, de bibliothèques, de navires et de tous les services de maintenance et d'administration qu'implique l'éloignement des grands centres universitaires. Cet inconvénient est très largement compensé par le bénéfice scientifique lié à la proximité immédiate de la mer et à l'accès aux milieux variés qui ont justifié l'implantation des stations.

Pour montrer l'importance des stations marines dans la recherche, il suffira de dire que : 56 % des océanographes de la section d'océanographie travaillent dans les stations marines (dont environ la moitié à la Station Marine d'Endoume à Marseille), 22 % dans les universités de villes maritimes (Brest, Bordeaux) et 17 % à Paris. La répartition par discipline est révélatrice : 83 % des biologistes travaillent dans les stations, mais seulement 12 % des sédimentologues et des chimistes et 10 % des physiciens ; 40 % des sédimentologues et chimistes et 37 % des physiciens travaillent dans de grandes cités littorales ; 43 % des physiciens et 33 % des sédimentologues sont à Paris. Comme les stations de Banyuls, Roscoff et Villefranche dépendent de l'université Paris VI, celle-ci est bien, et de loin, la plus importante et la plus polyvalente des universités en matière d'océanologie.

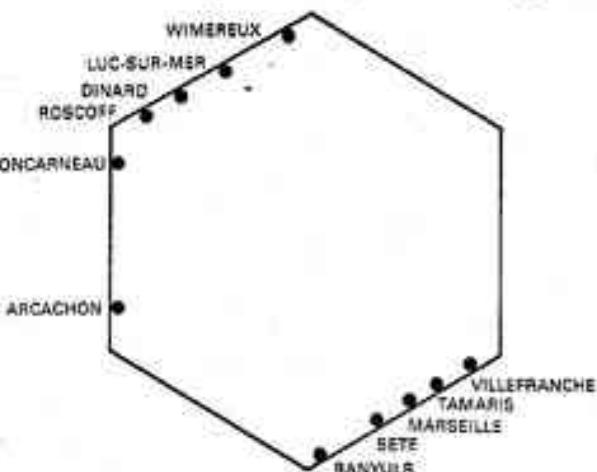
La répartition des stations sur le littoral français n'est pas due au hasard. La récolte, l'observation et, de plus en plus, l'expérimentation sur le matériel vivant, jouent en leur faveur au détriment même des laboratoires implantés dans les campus de villes maritimes. En revanche, l'évolution passée a incité géologues et physiciens à s'orienter soit vers les campagnes océanographiques de haute mer, soit vers la simulation sur modèles réduits pour laquelle l'infrastructure des grandes métropoles constitue un avantage incontestable. Toute personne qui quitte un matin de janvier, les frimas parisiens pour, d'un coup d'aile, retrouver amandiers et mimosa en fleurs sur le littoral méditerranéen est intuitivement persuadée que le climat a joué un rôle sur l'implantation des stations marines. A-t-elle raison ? Oui et non. Lacaze-Duthiers, a effectivement fondé Banyuls-sur-Mer une dizaine d'années après avoir créé Roscoff non pour le « climat » auquel se réfère le vacancier (« Pendant l'été, les chaleurs sont souvent très fortes et il est alors tout aussi pénible de travailler en Roussillon qu'en Provence »), mais pour la possibilité d'y récolter toute l'année du matériel biologique, ce qui apparaissait impossible à Roscoff (« Tous les zoologues arrivés à Roscoff en mars et en avril, ont remarqué combien le travail était à ces époques fréquemment interrompu tantôt par insuffisance de lumière due à la brume, tantôt par l'impossibilité absolue de rechercher les animaux, impossibilité causée par les pluies, les boursras... »). C'est donc toujours l'intérêt biologique qui a dominé : « Le naturaliste qui a passé plusieurs mois à Roscoff, n'aura jamais fait les pêches merveilleuses qui l'attendent dans la Méditerranée ». Quand et comment s'est éveillé l'intérêt pour l'océan ? Même si les germes de la biologie marine sont trouvés chez Aristote scrutant les rivages de l'île de Lesbos et si l'observation directe est pratiquée par quelques novateurs dès le XVI^e siècle, c'est bien le XIX^e siècle qui marque l'essor de la zoologie puis de l'embryologie, disciplines qui doivent tant aux organismes marins. « Les naturalistes allaient découvrir la mer avant les peintres, peut-être

même avant les poètes et, certainement, en dehors de quelques gens du monde, avant les touristes » déclarait Georges Petit, directeur du laboratoire Arago de Banyuls (1961). Le travail de ces pionniers fut d'abord une recherche itinérante où les chambres d'hôtes louées par les naturalistes, permettaient les premiers examens du matériel biologique récolté. Un siècle après que l'attention du public ait été attirée par les navigateurs Bougainville, La Pérouse, Dumont d'Urville lors des expéditions de haute mer de « La Boudeuse », « L'Etoile » « L'Astrolabe », allait naître les stations marines françaises, après l'Italie et la Belgique : Concarneau (1859), Arcachon (1863), Roscoff (1871), Wimereux (1874), Luc-sur-Mer (1874), Sète (1879), Banyuls (1882), Marseille (1888), Tamaris (1900), Villefranche-sur-Mer (1914) et Dinard (1935).

Au plan scientifique, dans les premières années, le travail conduit dans les stations les plus anciennes permit de valider les grandes théories de l'évolution, de la phylogénie à travers les recherches sur l'embryologie comparée.

Ce potentiel de stations est-il excessif comme le pensait Lacaze-Duthiers dès 1888 : « Deux grands laboratoires suffisent alors que l'on en construit partout » ? Quatre-vingts années plus tard, Georges Petit reprenait : « La liberté de créer et la dispersion qui en résulte sont l'image de ce que j'appellerais la maladie infantile des laboratoires marins. Elle sévit toujours ». On peut, sur ce sujet, avoir une opinion beaucoup plus nuancée. La densité des laboratoires marins est une richesse. Encore plus à un moment où l'extension des eaux territoriales accentue la nécessité de recherches intégrées sur le littoral. Rappelons en effet que neuf dixièmes de la pêche mondiale, s'effectuent en région côtière et que près de 80 % de la population mondiale vit à moins de 50 km des côtes, avec les conséquences et les conflits d'intérêt que l'on devine pour l'environnement marin.

Evidemment, chaque station ne peut pas, ne doit pas devenir un grand centre polyvalent où co-existeraient, aux limites du raisonnable, l'enseignement, l'accueil de chercheurs et la recherche propre. Certaines doivent se tourner vers une pluridisciplinarité, en favorisant par exemple l'ancrage d'équipes de physiciens. D'autres doivent encore mieux s'insérer dans le contexte des préoccupations économiques, d'environnement qui sont celles de leur université de rattachement. D'autres enfin, ont tout intérêt à maintenir une certaine spécialisation : aquaculture, neurophysiologie d'organismes marins, approche biochimique, algologie... Si ce virage est bien négocié, l'intérêt manifesté depuis plusieurs années par le CNRS et la Mission de la recherche des universités, qui s'est traduit par la création d'un Programme interdisciplinaire de recherche en océanographie (PIRO), par le lancement de navires côtiers modernes, l'attribution d'équipements lourds, sera certainement amplifié. C'est aux stations, par la qualité et la densité de leur travail scientifique, de le justifier : c'est déjà ce que pensait ce précurseur que fut Lacaze-Duthiers : « Il faut mettre en parallèle ce que coûte un laboratoire marin et ce qu'il rapporte ; il faut leur donner (les subventions), en proportion des résultats réels et des services que, de par leur position, ils peuvent rendre ».



Les ressources de l'océan

Une bonne gestion des ressources marines et une technologie appropriée permettraient d'augmenter la production océanique mondiale qui pourrait ainsi atteindre 100 millions de tonnes.

Robert LETACONNOUX

Il est difficile de dresser un rapide tableau des recherches menées dans le domaine des ressources de l'Océan sous le triple aspect de la production, de l'économie et de la réglementation, car aucun lien étroit n'existe entre eux, l'essor considérable des pêcheries depuis la dernière guerre mondiale étant le fait de pays à économies très différentes et ayant développé des activités de pêche variées dans un cadre réglementaire plus formel que contraignant.

L'attrait exercé par la liberté encore récente d'accès aux ressources marines explique cet essor qui s'est manifesté par la création de grandes flottes océaniques et l'apparition d'une surcapacité de pêche entraînant l'épuisement de nombreuses ressources. L'état de crise ainsi créé a entraîné à son tour l'extension de la juridiction des Etats au large de leurs côtes et la création des zones économiques exclusives étendues à deux cents milles, ce qui équivaut à une appropriation d'une grande partie des ressources marines.

En effet, mise à part celles des thoniers de haute mer, la plupart des pêcheries sont situées sur les plateaux continentaux qui représentent vingt-huit millions de km², soit cinquante fois la surface de la France. Le contrôle des activités de pêche représente donc une tâche immense. La gestion, appuyée sur une recherche scientifique solide, est une tâche tout aussi importante si l'on songe au nombre considérable d'informations à rassembler pour comprendre la biologie et le comportement des espèces et pouvoir analyser l'impact de la pêche sur leur capacité de production potentielle.

□ Robert Letaconnox est directeur adjoint pour les questions scientifiques et techniques à l'Institut scientifique et technique des pêches maritimes à Nantes. Il fut président du Conseil international pour l'exploration de la mer, du Conseil scientifique de l'organisation des pêcheries du Nord-Ouest Atlantique et du Comité scientifique et technique de la pêche de la Communauté économique européenne.

Production océanique

La production océanique, poissons, mollusques, crustacés, peut être évaluée actuellement à soixante-cinq millions de tonnes, alors qu'elle n'était que de vingt millions en 1950. Le rythme d'expansion des pêcheries a donc été remarquable, de l'ordre de 7 % par an, suscitant par là même l'intérêt de quelques pays industriels qui ont développé des flottes capables d'opérer loin de leurs lieux de pêche traditionnels et qui se sont progressivement assuré le contrôle de près de la moitié de la production mondiale, le Japon et l'Union soviétique venant en tête avec près de dix millions de tonnes chacun.

Ce taux d'accroissement s'est malheureusement ralenti depuis 1970 pour n'être que de 1 à 2 % par an. La plupart des stocks, d'accès facile et constitués d'espèces de commercialisation aisée, étant progressivement surexploités et ne pouvant fournir que des prises de plus en plus faibles. Or, si ce ralentissement ne s'était pas produit, les prises mondiales devraient être actuellement de l'ordre de cent à cent-dix millions de tonnes, ce qui correspond à la production potentielle des principales ressources telle qu'elle a été le plus souvent estimée jusqu'ici.

On peut toutefois se demander si, même au prix d'une gestion rigoureuse, un tel objectif aurait pu être atteint, les variations considérables d'abondance constatées étant parfois attribuables à des fluctuations naturelles souvent mal expliquées. A titre d'exemple, les prises d'anchoveta du Pérou sont tombées en dix ans de treize à un million de tonnes, celles de morue de l'Atlantique Nord-Ouest, de un et demi à un demi-million de tonnes, celles de hareng du Nord-Est Atlantique, de 3,7 à 0,6 millions de tonnes, celles de pilchard sud-africain, de 960 000 à 52 000 tonnes et celles de merlu européen, de 120 000 à 50 000 tonnes. Une exploitation incontrôlée est certainement, en partie, responsable de cette situation, des modifications du milieu et du régime des courants ou des déséquilibres entre espèces

ayant été invoqués pour expliquer certains de ces phénomènes : du système du courant El Niño dans le cas de l'anchoveta, une compétition avec l'anchois dans le cas de la sardine de Californie dont la pêche est tombée de 800 000 tonnes en 1936 à pratiquement zéro en 1968.

S'il n'est donc pas certain que le niveau des cent millions de tonnes puisse être atteint, on peut estimer qu'il pourrait être au moins approché sous l'effet conjugué d'une bonne gestion des ressources actuelles ou potentielles, comme les céphalopodes et les petits poissons pélagiques et mésopélagiques à condition que soient développées les technologies appropriées de pêche et de traitement. L'exemple du Krill de l'Antarctique est à cet égard encourageant, les captures de cet Euphausiacé atteignant déjà les 400 000 tonnes.

Economie de la pêche

La pêche joue rarement un rôle prépondérant dans l'économie des pays, mais elle contribue à fournir des aliments de haute valeur nutritionnelle, à maintenir des emplois en zones côtières et à procurer des recettes en devises aux pays exportateurs.

C'est ainsi qu'en France, la part de la pêche dans le produit intérieur brut n'est que de 0,2 % mais, contrairement à ce que l'on pourrait penser, elle n'est que de 2 % en Norvège et seulement de 1,2 % au Japon. En Islande, en revanche, elle est de 12 % et de 30 % aux îles Féroé ce qui, pour ces deux pays, représente respectivement 76 % et 96 % des exportations et une source importante de revenus comme c'est également le cas pour la Norvège, le Danemark ou la Hollande. Au plan des échanges la France, le Royaume-Uni, la République fédérale d'Allemagne, les Etats-Unis et le Japon ont une balance déficitaire, bien que la pêche et les industries associées : mareyage, conserveries, chantiers et services divers, assurent un nombre appréciable d'emplois qui en France est estimé à 200 000 par la réunion des activités de

pêche et de conchyliculture.

Environ 30 % du poisson est livré à l'état frais, 18 % en congélate, 23 % sous forme de conserves et préparations diverses, soit 72 % au total, les restes servant à la production d'huiles et de farines surtout destinées à l'alimentation animale.

La contribution ainsi apportée à l'alimentation mondiale est de l'ordre de 6 % pour les protéines en général et de 24 % pour les seules protéines animales. Pour l'Europe de l'Ouest, la consommation est d'environ dix-huit kilogrammes par habitant et par an, soit 10 % de la ration journalière de protéines animales.

POISSONS	525 600
CRUSTACES	33 700
HUITRES ET MOULES	145 800
MOLLUSQUES	63 800
ALGUES	38 800
TOTAL	795 600

La production française en 1978 (Atlantique Nord et Méditerranée). La France est au 20ème rang mondial et au 3ème rang dans la CEE.

Réglementation des pêches maritimes

Les régulations les plus communément en usage sont de deux ordres. Les premières visent à définir, compte tenu des taux de croissance et de mortalité d'une population, la taille à laquelle sera obtenu le meilleur rendement pondéral par individu. Elles se traduisent par des mesures telles que la taille minimale légale d'une espèce et le maillage minimum d'un filet. Les secondes visent à obtenir

un état d'équilibre entre l'apport numérique des générations annuelles et la mortalité naturelle ou induite par la pêche, donc à déterminer les prises annuelles compatibles avec le maintien de cet équilibre à long terme ; elles débouchent sur des mesures de contingentement des captures ou sur des systèmes de limitation de l'effort de pêche tels que le temps de pêche autorisé ou la fixation du nombre de pêcheurs ou de navires.

Théoriquement bien adaptées aux régions où, comme dans l'Atlantique Nord, les pêches sont surtout monospécifiques, elles le sont beaucoup moins dans les mers tempérées ou tropicales où le mélange des espèces conduit plutôt à la recherche de mesures de compromis autour des caractéristiques communes à l'ensemble des stocks d'une même pêcherie.

C'est ce concept de la production maximale équilibrée qui, bien que ne correspondant pas forcément au meilleur rendement économique, a été choisi comme objectif dans les principales conventions sur la pêche. Il n'a malheureusement pu être atteint sur la plupart des pêcheries, ce qui a nui à la crédibilité des Commissions internationales et facilité le transfert aux Etats côtiers de la responsabilité en matière de gestion des ressources.

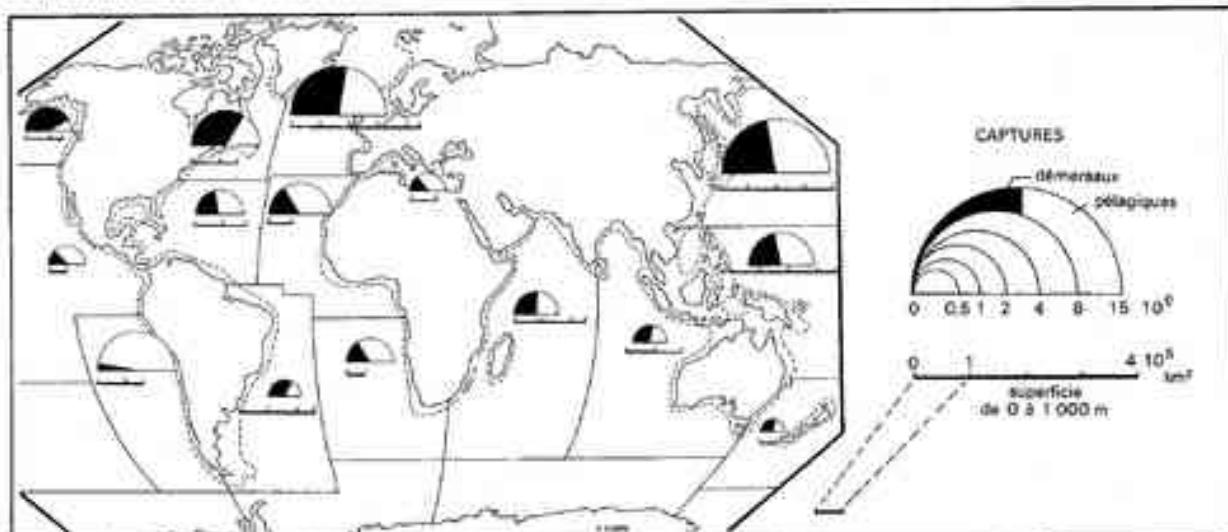
Les différents aspects de la recherche halieutique

À cours des trente dernières années, la recherche s'est efforcée d'encadrer l'expansion des pêcheries, soit au plan national en précédent ou en accompagnant les flottilles sur de nouvelles zones de

pêche, soit au plan international en participant aux activités d'organismes régionaux de collecte d'informations biologiques et statistiques sur la nature et la composition des captures. À la phase exploratoire et descriptive des ressources a donc succédé une phase d'évaluation qui devait déboucher, pour les principaux stocks exploités, sur la conception de modèles visant à décrire et prévoir de façon satisfaisante l'évolution des trois paramètres essentiels que sont la production totale, le rendement et la taille du stock.

Tous ces modèles, qui s'appliquent à des stocks unitaires, sont dits analytiques, lorsqu'ils tiennent compte de paramètres tels que le recrutement, la croissance et la mortalité naturelle et par pêche, ou logistiques, lorsqu'on ne considère que la production totale en fonction de l'effort de pêche déployé sur le stock. Or, force est de constater que malgré un effort de recherche extrêmement important dans ce domaine de la dynamique des populations de poissons, et malgré les avis formulés sur cette base par les scientifiques, la situation des principaux stocks n'a fait que se dégrader, faute de prise de mesures de gestion appropriées.

Cette situation peut s'expliquer par un mauvais dialogue entre scientifiques et administrateurs ou par la complexité des interactions entre facteurs économiques, sociaux ou politiques, à laquelle devaient faire face ces derniers et dont les exigences immédiates prévenaient toute recherche d'objectifs de gestion à long terme. Elle peut également s'expliquer par le fait que les chercheurs, faute de moyens appropriés à l'ampleur de leur tâche et sur-



Répartition des pêches et superficie des fonds de 0 à 1 000 m dans les secteurs de la FAO (moyenne des captures 1971-1975 en millions de tonnes) (source : Annuaire statistique des pêches, FAO, 1975, et Moiseev, 1969-1971). Carte tirée de : T.S. Rass et F. Carré, 1980. - Les pêches maritimes : complexes biogéographiques de production et provinces halieutiques - Rev. Trav. Inst. Pêches marit., 44 (2), 89-117.

tout sollicités pour fournir des avis à court terme, n'ont pu travailler que sur des données statistiques incomplètes et sur des échantillonnages biologiques limités et prélevés, par ailleurs, sur des systèmes déjà le plus souvent arrivés à divers stades de déséquilibre biologique.

Pour les mêmes raisons et du fait de la priorité accordée aux évaluations à court terme des stocks les plus importants, l'étude des écosystèmes auxquels ils appartenient a été négligée. Ceci ne veut pas dire pour autant que ces problèmes n'aient été ignorés des scientifiques, ni que des tentatives n'aient été faites pour remédier à cette situation. L'intégration du système pêche à l'écosystème océanique a, en effet, été tentée sous l'aspect multidisciplinaire, non pas comme une fin en soi, mais à l'occasion d'exercices internationaux comme l'expédition internationale de l'océan Indien (1959-1965), l'étude internationale en commun de l'Atlantique tropical (1963-1964), l'étude en commun du Kuro-shio et des régions adjacentes (1965-1977) ou encore l'étude en commun de la partie septentrionale de l'Atlantique Centre-Est (1972-1977). Ces expéditions ont donné des résultats intéressants, surtout en matière de productivité primaire ou d'océanographie physique, avec des apports importants à l'étude des processus d'enrichissement dans les zones de remontée d'eaux profondes, la dynamique des courants et des variabilités saisonnières. Elles n'ont cependant pas contribué, de façon substantielle, à l'étude des pêcheries et c'est pourquoi l'orientation nouvelle donnée au programme BIOMASS est à cet égard d'un très grand intérêt (voir encadré).

Ce programme vise, en effet, à obtenir une meilleure compréhension de la structure et de la dynamique de l'écosystème marin Antarctique, afin d'en dégager des concepts sur l'aménagement des ressources vivantes potentielles en vue de leur exploitation et de leur conservation. Profitant de la relative simplicité du système antarctique, jusqu'ici peu perturbé, ce programme peut, en effet, apporter beaucoup à la

connaissance des interactions entre le milieu, le plancton végétal et le krill, lequel constitue la principale source de nourriture pour le reste de la chaîne qui comprend les céphalopodes, les poissons, les pingouins, les phoques et les cétacés. L'effet des variations des conditions du milieu sur l'efficacité de cette chaîne pourrait également être testé. Un tel modèle, s'il peut être établi, fournirait certainement une approche théorique intéressante au problème des relations entre les pêcheries et le reste de l'écosystème marin.

Un problème, qui soulève également beaucoup de questions, est celui du recrutement, c'est-à-dire de l'importance des générations annuelles en relation avec celle des géniteurs, mais aussi en fonction des conditions qui peuvent influer sur le devenir d'une ponte : milieu, nourriture planctonique et prédatation, facteurs dont la variabilité doit être déterminante dans les fluctuations observées d'abondance des classes d'âge qui recrutent finalement sur une pêcherie.

Beaucoup d'observations ont été rassemblées sur cette relation stock-recrutement et des programmes d'évaluation des larves et des juvéniles ont été lancés, soit pour estimer l'abondance des futures classes d'adultes soit pour évaluer la biomasse des géniteurs, comme cela s'est fait pour le hareng de la Mer du Nord et le maquereau de la Manche. Cette approche, encore expérimentale, mérite certainement d'être poursuivie et complétée dans un site privilégié comme celui offert par le Bonnet Flamand, banc isolé à l'Est du Grand Banc de Terre-Neuve, retenu en 1978 pour une étude des phénomènes pouvant influencer le recrutement du stock local de morue. L'extrême surexploitation de ce stock a malheureusement compromis ce projet, de nombreux chalutiers, évincés des deux cents milles canadiens, ayant reporté leur effort sur ce banc, ce qui montre, s'il en était besoin, les difficultés que peuvent rencontrer les biologistes des pêches.

La dernière voie de recherche importante est celle offerte par l'analyse qua-

litative de l'écosystème d'une région, analyse qui devrait déboucher sur la conception de modèles multispecifiques, permettant d'évaluer quantitativement le résultat de différentes stratégies de gestion. La gestion stock par stock, en vue de l'obtention d'un production maximale pour chacun d'entre eux, est en effet incompatible avec la notion que la production totale d'espèces commerciales est limitée par la productivité globale de la région considérée. C'est donc vers la conception de modèles de gestion régionaux ou de modèles privilégiant l'exploitation d'une ou plusieurs espèces que l'on doit s'orienter, le choix dépendant de l'objectif économique, formulé en termes de poids ou de valeur, que l'on se sera fixé. C'est un problème qui se pose pour la Mer du Nord dont la production, qui a doublé depuis 1950 pour se fixer autour de trois millions de tonnes, est actuellement partagée par les deux activités concurrentes que représentent la pêche des espèces classiques, destinées à l'alimentation humaine, et celle des espèces secondaires, et accessoirement de juvéniles des précédentes, destinées à la production de farines.

Co trop rapide tableau serait incomplet si l'on ne mentionnait pas les recherches conduites en acoustique sous-marine, pour la détection et l'évaluation des ressources, ou encore celles suscitées par la technologie des engins de pêche ou par l'utilisation et la valorisation des produits de la pêche. Il faudrait également mentionner les recherches sur les élevages en zone littorale, avec les problèmes propres à ce secteur tels qu'épidémies catastrophiques et effets des pollutions dont l'impact en conchyliculture commence à être détecté.

Compte tenu de l'ampleur des phénomènes à analyser et de la nécessité de développer de nouveaux concepts, quant au fonctionnement des écosystèmes sur lesquels repose le système pêche proprement dit, il est évident qu'un vaste effort de réflexion est nécessaire. Il doit déboucher sur des stratégies de recherche susceptibles de rassembler au moindre coût les données essentielles indispensables à l'élaboration de modèles de gestion, dont la finalité reste à discuter entre scientifiques et administrateurs, mais qui impliquent un choix entre les intérêts économiques et sociaux et dans les limites offertes par la productivité des océans.

LE PROGRAMME BIOMASS

Le programme BIOMASS a été établi, sous la responsabilité du Comité scientifique des recherches antarctiques (SCAR) en réponse à une recommandation prise en 1975, lors de la 8ème réunion consultative du Traité de l'Antarctique. Le Comité scientifique de recherches océaniques (SCOR) a participé à son élaboration avec l'appui de la Food and agricultural organization (FAO) et de la Commission océanographique intergouvernementale de l'UNESCO (COI).

Les compagnies interocéaniques au temps de Colbert

C'était l'époque où Colbert rêvait de faire de la mer des Caraïbes un lac français...

Etienne TAILLEMITE

Lorsque Colbert commença à s'intéresser aux affaires de la Marine, c'est-à-dire bien des années avant d'en être officiellement chargé par son accession en 1669 au Secrétariat d'Etat, la situation de la France était loin d'être brillante dans le domaine de l'économie maritime. Depuis plus d'un siècle, l'Espagne et le Portugal, puis l'Angleterre et la Hollande avaient compris l'importance de la mer et du commerce maritime international. Rien de semblable en France. Les quelques expéditions lointaines menées au XVII^e siècle ne s'étaient traduites que par des velléités sans suite et les guerres religieuses absorbèrent pendant des décennies, les forces vives du pays. Il est, de plus, évident, qu'en dehors de quelques rares individus isolés, les français ne s'intéressaient guère à la mer. Une héritage fondamentalement terrienne les y portait peu et les gouvernements ne les y encourageaient pas, c'est le moins que l'on puisse dire. L'hostilité de Sully, par exemple, à toute entreprise maritime est bien connue et sa passion de l'agriculture traduisait certainement une constante du tempérament et du caractère français qui demeure vivante aujourd'hui encore. Et il y eut aussi, dès cette époque, ce goût immodéré des charges publiques, toujours encouragé par l'Etat français qui y trouvait un profit à court terme, manifestation bien typique de la passion du placement économiquement stérile dont les français ont tant de peine à se défaire. De plus, la richesse relative du territoire national, une douceur de vivre certaine jointe à un individualisme viscéral détournait les français des entreprises lointaines.

Le résultat pratique de tout cet ensemble de causes diverses était qu'au début du XVII^e siècle, la faiblesse du royaume dans l'économie maritime européenne éclatait aux yeux de tous les observateurs. Le commerce extérieur français demeurait fermement entre les mains des hollandais aussi bien aux Antilles que dans les mers d'Europe.



Pastel de Colbert par Robert Nanteuil (Cliché Musée de la marine).

intérieures et extérieures n'étaient guère favorables. Les troubles intérieurs, religieux et politiques, la lutte éprouvante contre la maison d'Autriche vouaient à l'échec, toute tentative de grande envergure qui n'aurait pu aboutir qu'avec le temps et un minimum de continuité de vues. Les agitations de la Fronde achevèrent de tout compromettre, de sorte que quand Colbert commença à s'occuper des questions maritimes, vers 1652-1653, et plus encore à partir de 1661, il fallut reprendre les choses à la base. La tâche sera d'autant plus ardue que Louis XIV, fidèle interprète de l'opinion générale de son royaume, ne manifesta spontanément que fort peu d'intérêt pour les questions maritimes. Et pourtant Colbert, à force de tenacité, parviendra à piquer l'amour-propre du roi et à l'amener peu à peu à soutenir sa politique, dont un des objectifs principaux était le développement du commerce maritime.

Les objectifs de Colbert

Quels étaient les buts poursuivis par Colbert ? Jean Meyer vient de nous les rappeler dans son livre récent : se passer des étrangers au maximum, exporter tout le superflu de la production française et donner aux étrangers le goût des produits français, et, à cette fin, établir de nombreuses manufactures protégées par un régime douanier favorable. Pour atteindre ces objectifs, Colbert n'avait que très médiocrement confiance dans les négociants et armateurs français, livrés à eux-mêmes et à leurs propres forces. Comme, de plus, il n'avait guère d'idées personnelles et qu'il reprenait sans scrupule celles de ses prédécesseurs, il va entreprendre de mettre sur pied un ensemble de grandes compagnies de commerce auxquelles participeraient, tout au moins l'espérait-il, toutes les forces financières du

□ Etienne Taillemite, inspecteur général des Archives, membre de l'Académie de marine, est responsable d'une équipe au sein du laboratoire d'histoire maritime de l'université de Paris IV (LA 211).

royaume. Pourquoi des compagnies ? Tout simplement parce que Colbert, comme son maître Richelieu, était séduit, voire obsédé, par le succès des grandes associations anglaises et hollandaises qui n'étaient taillé des empêtres commerciaux enviables, grâce à leur supériorité technique et psychologique, dont il soulignait l'excellence dans son grand mémoire sur le commerce d'août 1664.

Si l'on en croit Pidansat de Mairobert, qui s'attacha au XVIII^e siècle à synthétiser la pensée Colbertienne, le ministre ne considérait d'ailleurs ces compagnies que comme un premier moteur destiné à lancer le mouvement et dont, par conséquent, l'existence ne devait être dans son esprit que provisoire.

Il ne leur accordait ces avantages (des prêts à 5 % d'intérêt) que dans les commencements et pour engager un commerce où il comptait semer pour recueillir car, une fois établi, non seulement il leur retranchait leurs priviléges, mais il ne croyait plus les compagnies nécessaires et utiles, et souhaitait que le commerce qu'elles faisaient seules, se répartît sur tous les sujets du roi et revint entre les mains des négociants en général.

En attendant ces résultats idéaux auxquels il ne parviendra jamais, Colbert va mettre sur pied, non sans difficulté, un ensemble de grandes compagnies chargées, dans son esprit, de conquérir au commerce français les principaux marchés du monde alors connu et fréquenté. C'est pourquoi chacune d'entre elles, recevra une aire géographique bien déterminée dans laquelle elle devra œuvrer. Quatre grandes zones ont été ainsi déterminées : l'océan Indien, les Antilles et l'Amérique du Nord, le Levant et les pays du Nord de l'Europe. Chacune d'elles va être confiée à une compagnie.

La Compagnie des Indes orientales

Dès 1664, apparaît la Compagnie des Indes orientales. C'est celle qui, à travers bien des vicissitudes, des éclipses et des résurrections connaîtra la vie la plus longue. C'est la seule aussi qui, à certains moments du moins, atteindra une certaine réussite.

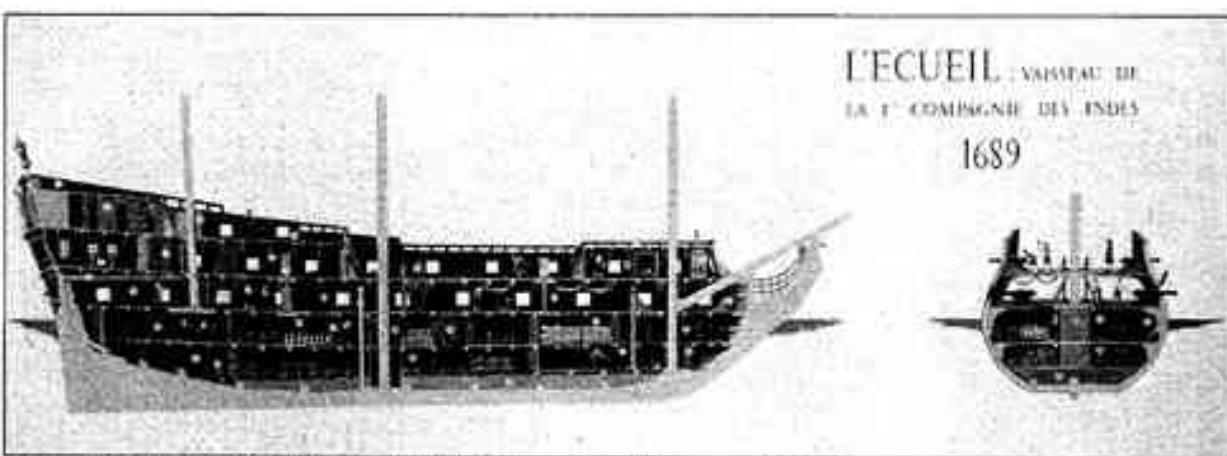
Elle reçut du roi le monopole du commerce et de la navigation dans les mers d'orient, c'est-à-dire en fait dans tout l'océan Indien, la mer Rouge, l'Inde, la Chine. Son capital initial devait être de quinze millions de livres mais, malgré une propagande intensive, intelligemment menée par l'académicien Charpentier, on ne put en réunir que neuf. On avait pourtant fait jouer sans scrupule toutes sortes de pressions. Le roi lui-même s'était inscrit pour trois millions, la famille royale, les grands dignitaires de la cour, les hauts magistrats, quelques marchands de Paris souscrivirent, souvent non sans grogne et réticences. Olivier d'Ormesson nous a laissé, dans ses mémoires, un tableau assez piquant de l'accueil des plus frais réservé par le Parlement de Paris à cette espèce d'emprunt forcé. Si les parisiens ne suivirent que fort mollement les conseils très appuyés du secrétaire d'Etat, il en fut de même, et plus encore en province, hormis quelques portes un peu plus généreux. Cette aventure n'inspira que scepticisme aux négociants de l'intérieur, prudemment conservateurs et fort peu attirés par les horizons lointains qui leur paraissaient remplis d'aléas. Lettres et circulaires ministérielles, répandues jusque dans les petites villes, ne purent secouer cette apathie. Ainsi la municipalité de Poitiers ne consentit, et encore sous la menace, qu'une souscription de 3 000 livres. Aucun mouve-

ment spontané ne se manifesta, même dans les régions où les intendants firent preuve de zèle quelquefois malencontreux.

La compagnie peit cependant le départ, lentement. Le concours de conseillers étrangers, surtout hollandais, se révéla fort utile car les français n'étaient guère familiers alors avec les marchés asiatiques. Le négociant persan Marca Avanchin, passé au service de la compagnie, obtiendra lui aussi de beaux résultats auprès du roi de Golconde, qu'il réussit à séduire, et grâce à lui une factorerie fut s'installer en 1669 à Masulipatam pour amorcer le commerce des épices. Cette Compagnie des Indes, qui connaîtra son apogée au XVIII^e siècle, bénéficiera dès le temps de Colbert de la mode de certains produits : les épices, les faïences persanes, les porcelaines de Chine et surtout ces étoffes de Surate et du Bengale, les « indiennes », bariolées, semées d'oiseaux, de fleurs, de feuillages, que l'on s'arrachait aux foires parisianes de Saint-Germain et de Saint-Laurent. De toutes les compagnies créées par Colbert, elle sera la seule à lui survivre, sans doute parce que, seule, elle correspondait à des besoins économiques qui ne pouvaient être satisfaits par des négociants isolés. N'oublions pas qu'elle fournira longtemps en salpêtre les poudreries du royaume.

La Compagnie des Indes occidentales

Créée en la même année 1664, la Compagnie des Indes occidentales devait opérer dans l'Atlantique. Colbert lui confiait la rude tâche de ramener sous pavillon français, le commerce accapré par les anglais et les hollandais, surtout aux Antilles. A cet effet, elle recevait le monopole du trafic dans les mers des Ca-



raîbes, en Amérique du Nord et aussi sur les côtes d'Afrique où elle prendra en charge la traite des noirs destinés aux plantations d'Amérique.

En fait, la Compagnie des Indes occidentales s'occupera très peu du Canada qui sera administré directement, comme une province du royaume, avec un gouverneur général et un intendant. Son activité se concentrera sur les îles des Antilles, Martinique, Guadeloupe, Saint-Christophe surtout, colonies par excellence dans l'esprit du temps, puisqu'elles fournissent des produits inconnus en Europe : sucre, café, cacao, tabac, coton, indigo, et ne peuvent concurrencer l'économie métropolitaine. C'était l'époque où, comme l'attestent les instructions adressées à certains gouverneurs, Colbert rêvait de chasser les anglais de la mer des Caraïbes pour en faire un lac français. Malgré les sensationnels progrès de la culture de la canne à sucre, qui va, dès les années 1660-1670, alimenter un courant d'échanges croissant avec l'Europe, la Compagnie des Indes occidentales sera un échec total. Elle ne réussira jamais à s'implanter véritablement, de sorte qu'elle disparaîtra dès 1674, achevée par la guerre de Hollande.

La Compagnie du Levant

Au Levant, où les traditions commerciales françaises remontaient à plusieurs siècles, Colbert voulait aussi lutter contre une concurrence anglo-hollandaise, devenue très envahissante depuis les années 1620-1630. C'est pourquoi il provoqua en 1670, la création de la Compagnie du Levant qui ne reçut pas à proprement parler de priviléges mais disposa de primes et de facilités diverses, en particulier de l'escorte des vaisseaux du roi dans les zones dangereuses. La mésentente persistante entre Colbert et les marseillais, accusés par le ministre d'être fainéants, beaux parleurs, indisciplinés et querelleurs, ne facilite pas les entreprises de cette société qui n'eut qu'une brève existence, mais contribua peut-être à redonner une certaine activité à l'industrie textile du midi de la France.

La Compagnie du Nord

C'est pour des raisons essentiellement militaires et stratégiques que Colbert fonda en juin 1669, la Compagnie du Nord. Il s'agissait cette fois de lutter contre le monopole de fait que s'étaient assurés

les hollandais dans le trafic des produits indispensables à la construction navale : bois, chanvre, goudron, cuivre, en provenance des pays riverains de la Baltique. Puisamment aidé par les Formont, banquiers huguenots disposant de solides relations commerciales dans ces régions, Colbert se heurta ici encore à l'hostilité des villes intéressées. Dunkerque vivait trop en symbiose avec le commerce hollandais pour risquer d'entrer en conflit avec lui. Chaque port avait ses habitudes et des traditions auxquelles il refusait naturellement de renoncer. Ce fut le cas à Dieppe, à Rouen, à Bordeaux qui possédaient une très ancienne tradition de cabotage avec les pays du Nord à laquelle ses négociants ne sauraient se soustraire. L'écho sera meilleur à la Rochelle, où se fixera le siège de la Compagnie, grâce à un négociant protestant, Henri Tersmitten, qui s'efforça de créer un courant d'échanges avec la Suède.

La Compagnie réussit assez bien à ses débuts, mais ce succès n'était dû qu'aux commandes de l'Etat. Colbert aurait voulu charger les Compagnies du Nord de réexporter vers les pays hanséatiques et scandinaves, les succès des Antilles mais la guerre dite de Hollande vint, dès 1672, mettre fin à tous ces projets.

L'échec des Compagnies interocéaniques

Les efforts de Colbert, dans ce domaine des grandes compagnies interocéaniques, furent donc, en gros, presque totalement infructueux. Où faut-il rechercher les raisons de cet échec ? Elles sont évidemment multiples. D'abord, il était difficile de tenter de s'insérer dans des courants commerciaux, solidement tenus par des négociants aussi expérimentés et aussi habiles que les hollandais ou les anglais. De plus, Colbert s'est heurté à des constantes du tempérament français et il a commis des erreurs de jugement fatales.

En ce milieu du XVII^e siècle, le ministre bute sur l'immobilisme trop coutumier aux Français qui « paraissent s'engourdir avec une certaine satisfaction dans des traditions économiques médiévales » (I. Murat) et se révèlent très rétifs à s'adapter à des situations économiques nouvelles qui risquaient de bouleverser leurs habitudes. Il se heurte aussi à l'individualisme des négociants, très hostiles au principe même des associations. A Bordeaux, comme à Marseille, chacun veut avoir

son bateau à lui. Comme l'écrit justement R. Mandrou : « Les vastes ambitions du contrôleur général n'ont pas été comprises ni acceptées par les individus et les communautés dont il sollicitait le concours ». Enfin, la faiblesse de l'organisation bancaire française de l'époque et les guerres européennes contribuèrent aussi puissamment à entraver l'essor de ces ambitieuses entreprises.

Mais Colbert, à la suite de Richelieu d'ailleurs, a commis aussi de graves erreurs et a été victime d'illusions. Il est obscurément par l'exemple des compagnies hollandaises et anglaises, mais il oublie que l'expérience n'est pas transposable car, aux Pays-Bas, les compagnies « formaient une sorte de floraison spontanée que favorisait l'ensemble des conditions économiques et politiques du pays ». (H. Hauser) En Angleterre comme en Hollande, une classe marchande puissante participait au gouvernement et n'était pas victime du snobisme et des préjugés coutumiers aux français. Ce qui naissait naturellement chez nos rivaux, ne fut en France que création artificielle, donc fragile.

Une des causes essentielles de l'échec, tint aussi à l'absence presque totale de liberté de gestion. Toutes ces compagnies furent dotées de statuts élaborés par des commis de l'Etat, ignorants des réalités économiques et R. Mandrou a pu parler de « carcans ruinant l'initiative des marchands ». D'une part, la traditionnelle méfiance contre l'Etat freinait les initiatives, de l'autre les directeurs eurent tendance à s'endormir dans les rassurantes convictions que, quoiqu'il advint, le Contrôleur général apporterait de nouveaux fonds qui boucheraienr les trous et effaceraienr les erreurs de gestion. Comme l'écrivait tout récemment Jean Meyer : « le mercantilisme colbertien repose, au point de départ, sur d'énormes illusions et une méconnaissance fondamentale des réalités chiffrées du monde de la mer ». Colbert eut-il, par instant, le sentiment de s'être attaqué à une tâche impossible ?

BIBLIOGRAPHIE

- Jean Meyer, *Colbert*, Paris, Hachette, 1981.
Inès Maria, *Colbert*, Paris, Fayard, 1982.
Robert Maudru, *Louis XIV et son temps*, Paris, PUF, 1973.
Henri Hauser, *Les débuts du capitalisme*, Paris, 1931.

Le droit de la mer

Après être demeuré longtemps un droit coutumier, le droit de la mer codifié par la convention de Genève de 1958, fait actuellement l'objet d'une refonte globale dans le cadre de la conférence des Nations-Unies.

Jean-Pierre QUENEUDEC

Le droit de la mer, en tant qu'ensemble des règles applicables au milieu marin et à ses diverses utilisations, s'est développé depuis le XVIII^e siècle autour de la notion de liberté de la navigation. Après être demeuré pendant longtemps un droit coutumier dont les règles résultent de la pratique suivie par les principales nations maritimes, il a été codifié par les conventions de Genève de 1958 et a fait l'objet d'une refonte globale dans le cadre de la Conférence des Nations-Unies sur le droit de la mer, réunie de 1973 à 1982.

Le droit classique de la mer

Dans son aspect traditionnel, le droit de la mer s'intéressait essentiellement à la navigation de surface et n'apprenait guère le milieu sous-marin. Il organisait, de ce fait, le statut des espaces maritimes en procédant à une distinction horizontale entre les espaces de haute mer, où prévalait un principe de liberté, et les espaces entrant dans la catégorie des eaux territoriales et relevant de la souveraineté des Etats riverains.

En haute mer, l'application du principe de liberté des mers signifiait non seulement qu'aucun Etat ne pouvait y exercer de droits et de prétentions de nature territoriale, mais aussi que tous les navires de tous les Etats pouvaient y circuler librement sans être assujettis à d'autre autorité que celle de l'Etat, dont ils arboraient le pavillon (« loi du pavillon »). En outre, l'exploitation des

ressources de la haute mer était totalement libre, les activités de pêche n'y étant soumises à d'autres restrictions que celles contenues dans les règles de police, établies par quelques traités internationaux (comme la convention de 1882, sur la police de la pêche en mer du Nord).

Dans la mer territoriale, la souveraineté de l'Etat riverain ne faisait pas obstacle au droit de passage inoffensif reconnu aux navires étrangers, le passage étant réputé inoffensif tant qu'il ne portait pas atteinte à la paix, au bon ordre ou à la sécurité de l'Etat riverain. Ce dernier avait certes le droit de réservé à ses nationaux, l'exercice de la pêche dans ses eaux territoriales, mais celles-ci étaient généralement limitées à une étroite bande côtière n'excédant guère la largeur de trois milles marins (« règle de la portée du canon »).

Ce régime juridique traditionnel est demeuré pratiquement inchangé jusqu'à la seconde guerre mondiale. Depuis que l'essor technologique a permis de multiplier les utilisations du milieu marin, les conceptions juridiques classiques ont été bouleversées.

Les changements intervenus dans le droit de la mer

Alors que la mer était traditionnellement considérée comme étant d'abord une voie de communication, ouverte à des compétitions politico-militaires où les préoccupations économiques n'occupaient pas le premier plan, elle est progressivement devenue un domaine de convoitise à l'égard des ressources de ses eaux et de ses fonds. De plus en plus considérée comme un réservoir de ressources naturelles, la mer s'est trouvée soumise à la pression des intérêts économiques des Etats, désireux de manifester leur emprise sur des espaces maritimes d'étendue croissante. Ce phénomène

même d'appropriation nationale des eaux bordant les côtes, est allé en s'amplifiant au cours des deux dernières décennies.

Le mouvement a pris naissance avec la proclamation Truman de 1945, par laquelle les Etats-Unis affirmaient leurs droits sur toute l'étendue du plateau continental bordant leurs côtes. Aussitôt imité par divers pays d'Amérique latine, cette pratique s'est rapidement généralisée. Tant et si bien que la première Conférence des Nations-Unies sur le droit de la mer, réunie à Genève en 1958, tout en codifiant les règles coutumières relatives à la haute mer et à la mer territoriale, n'a pu que consacrer les droits souverains des Etats riverains sur leur plateau continental, celui-ci étant défini comme « le lit de la mer et le sous-sol des régions sous-marines adjacentes aux côtes, mais situées en dehors de la mer territoriale, jusqu'au point où la profondeur des eaux surfacées permet l'exploitation des ressources naturelles des dites régions ».

Ni la conférence de 1958, ni celle qui fut spécialement convoquée à cet effet en 1960, ne sont toutefois parvenues à fixer une largeur maximum à la mer territoriale et à déterminer les droits des Etats côtiers en matière de pêche, au-delà de leurs eaux territoriales. Aussi a-t-on assisté, dans les années qui ont suivi, à un double mouvement : d'une part, une extension sensible des mers territoriales (une majorité d'Etats adopte aujourd'hui une largeur de douze milles marins) et, d'autre part, une généralisation des zones de pêche réservées, d'une étendue variable selon les Etats (de cinquante à deux cents milles marins).

Parallèlement à ce mouvement d'appropriation nationale d'espaces maritimes de plus en plus étendus, une remise en cause du droit classique de la mer a vu le jour à la suite des revendications du Tiers-Monde. Aux yeux de nom-

□ Jean-Pierre Queneudec, professeur à l'université de Bretagne occidentale est directeur du Centre de droit et d'économie de la mer et conseiller juridique de la délégation française à la Conférence des Nations-Unies sur le droit de la mer.

breux pays en voie de développement, la liberté des mers (liberté de circulation, de pêche, de recherche scientifique) ne peut plus être le principe de base, autour duquel doit s'organiser le droit de la mer. Il s'agit, au contraire, d'élaborer un nouvel ordre juridique applicable au milieu marin, qui tienne davantage compte des besoins spécifiques des Etats en développement.

Le nouveau droit de la mer

A la suite d'une proposition faite par Malte en 1967, tendant à affecter les fonds marins, au-delà des limites des juridictions nationales à une utilisation pacifique pour le bien de l'humanité tout entière, l'Assemblée générale de l'ONU a proclamé en 1970 la zone internationale des fonds marins « patrimoine commun à l'humanité ». Elle a, en conséquence, décidé de convoquer une troisième Conférence sur le droit de la mer, afin de mettre sur pied le régime juridique applicable dans cette zone internationale. Comme les problèmes de l'espace océanique sont tous étroitement liés entre eux, la Conférence a été chargée de préparer une Convention internationale globale, portant non seulement sur la zone des fonds marins, mais aussi sur les différents aspects du droit de la mer (mer territoriale, plateau continental, haute mer, détroits internationaux, accès à la mer des Etats sans littoral, protection du milieu marin, recherche scientifique marine, etc...).

Cette conférence a adopté le 30 avril 1982, le texte définitif d'une nouvelle convention sur le droit de la mer.

Sur la base de cette convention, les Etats côtiers sont en droit d'instituer, en plus d'une mer territoriale de douze milles marins au maximum, une zone économique exclusive de deux cents

milles, dans laquelle ils exercent des droits souverains sur toutes les ressources (biologiques, minérales et autres) et où ils disposent également de certains pouvoirs en matière de lutte contre la pollution marine, ainsi qu'en ce qui concerne les activités de recherche scientifique. D'autre part, les droits de l'Etat sur le fond de la mer peuvent s'exercer au-delà de deux cents milles, puisque le plateau continental est désormais défini comme le prolongement naturel du territoire de l'Etat côtier, jusqu'au rebord externe de la marge continentale et peut s'étendre jusqu'à trois cent cinquante milles marins au large des côtes.

Le nouveau droit de la mer consacre donc l'extension de la juridiction des Etats côtiers sur des zones maritimes de plus en plus vastes. Dans le même temps, il réglemente les conditions d'exercice de la liberté de navigation, en précisant les règles relatives au droit de passage inoffensif dans la mer territoriale et en maintenant le régime de la liberté de circulation maritime et aérienne, non seulement en haute mer, mais aussi dans les zones économiques exclusives. De même, dans les détroits internationaux qui mettent en communication deux mers libres, est affirmé un droit de passage en transit sans entrave pour tous les navires et tous les aéronefs.

Ce droit nouveau, qui fait par ailleurs une large place à des considérations d'ordre écologique, est également animé par le souci d'ériger le milieu marin en une sorte de domaine public international, pour l'égal profit de tous les peuples. Ce qui conduit à prévoir, pour les espaces maritimes situés au-delà des zones économiques et des plateaux continentaux, une gestion collective assise sur la notion d'héritage commun de l'humanité.

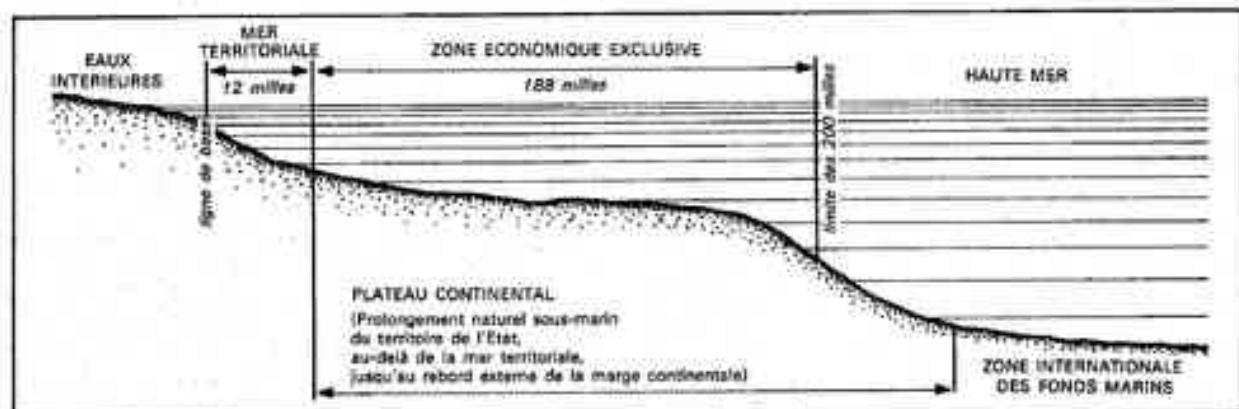
Afin d'assurer l'exploitation de la zone internationale des fonds marins et l'exploitation de ses ressources naturel-

les (essentiellement les nodules polymétalliques), doit être créée une organisation internationale spéciale, appelée « Autorité de fonds marins », par l'intermédiaire de laquelle seront organisées et contrôlées toutes les activités menées dans la zone internationale.

Cette sorte d'« ONU du fond des mers » sera toutefois d'un type particulier, dans la mesure où elle disposera, en plus de larges pouvoirs de réglementation, de ressources financières importantes provenant soit des redevances perçues à l'occasion des autorisations d'exploitation qu'elle délivrera à des Etats ou des sociétés, soit de l'exploitation qu'elle mènera par le biais d'une entreprise d'extraction, de transport, de traitement et de commercialisation des minéraux extraits des fonds marins internationaux. L'Autorité devra assurer le partage équitable de ces ressources, en tenant particulièrement compte des intérêts et des besoins des Etats en développement.

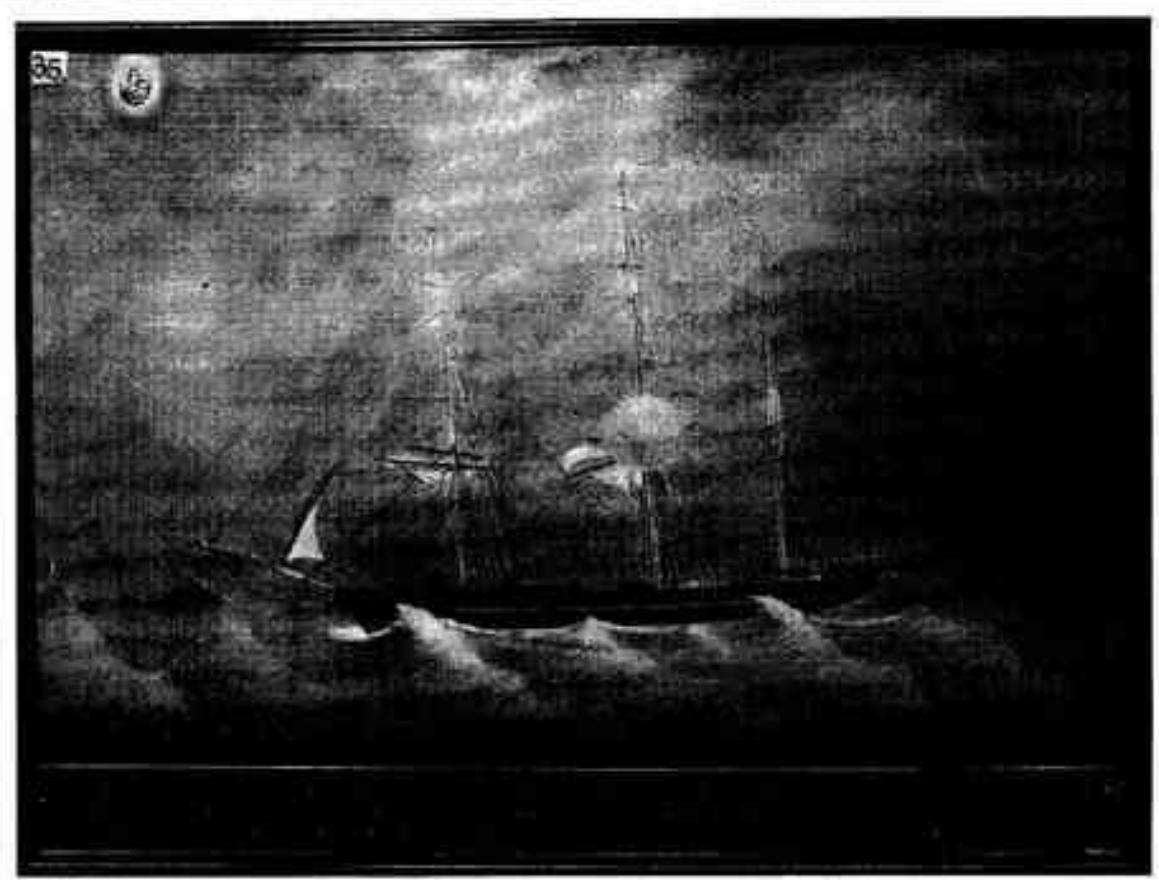
Ce mécanisme international très complexe ne pourra cependant voir le jour que sur la base d'une convention ratifiée par un nombre significatif d'Etats comprenant en particulier les Etats les plus directement intéressés, c'est-à-dire ceux disposant à la fois de la technologie et des moyens financiers nécessaires. En attendant l'entrée en vigueur de cette convention, quelques Etats ont adopté unilatéralement une législation nationale concernant l'exploitation des ressources minérales des grands fonds marins (Etats-Unis, Allemagne fédérale, Royaume-Uni, France, URSS).

Ainsi, le droit de la mer continue-t-il d'être marqué, y compris dans ses développements les plus récents, par cette dialectique qui l'a toujours animé et qui met en jeu à la fois l'action unilatérale des Etats et la recherche de solutions internationalement concertées.



Les différentes zones maritimes.

LE COURRIER DU CNRS



Ex-voto du Capitaine Cauvin, 1856. Aquarelle et plume sur papier, anonyme. Dimension du cadre : 70 cm. x 35 cm. Chapelle Notre-Dame du Bon Port, Antibes, Alpes Maritimes. (Cliché Jean Lepage).

Les ex-votos marins témoignent d'une pratique attestée depuis l'Antiquité, consistant à déposer un objet dans un sanctuaire en remerciement d'une grâce obtenue (forme gratulatoire) ou à des fins de protection (forme propitiatoire). Face au danger, le marin, une fois épuisés ses moyens d'intervention, se tourne vers les puissances surnaturelles pour qu'elles répondent à son appel. Cette pratique, au demeurant non spécifique aux milieux maritimes, possède cependant chez les gens de mer la particularité de s'insérer dans une communauté très cohérente et de résulter, souvent, d'une attitude collective : celle de l'équipage.