A black and white aerial photograph of the ocean surface, showing several large, swirling eddies or vortices. The water's surface is textured with ripples and waves, and the eddies are characterized by concentric, swirling patterns of varying shades of gray. The overall scene is dynamic and captures the complex flow of ocean currents.

# Les tourbillons qui ont changé notre vision de l'océan

*ROBERT STEVENSON*

**Nous avons déjà publié un article de Robert Stevenson sur l'effet de serre (voir Fusion n° 65). Ici, il revient sur un sujet qui a occupé ses recherches pendant plus de vingt ans. A l'heure où les modèles triomphent, l'histoire de la découverte des tourbillons en spirale est un éloge de la méthode descriptive, qui procède par l'observation soigneuse des phénomènes naturels. Accessoirement, c'est aussi un exemple très concret de la nature indispensable des vols spatiaux habités pour la science du climat. Les tourbillons n'ont pas été découverts par des satellites, mais bien par des hommes et des femmes volant dans la navette.**

*Robert Stevenson est un consultant en océanographie basé à Del Mar (Californie). C'est lui qui forme les astronautes de la NASA en océanographie et en météorologie marine. Il a été secrétaire général de l'Association internationale pour les sciences physiques de l'océan de 1987 à 1995 et a travaillé pendant vingt ans pour le bureau des recherches navales des Etats-Unis. Il est l'auteur de nombreux articles scientifiques, mais aussi de livres d'enseignement et de vulgarisation en géophysique.*

*« Nous venons de voir la plus grande nappe de pétrole que l'on puisse s'imaginer, au large de l'Argentine. Le Soleil se réfléchit sur elle en produisant des irisations spectaculaires, et il y a des tourbillons ainsi que toutes sortes de méandres. Ça doit bien faire au moins 2 500 km de long. »*

Skylab-4, novembre 1973

Cette observation, qui est rapportée début novembre 1973 dans l'hebdomadaire du centre spatial Johnson, *Skylab Updates*, avait été transmise par l'équipage de Skylab-4. Ce que les astronautes avaient observé était à l'évidence une efflorescence massive de phytoplancton dans le courant des Malouines. C'est en tout cas la conclusion à laquelle est rapidement parvenue l'équipage de Skylab — les colonels Gerald Carr et William Pogue, et le docteur Edward Gibson. C'était la première grande efflorescence de phytoplancton observée depuis l'espace, elle a duré toute la mission de quatre-vingt quatre jours et a donné l'occasion de la première vérification expérimentale de l'existence de tourbillons de cisaillement le long de la frontière d'un courant.

L'observation de « tourbillons » dans le courant des Malouines a tellement impressionné l'équipage de Skylab-4 que le colonel Carr fit, en décembre 1973, un « cours d'océanographie » en direct du laboratoire spatial. Illustré par des images en temps réel des méandres et des tourbillons présents dans le courant, le cours apportait la preuve de leur naissance et développement à la frontière du courant.

Cette information a attiré l'intérêt de deux océanographes de l'US Navy, Paul Scully-Power et moi-même, qui, à l'époque, travaillaient à démêler des signaux inhabituels en provenance de plates-formes sous-marines mobiles de surveillance acoustique. La solution pouvait bien se trouver dans ces tourbillons qui étaient périodiquement « relâchés » aux frontières des principaux courants océaniques.

Tandis que Skylab était encore en orbite, un avion Orion de l'US Navy s'est envolé de Jacksonville, en Floride, pour aller vers les Caraïbes occidentales. Volant au-dessus de la frontière ouest du principal courant des Caraïbes, l'équipage a largué des sondes de température le long de la trace

que suivait la station Skylab. Les données en température ainsi recueillies, conjuguées aux observations spatiales, permirent d'établir que les tourbillons naissaient bien au bord du courant.

Nous tenions l'explication de nos signaux acoustiques inhabituels. Mieux encore, il était fort probable que des tourbillons se formaient de la même façon aux frontières de cisaillement de chaque courant océanique sur toute la planète ! L'article que je publiais peu après, en 1974, exprimait ce concept.

## LA RECHERCHE OCÉANOGRAPHIQUE PENDANT LE PROJET APOLLO-SOYOUZ

Le concept selon lequel des tourbillons, avec des diamètres pouvant atteindre 100 km, étaient continuellement créés le long des courants océaniques, intriguait beaucoup la communauté d'océanographes et d'acousticiens de l'US Navy. Du coup, le programme de recherches océanographiques entrant dans le cadre du projet Apollo-Soyouz a été élargi. Après avoir sélectionné quatre sites océaniques, l'équipage Apollo fut entraîné pour réaliser des observations, tout comme les équipages des bateaux et avions de l'US Navy, de la Royal Air Force, de la Royal Australian Navy et de l'establishment militaire néozélandaise.

Bien que l'on ait obtenu des données extraordinaires, on a accompli une « percée » quand le météorologue du porte-avions USS Kennedy nous a fourni l'enregistrement d'images infrarouges par le satellite militaire de météorologie. Le porte-avions se trouvait en Méditerranée à l'époque où il a enregistré les images qui couvraient la mer de l'Italie jusqu'à la partie orientale de l'océan Atlantique. Le centre de réception installé à bord de l'USS Kennedy n'avait pas la capacité de reconstituer les images à partir des données satellitaires en provenance des capteurs infrarouges du satellite de météorologie militaire. Les bandes magnétiques ont donc été envoyées à North Island, San Diego, au nouveau centre de traitement des données satellitaires du service

météorologique de l'US Navy. C'est là que Robert Writner a, pour la première fois de l'histoire, préparé des images infrarouges de la surface de la mer, en particulier autour du détroit de Gibraltar. Non seulement ces images cadraient parfaitement avec les photographies du golfe de Cadix prises par Tom Stafford, commandant de la mission Apollo, mais en plus, elles fournissaient les premières informations sur les tourbillons dans la Méditerranée occidentale. (Ces images et les données qui les accompagnaient ont été publiées dans mes articles de 1977 et 1979.)

## La nouvelle des tourbillons se répand

Pendant ces mois d'hiver 1974-1975, ces images ont attiré l'attention de Robert « Buzz » Bernstein, à la Scripps Institution of Oceanography. Buzz travaillait alors sur la variabilité intra-annuelle et interannuelle du courant de Californie et il a tout naturellement demandé à obtenir des images infrarouges des eaux au large des côtes occidentales américaines. La division spatiale de l'US Air Force donna son accord et demanda au centre de North Island de les lui fournir dès que possible.

Il est très vite apparu que le courant de Californie était beaucoup plus complexe que ce que l'on imaginait. De plus, Buzz et moi-même pensions qu'il y avait des tourbillons de la partie orientale de l'océan Pacifique jusqu'aux îles hawaïennes — aussi loin que pouvait « voir » le satellite de météorologie militaire. Nous voulions alors discuter de ces résultats avec d'autres océanographes, surtout avec ceux qui étaient à l'aise dans le domaine théorique.

Lors d'un déjeuner-discussion à Scripps, en février 1976, Buzz Bernstein fit une présentation informelle, avec des illustrations et des données, en concluant que « *des tourbillons à mésoéchelle [échelle moyenne], de 100 à 150 km de diamètre, semblent couvrir de grandes zones océaniques. Ils sont nettement différents des anneaux "pinçés" provenant du Gulf Stream ou du courant du Kuro-Shivo, au large du Japon* ».

Il y a eu plus que quelques instants de silence. Buzz venait d'émettre une

idée à vous donner le vertige. Finalement, le Dr Walter Munk, travaillant à Scripps depuis 1940, vers qui toute la communauté océanographique se tournait pour avoir une réponse « oui ou non », se leva, remballa ses affaires et nota : « *Je ne crois pas que cela puisse vraiment être le cas. Après tout, s'il y avait tant de tourbillons, nous n'aurions plus aucun espoir de modéliser l'océan.* »

(De ce point de vue, Munk avait absolument raison. Même si les modèles de circulation générale, MCG, se sont améliorés de plusieurs ordres de grandeur au cours des vingt dernières années, on attend toujours, pour de nombreuses raisons, un modèle prédictif pratique. Il existe des tourbillons sur des échelles de diamètre allant du « méso » — 100 à 150 km — au « subméso » — moins de 50 km. Aucun d'entre eux ne sont linéaires et même quand on essaye de les prendre à revers grâce aux transformées de Fourier, on n'aboutit pas à des résultats satisfaisants.)

La semaine suivante, je recevais un appel de Walter Munk me demandant d'apporter certaines des photographies spatiales faisant apparaître des tourbillons. Après avoir rapide-

ment vérifié que la même demande avait été faite à Buzz, nous nous sommes rendus ensemble chez Munk l'après-midi même. Celui-ci examina les photos avec attention, sans un mot. Puis demanda en se renversant dans son fauteuil : « *Pouvez-vous me laisser tout ceci pour quelques jours ?* » Nous lui avons laissé l'ensemble des documents, ainsi que les articles que nous avions publiés sur le sujet.

Comme d'habitude avec Munk, nous n'avons pas eu de réponse pendant plusieurs mois. Nous espérions seulement que les tourbillons « macéraient » en lui.

Je ne voudrais pas laisser l'impression qu'au printemps 1976, Scully-Power, Bernstein et moi-même étions seuls contre une armée de non-tourbillonneurs. Il y avait au moins une dizaine d'océanographes descriptifs, cinq ou six théoriciens et plusieurs dizaines de cadres chargés de la surveillance acoustique, convaincus que les tourbillons océaniques de quelques dizaines de kilomètres de diamètre étaient plutôt fréquents. Chacun d'entre nous étions devenus malvus par les modélisateurs, particulièrement ceux de Princeton, Yale et du Massachusetts Institute of Technolo-

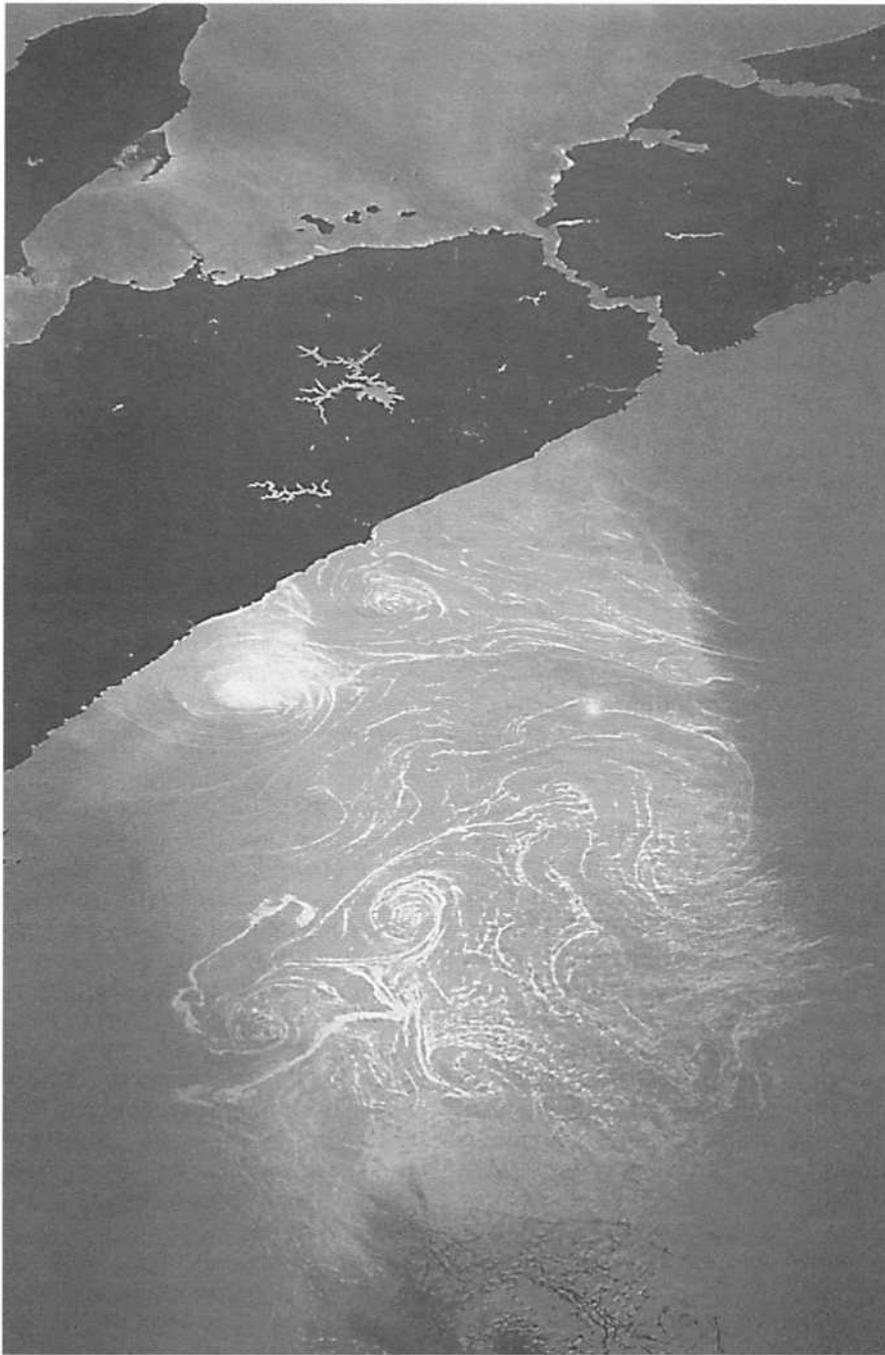
## Observer la dynamique de la surface océanique

Le reflet du Soleil sur la surface de la mer — le « scintillement du Soleil » — s'est révélé être le meilleur outil pour les observations visuelles de l'océan depuis l'espace. On peut non seulement observer les détails des turbulences proches des côtes, mais c'est la seule méthode pour observer la dynamique de l'océan en pleine mer et autour des îles.

Dans la partie centrale dorée du reflet solaire, une surface de mer plane réfléchit les rayons du Soleil avec beaucoup plus de force qu'une mer agitée par les vagues. Le Soleil est alors réfléchi directement vers l'observateur, comme dans un miroir. C'est ce que l'on appelle la réflexion directe qui permet les visions qui nous sont devenues familières.

Les régions où la mer est plate, soit à cause de la présence de surfactants, soit parce que les eaux se déplacent dans la direction du vent, ont des reflets brillants, alors que lorsque les eaux vont contre le vent, la mer est agitée par des vagues qui provoquent une réflexion diffuse et terne. Ces différences de réflexion s'observent très bien mais, en plus, elles peuvent être photographiées. C'est aussi comme cela que les scanners des satellites météorologiques ou les radars spatiaux à ouverture synthétique peuvent obtenir des images des mouvements de la surface océanique.

Sur le bord du reflet solaire, les couleurs dorées tournent au bleu. Les eaux plates prennent alors une couleur sombre tandis que les eaux agitées ont une teinte bleue pâle. Or c'est souvent la partie centrale du champ de réflexion des rayons solaires qui provoque l'éblouissement de la lentille (celle de l'œil comme celle des objectifs). Les détails fins des turbulences sur la surface océanique, parfois perdus dans l'éblouissement du centre, sont mieux observés sur le bord du champ de réflexion.



*Cette photographie a été prise par le capitaine Robert Gibson, commandant d'Endeavor, à partir du nord-ouest au-dessus de la mer Noire occidentale, vers la Turquie et le Bosphore. Le champ de tourbillons en spirale est resté à cet endroit tout le long de la mission, même si certains tourbillons ne pouvaient pas être identifiés d'un jour à l'autre. On n'explique toujours pas l'absence de tourbillons dans les eaux de l'est et du nord-est de la mer Noire, à l'embouchure du Bosphore.*

gy. Les mailles de leurs modèles étaient, à l'époque, beaucoup trop grandes pour pouvoir faire autre chose que d'intersecter un tourbillon inconnu, ce qui n'aboutissait qu'à planter l'ordinateur.

Nous avons aussi appris, grâce à un contact dans le renseignement, que les tourbillons océaniques repré-

sentaient un « sujet brûlant » pour les océanographes soviétiques, placés sous la direction du Dr Konstantin Fedorov, un océanographe physique pragmatique, inventif et assez exigeant, qui était le nouveau directeur de la division Océanographie spatiale de l'Académie soviétique des sciences. La plupart des océanographes de

l'US Navy pensaient que Fedorov avait appris l'existence des tourbillons de cisaillement bien avant nous et que cette information était déjà utilisée d'un point de vue tactique par les sous-marins soviétiques. Nous savions que Fedorov était ingénieux et tenace, aussi nous n'avons pas été surpris d'apprendre qu'il avait réussi à convaincre la flotte soviétique ; c'était un personnage fort et convaincant. Il fallait, selon nous, incontestablement poursuivre nos recherches.

(Incidentement, j'appris, douze ans plus tard, que Konstantin était mon cousin issu de germains, ma grand-tante ayant épousé son grand-père.)

Au début de l'été 1976, probablement à la mi-juin, Munk annonçait qu'il allait organiser un séminaire informel à Scripps, à l'Institut de géophysique et de physique planétaire qu'il dirigeait, dans la grande salle de classe qui surplombe la côte océanique de La Jolla. Il indiquait qu'il développerait certaines des idées qu'il pensait présenter à l'Assemblée océanographique plénière prévue en août à Edimbourg.

Il me faut ici décrire un peu le contexte. A partir de 1959, le comité scientifique de recherche océanique de la Commission océanique internationale avait lancé des assemblées océanographiques plénières (c'est-à-dire internationales) de façon à permettre aux scientifiques étudiant la mer de communiquer entre eux plus directement et plus souvent que par le passé. Il faut se rappeler qu'à l'époque, les satellites de télécommunications, les e-mails et les télécopieurs n'étaient encore que des rêves et les avions de lignes n'étaient pas aussi accessibles qu'aujourd'hui. Il y avait déjà eu des assemblées plénières à New York, Moscou et Halifax. Edimbourg arrivait à point pour la célébration du centième anniversaire du retour du HMS Challenger, une expédition océanographique autour du monde qui dura trois ans et demi. Cette croisière monumentale avait marqué les débuts de la discipline océanographique, et comme Edimbourg était le port du retour, on ne pouvait pas mieux espérer mieux comme lieu de cette célébration.

Tout le monde serait là — personne ne pouvait manquer cet événement. Tous les champs de l'océanographie allaient être représentés dans les vastes salles de l'université. Pour

chacun d'eux, un orateur principal présenterait l'état de nos connaissances après cent ans de recherches. C'était Walter Munk qui devait donner le discours d'ouverture pour l'océanographie physique.

Certains d'entre nous voyaient plus loin que le discours de Munk. Fedorov serait là et allait être élu président du comité scientifique pour la recherche océanique. Peut-être serions-nous en mesure de lui verser force rasades de Guinness pour apprendre quelques détails sur les études soviétiques en matière de tourbillons (bien que Fedorov but effectivement avec abondance après son élection, il refusa de manière inflexible de discuter des tourbillons).

Revenons maintenant en juin 1976, lorsque Munk s'adressa à une cinquantaine d'océanographes à Scripps. Il commença par remercier Buzz Bernstein et l'US Navy pour lui avoir fourni les images infrarouges des températures de surface de la mer. Il avait aussi étudié les photographies de Skylab et du projet Apollo-Soyouz « que Bob Stevenson avait pu obtenir ». Après avoir parcouru le labyrinthe descriptif et théorique des couches supérieures de l'océan, il vint finalement à l'essentiel :

*« Je pense réellement que tout devient plus clair. Il y a certainement beaucoup de tourbillons dans l'océan ; bien davantage que les anneaux qui se détachent des principaux courants. Je pense qu'ils représentent l'essentiel du mouvement à la surface de l'océan. »*

Walter conclut alors, en s'excusant presque : « Vous savez, je dois dire cela à tout le monde, à Edimbourg. » La pause café de cet après-midi fut animée !

## Université d'Edimbourg, 10 août 1976, 8 h 05

Dans l'immense amphithéâtre, plus de six cents océanographes sont assis serrés les uns contre les autres. Le Dr Walter Munk a été présenté et les applaudissements s'interrompent. Au dernier rang, très haut, je suis assis aux côtés de Buzz Bernstein, Paul Scully-Power, Denny Kirwan (ancien océanographe de l'US Navy, aujourd'hui à Texas A&M) et Joe Reid (de Scripps). On savait tous, dans les grandes lignes, ce qui allait venir et



*Dr Walter Munk (à gauche) en compagnie du contre-amiral Bradford Mooney, à la Scripps Institution of Oceanography en juillet 1985. Munk a été directeur de l'Institute of Geophysics and Planetary Physics à l'université de Californie (San Diego), et Mooney a été océanographe de la Navy.*

on souriait, en dépit de l'heure matinale, en regardant la foule. Depuis que le Challenger était revenu il y a cent ans, avec de nouvelles informations sur les courants océaniques majestueux qui parcourent les océans du monde, et sur les masses d'eau froide et dense qui se meuvent à grande profondeur, tous les calculs sur l'énergie cinétique de l'océan avaient consisté à mesurer ces grands mouvements. La plupart des études sur la physique océanique du dernier siècle s'étaient concentrées sur ces énormes masses d'eau en mouvement.

Walter, en veste tweed décontractée, portée avec un pull de laine et ses habituels pantalons kakis, s'était placé sur le côté du podium et s'appuyait dessus en croisant lentement ses jambes. (Denny gloussa : « Il a son attitude pontificatrice, ça va être bien. »)

Souriant, regardant l'audience à gauche et à droite, microphone en main, Munk commença :

*« Bonjour mesdames et messieurs. C'est un grand honneur pour moi d'être ici aujourd'hui alors que nous célébrons le centième anniversaire de l'expédition Challenger. Au cours de ces derniers mois, j'ai passé en revue de détail l'état de nos connaissances sur l'océan. Pour ce faire, j'ai été soutenu par de nombreux collègues du monde entier.*

*« Je veux commencer en vous disant qu'il est désormais clair que 99% de*

*l'énergie cinétique des océans se trouve dans les tourbillons à mésoéchelle. »*

Munk cessa de parler, tandis que le choc de cette déclaration commençait à se faire sentir dans l'audience. Quand les murmures se calmèrent, Walter continua : « Messieurs, pendant les cent dernières années, nous avons traité 1% du problème ! » Six cents océanographes étaient assis droits comme des piquets. Cinq d'entre eux, tout en haut de l'amphithéâtre, souriaient largement et se seraient les mains.

Munk aurait alors pu dire « Merci, mesdames et messieurs » et quitter le podium. Il avait en effet dit l'essentiel et bouleversé les six cents principaux océanographes du monde. Cependant, ce n'était pas sa façon de faire. Aussi, pendant l'heure qui a suivi, Munk a présenté ses données et ses analyses à l'assemblée avec son inimitable profondeur.

L'étude des océans et mers du monde ne serait plus jamais la même. La détermination de la dynamique océanique que Munk proposait était une révolution aussi importante pour l'océanographie que la tectonique des plaques pour la géologie et la géophysique de la Terre ferme.

Souvenons-nous également qu'à l'époque, personne ne savait comment intervenaient les tourbillons en spirale, et certains n'en connaissaient même pas l'existence. Sachant

aujourd'hui que ces eaux organisées en spirale cyclonique, étranges et toujours présentes, se retrouvent dans tous les océans, nous devons nous rendre à l'évidence : elles représentent une partie significative de l'énergie cinétique attribuée par Munk aux « tourbillons ». Il est donc évident que, si nous voulons comprendre la dynamique de la couche supérieure de l'océan, nous devons comprendre les caractéristiques inhérentes aux tourbillons en spirale.

## LA SAGA DU TOURBILLON EN SPIRALE NON LINÉAIRE

De tous les aspects de l'océan découverts grâce aux observations et photographies réalisées depuis la navette spatiale, les tourbillons en spirale ont sans doute été les plus surprenants et les plus importants pour l'océanographie. Non seulement étaient-ils inconnus avant la percée des observations de 1973, mais on ne suspectait même pas leur existence ! Aujourd'hui, nous savons que les tourbillons en spirale se retrouvent partout dans les océans.

Bien sûr, la littérature océanographique comptait de nombreux rapports sur les remous en spirale dans les détroits, à l'entrée des baies ou bien dans les courants autour des îles et des irrégularités submergées d'un haut fond. Ceux du détroit de Messine, entre Scylla et Charybde, sont connus par les récits historiques et ils ont été décrits avec précision par Albert Defant en 1940. Dans les années 80, ils ont été examinés en détail par le Dr W. Alpers grâce aux images spectaculaires du satellite océanographique SEASAT.

Il y a aussi le « Maelström » d'Edgar Allan Poe, au large des îles norvégiennes de Lofoten, ou encore, moins connue mais tout aussi impressionnante, la « Old Sow » dans la baie de Fundy, entre le Nouveau-Brunswick et la Nouvelle-Ecosse. La baie de Fundy, du fait de sa forme et de sa taille, connaît les plus grandes marées du monde. Lorsque la marée monte, la Old Sow tourbillonne et écume avec des grognements qui lui valurent son nom [« Old Sow » signifie littéralement « vieille truie », *NdT*]. Comme Poe le raconte pour le Maelström, la

Old Sow charrie des troncs d'arbres, des restes de jetées et même des bateaux, tandis qu'elle rugit et bouillonne. Une rotation cyclonique, semblable à celle de la baie de Fundy mais beaucoup moins intense, se forme dans le nord du golfe de Californie, à cause des échanges tidaux. Elle est connue des pêcheurs mexicains et a été observée et photographiée depuis l'espace.

Mais tous les tourbillons d'eau mentionnés avant 1981 se trouvent dans des détroits ou dans des passes. Les marées montantes et descendantes produisent de grands échanges d'eau à travers des chenaux étroits, ce qui crée des courants très rapides et une turbulence extrême par interaction avec les rivages et avec les hauts fonds. En fait, ces caractéristiques sont si bien connues dans la littérature que les premiers tourbillons en spirale observés depuis la navette furent d'abord pris pour des interactions entre des courants locaux et des îles.

## Les événements de la découverte

Il est bon de récapituler les événements qui ont mené à réaliser que les tourbillons en spirale en plein océan sont importants pour l'océanographie. De façon surprenante, cela se résume à l'histoire d'observations réalisées par les astronautes de la navette.

En 1980, je préparais un cours d'introduction océanographique pour les unités de la flotte américaine déployées dans le Golfe persique. Les informations de base disponibles étaient les images infrarouges enregistrées par les satellites météorologiques de la NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration) et préparées au centre satellitaire de Scripps, à La Jolla. Les données furent « élargies » au maximum pour permettre la meilleure analyse des gradients de température relative à travers les frontières thermiques, surtout dans les eaux proches de la péninsule arabe et du golfe d'Oman. Grâce aux images améliorées, on pouvait observer des différences de température relative de 0,1°C, lorsque l'atmosphère était sèche ; principalement en fin d'automne, hiver et dé-

but de printemps.

Pendant ces mois, un tourbillon apparut à plusieurs reprises dans le golfe d'Oman, avec des anneaux qui représentaient des différences de température de 0,1°C. Il n'existait pas de raison logique pour que les eaux du golfe, ou n'importe quelles autres eaux en l'espèce, soient coupées en tranches verticales de 0,1°C. L'explication probable tenait au fait que les anneaux résultaient des changements dans l'émissivité de la surface de la mer causés par des nappes (*slicks*). C'était exactement ce que le capitaine John Young a vu et photographié lorsque la navette Columbia est passée en orbite au-dessus du golfe d'Oman, en avril 1981. Bien que cela soit intéressant de confirmer l'idée que les nappes pouvaient être les traceurs du tourbillon d'Oman et répondaient dans l'infrarouge, l'existence même d'un tourbillon était considérée comme une réaction naturelle aux courants et à la configuration du rivage.

Pour son second vol, en novembre 1981, Columbia emportait dans sa cargaison un SEASAT modifié et baptisé SIR-A (Shuttle Imaging Radar-A, le premier emporté par une navette). Au départ conçu comme une expérience géologique, le programme SIR-A n'avait retenu que quelques zones océaniques pour être examinées en imagerie radar. Le programme s'est toutefois trouvé bouleversé lorsque des problèmes intervenus dans les systèmes de la navette ont obligé à réduire le temps en orbite de cinq jours à deux jours et demi. Pour obtenir le plus d'images possibles, le SIR-A a été activé en passages longs et il a acquis, de ce fait, davantage d'images océaniques que d'images terrestres.

L'océan observé était en grande partie « plat », des milliers de kilomètres carrés de surface océanique ne faisant même pas apparaître de houle. Cependant, dans la mer des Caraïbes, juste au nord d'Aruba, et dans le canal entre Cuba et les Bahamas, près de l'île Squawland, le SIR-A a observé des tourbillons en spirale. Tous deux avaient un diamètre d'environ 15 km et celui d'Aruba avait plusieurs nappes (apparaissant en sombre sur l'image radar) qui tournaient autour d'un noyau central lisse. La plupart des nombreuses taches sombres ont été interprétées comme un nettoyage de cale de bateaux se dirigeant vers Maracaïbo, surtout trois taches qui se

## Films de surfactants sur l'océan

Les films naturels de surfactants se forment avec des hydrocarbures, des acides gras, les alcools aliphatiques, les éthers et autres composés produits par la décomposition des organismes marins. On trouve également des hydrates de carbone et des polypeptides, mais ils sont assez solubles dans l'eau et jouent un petit rôle dans la formation des surfactants. Les produits pétroliers, principalement dans les eaux côtières, forment aussi des films, mais ceux-ci diffèrent grandement des films naturels de pétrole.

Dans des conditions idéales, lorsqu'on place sur une surface d'eau une petite quantité d'un matériau chimiquement pur, non volatil et insoluble, il reste sous forme de goutte compacte ou bien se répand sur toute la surface. Pour que la deuxième chose arrive, il faut déjà que les molécules du matériau aient une plus grande attirance pour les molécules d'eau que pour leurs semblables.

Alors, en se répandant, les molécules tendent à se mettre en contact avec le maximum de molécules d'eau. Si la surface le permet, se forme un film de l'épaisseur d'une molécule seulement (une couche monomoléculaire).

Dans des conditions réelles, les films de surface sont des mélanges de différents surfactants. Ils ne s'étalent pas en couches monomoléculaires, mais leur épaisseur est de l'ordre de plusieurs diamètres moléculaires. Toutefois, la plupart des films organiques formés en mer sont composés de substances qui ont des compositions chimiques extraordinairement similaires et leur action de couverture est donc proche de celle du matériau idéal.

Pour notre propos, il est suffisant de noter que les films de surfactants ne se forment que lorsqu'il existe une grande cohésion tangentielle. Les molécules du film se rassemblent en grandes formations, condensées et donc capables de se répandre librement à la surface de l'eau.

La manifestation la plus évidente et la plus significative des films de surfactants est la tendance à annihiler les ondes capillaires. Non seulement les films amortissent les ondes de surface existantes, mais ils empêchent la génération de nouvelles ondes. John Miles, de l'université de Californie à San Diego, le soulignait il y a trente-cinq ans : « *Un film de surfactant suffisamment inélastique élèverait d'un ordre de grandeur la vitesse du vent minimum nécessaire pour générer des vagues.* » Sur la mer naturelle, cependant, les films sont généralement détruits par des vents de 5 à 7 m/s.

### Les effets visibles des surfactants

En quoi les surfactants sont-ils utiles pour les observateurs ? L'effet d'un film de surfactants sur l'interaction air-mer est de la plus haute importance pour l'observation ou la mesure à distance de l'océan depuis l'espace. Non content de diminuer la réponse de la surface de mer à l'action du vent (qui transfère de l'énergie à celle-ci), un film retarde l'évaporation. De ce fait, la microconvection de l'interface air-mer est complètement annulée, ou réduite, ce qui empêche la formation d'un film d'eau froide qui fait, en théorie, quelques centimètres de profondeur.

Si c'était le seul effet du film, les mesures thermiques par infrarouge de la surface de mer indiqueraient une température de l'eau supérieure à la température réelle. Mais le film réduit également l'émissivité thermique de la surface, au point que les mesures par infrarouges sont généralement inférieures à la réalité, à tel point que c'est un bon indicateur de la présence du film.

Mais c'est dans les parties visibles et micro-ondes du spectre électromagnétique que les films ont la plus grosse influence sur les mesures à distance sur l'océan à partir des plates-formes spatiales. L'effet optique des surfactants est dû à la réduction des ondes capillaires. A partir d'une surface ainsi lissée, la lumière réfléchie tend à être polarisée de façon elliptique, au lieu d'avoir un seul axe de polarisation. Lorsqu'on les observe dans un oculaire ou sur une photographie, les nappes (*slicks*) apparaissent donc plus brillantes au centre du champ de réflexion, et plus sombres que les eaux environnantes au bord.

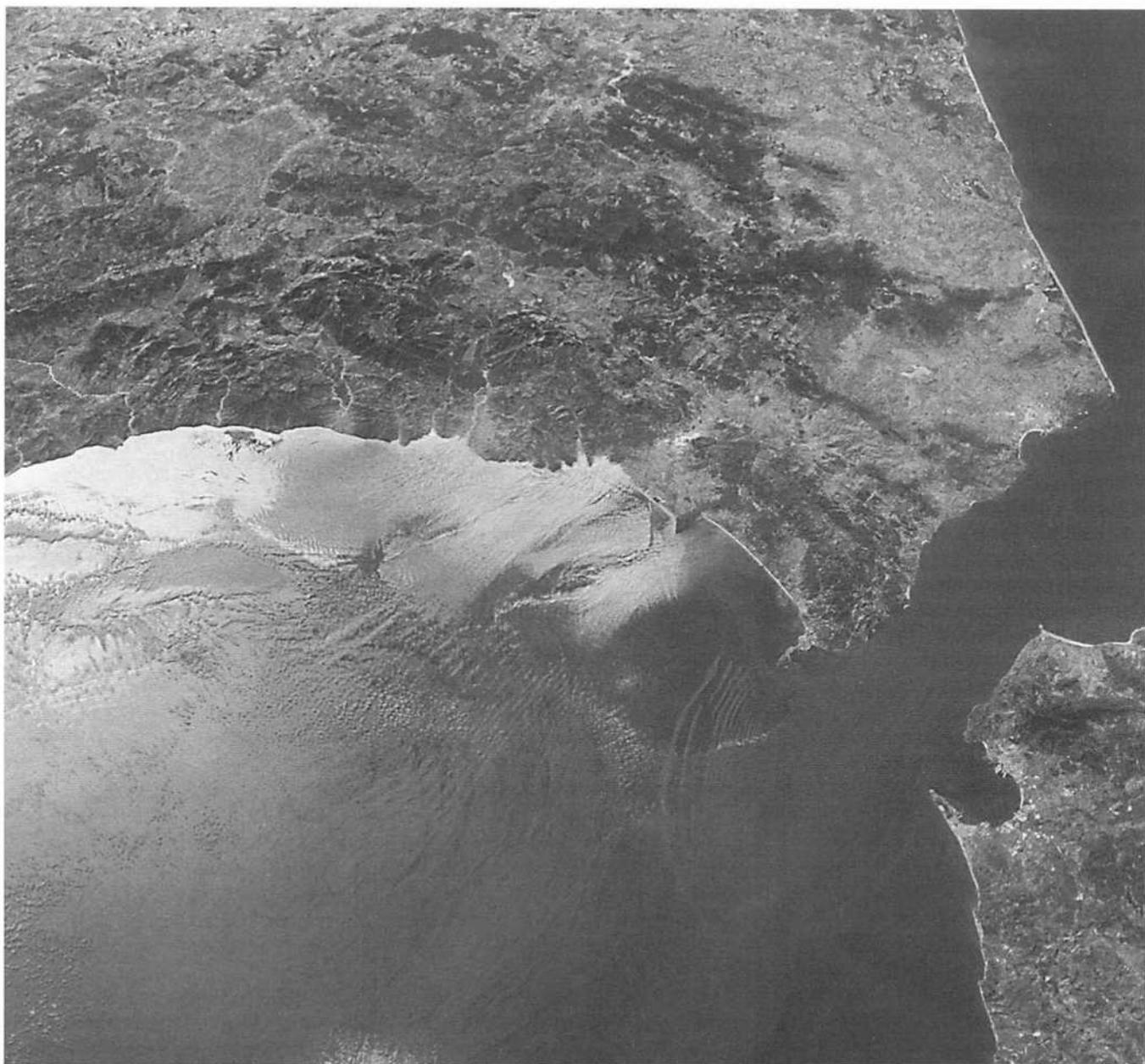
L'annulation des capillaires et la diminution correspondante du clapot de surface entraînent une baisse de la quantité de rayonnement réfléchi par unité de surface, dans la gamme des micro-ondes. En effet, dans la diffusion résonnante, la section efficace du rayonnement diffusé dans la direction du récepteur est proportionnelle au spectre de l'onde de surface. Les films de surfactants améliorent les images obtenues par radar à ouverture synthétique, mais limitent assez sérieusement la précision des déterminations par micro-ondes de la vitesse du vent sur l'océan.

### Films de pétrole et d'huile

Contrairement aux films de surfactants, les films de pétrole ou d'huile ne s'étirent jamais jusqu'à devenir une couche monomoléculaire. Leur épaisseur est plutôt de l'ordre d'une dizaine de diamètres moléculaires. Sur l'océan, le pétrole peut apparaître sous forme de films épais, de « cordes », de « boules de bitume » ou de couches émulsionnées (en suspension).

Si les produits pétroliers dans l'océan représentaient une proportion significative des surfactants naturels, la pollution serait catastrophique. Heureusement, ce n'est pas le cas. On estime qu'environ 0,25% des 10 millions de tonnes de produits pétroliers produits chaque année terminent sa course dans l'océan. La plus grande partie de cette pollution vient du dégazage des supertankers en pleine mer et des paquebots ou cargos qui évacuent l'eau de ballast de leurs réservoirs à carburant.

Dans les zones côtières où les rivières se jettent à la mer, la situation est assez différente. Le volume des produits pétroliers transportés par les rivières est trois fois supérieur au volume dû aux bateaux, même en tenant compte des marées noires accidentelles. Ces produits sont rejetés par les usines, les raffineries ou les centres de stockage, comme on pourrait s'y attendre. Mais la plus grande quantité — double de celle correspondant aux marées noires accidentelles — vient des stations service dont les rejets aboutissent dans les réseaux d'égouts, puis dans les rivières. En dehors des bras de mer confinés, comme le golfe Persique, des baies, estuaires et lagons, ou des côtes ouvertes temporairement polluées par des marées noires, les produits pétroliers ne jouent pas un rôle significatif dans le développement à grande échelle de films de surface. Bien qu'ils aient un impact mesurable sur la qualité des eaux dans les zones précédemment recensées, ce qui crée des problèmes d'enlèvement difficiles, les films de pétrole ont globalement une influence minimale sur l'émissivité de la surface marine. Leur présence ne présente donc pas un intérêt majeur pour l'application à l'océan des techniques de mesure spatiale.



*Des solitons, un autre phénomène océanique qui a d'abord été observé depuis l'espace, ici dans le détroit de Gibraltar et photographiés par Paul Scully-Power à 190 miles nautiques avec un appareil Hasselblad 70-m modifié et une lentille de 60 mm. Ces groupes de vagues solitaires voyagent à une vitesse de 10 km/h et gardent leur forme pendant des centaines de kilomètres.*

trouvaient en ligne derrière un navire. Il était donc logique de penser qu'il y avait beaucoup de pétrole aux alentours qui aidait à la formation de nappes dans le tourbillon. Etant donné la proximité d'Aruba, la meilleure hypothèse était que la présence de ce tourbillon était due à cette île.

On a fait le même raisonnement pour le tourbillon proche de l'île Squawland, mais les images du SIR-A ont fourni une information intrigante et nouvelle. Deux sillages arrières de navires traversaient le tourbillon. La partie du sillage qui rencontrait une nappe du tourbillon était cour-

bée vers le centre de celui-ci, comme si la nappe allait plus vite que les eaux environnantes. (Cela confirmait les observations aériennes réalisées par Stevenson au large de la Californie méridionale, sur des sillages croisant les bras de tourbillons près de l'île Catalina.)

Les images du SIR-A étaient certainement intéressantes. Les phénomènes océaniques, tels que la houle de réfraction et les ondes internes, pouvaient être étudiés dans la bande radar L (2 m de longueur d'onde). Mais, à moins d'avoir l'attention attirée par les tourbillons présents aux

alentours des îles, les spirales isolées repérées par le SIR-A n'allaient pas provoquer de bouleversement.

## Les vols de la navette STS-7 et 8

Les observations océanographiques du vol STS-7 de juin 1983 furent concentrées sur l'océan Pacifique tropical, de Hawaï vers l'équateur, à cause des effets attendus qu'auraient sur ces eaux un événement El Niño fort.

Les tourbillons en spirale ont été inclus dans les briefings préparatoires de l'équipage, mais pas plus que les ondes internes auxquelles on pouvait s'attendre aux frontières sud de la mer de Chine.

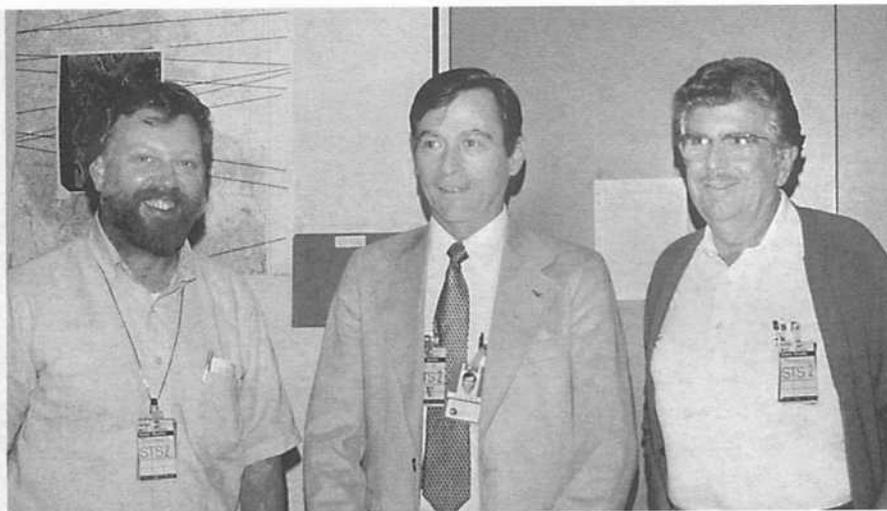
Les photographies et les observations du Pacifique ont été excellentes. Mais c'est de l'océan Indien au sud de l'équateur que sont venues les « percées » ! Le Dr Sally Ride et le colonel John Fabian ont vu, et rapidement photographié, deux ensembles de tourbillons en spirale qui tournaient de façon cyclonique, dans le sens des aiguilles d'une montre ! Isolés, sans interconnexion apparente de lignes de courant, les tourbillons étaient à 1 000 km de la côte la plus proche, à un endroit où la profondeur atteint 7 000 m. Aucune influence topographique ne pouvait donc expliquer leur origine. Il s'agissait clairement de structures dynamiques en plein océan dont l'orientation cyclonique indiquait de surcroît une réponse aux forces de Coriolis, due à la rotation de la Terre !

*« Je vois l'océan le plus complexe que l'on puisse imaginer. Dites à ces océanographes qu'il y a des tourbillons aussi loin que l'on puisse voir — tout le long de notre orbite jusqu'à l'océan Indien. Ce sont tous des tourbillons en spirale — nous les voyons dans la mer de Tasmanie et aussi dans le Pacifique à l'est de la Nouvelle-Zélande. »*

(« Ces océanographes », Scully-Power et moi-même, étaient alors en Angleterre pour le compte de l'US Navy. Nous avons appris la nouvelle par un coup de téléphone du centre spatial de Houston.)

Le capitaine Dick Truly, commandant le vol STS-8 en août 1983, rapportera plus tard à Houston que le champ de tourbillons est resté observable pendant les trois derniers jours de la mission. Il a également précisé que « aussi loin que l'on puisse voir » signifiait environ 1 500 km. Cela nous indiquait, pour la première fois, que les tourbillons en spirale n'étaient pas des structures individuelles isolées à la surface de l'océan.

STS-8 fut le premier lancement de nuit d'une navette. L'engin serait au-dessus de l'océan Indien vers midi, heure locale, avec des conditions de lumière parfaites pour observer l'océan. Tout le monde était impatient de savoir si l'observation de tourbillons en spirale dans cet océan par STS-7 n'avait été qu'une vision



**De gauche à droite, Paul Scully-Power, le capitaine John Young (chef de l'Astronaut Office) et Robert Stevenson, au Johnson Space Center en novembre 1981, pendant la mission STS-2.**

chanceuse de tourbillons isolés et à vie courte. Ce n'était pas le cas !

Pendant les cinq derniers jours du vol STS-8, l'équipage a observé et photographié une énorme expansion de turbulence spiralee et complexe. Couvrant tout le sud de l'océan Indien, à des latitudes un peu au nord de 30°S, des tourbillons en spirale, tournant dans le sens des aiguilles d'une montre, étaient connectés les uns aux autres par de longues nappes parallèles (des lignes de courant) dont la longueur atteignait deux ou trois diamètres de tourbillon.

Les observations de STS-8 étaient aussi étonnantes que celles de STS-7. Non seulement les spirales réagissaient de manière dynamique aux forces de Coriolis, mais elles pouvaient se présenter comme des immenses champs de tourbillons interconnectés aussi bien que comme des phénomènes isolés. Ces observations ont entraîné une forte activité sur ordinateur, au NUSC (le centre des systèmes sous-marins de l'US Navy) de Newport, pour essayer de faire entrer des tourbillons en spirale interconnectés de 15 à 20 km de diamètre dans des équations non linéaires — sans grand succès.

## Les observations d'un océanographe en orbite

Pendant la mission 41-G, en octobre 1984, Scully-Power, installé dans

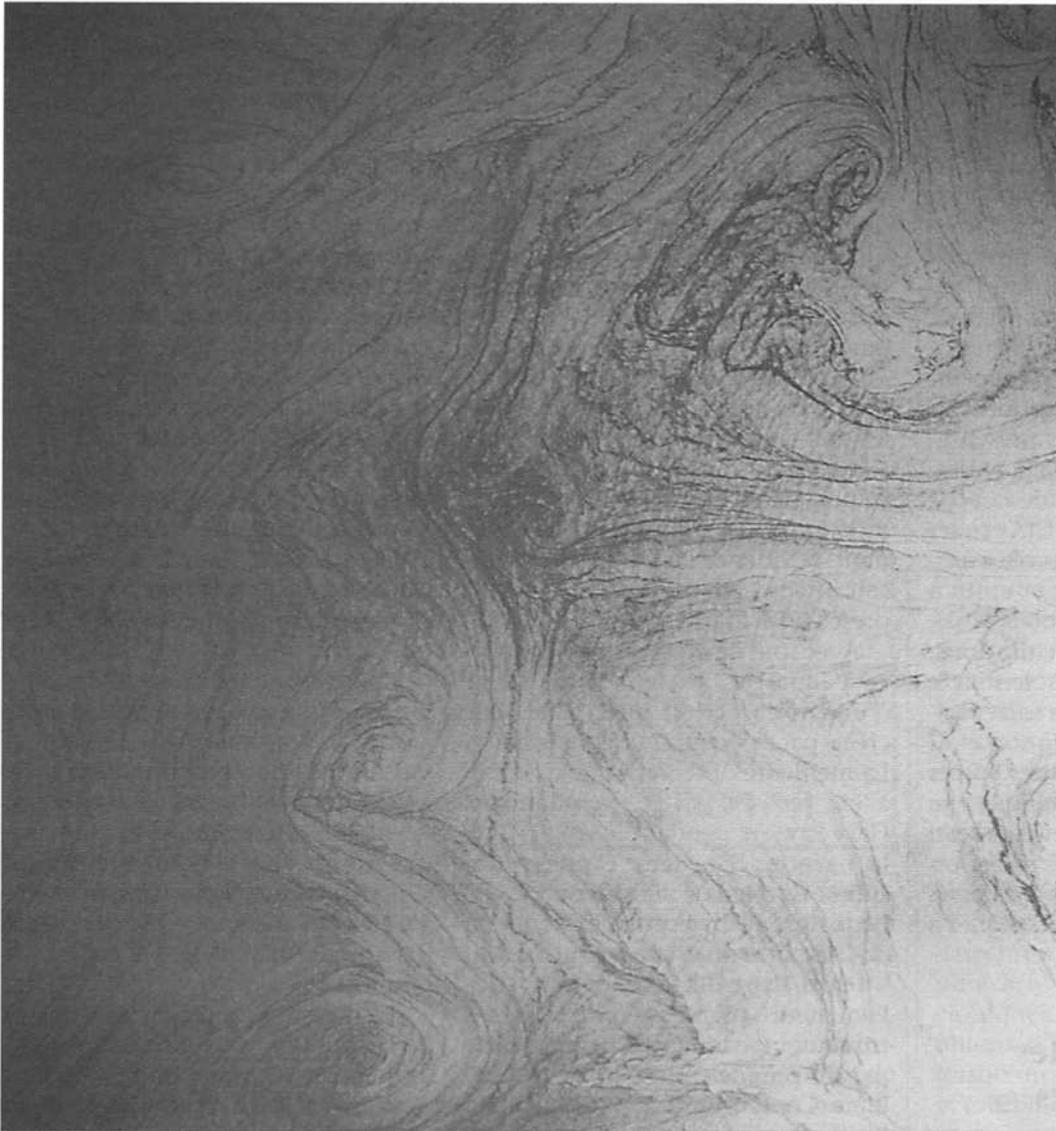
le poste de commandement de la navette, me faisait le rapport suivant : « Il y a des tourbillons en spirale interconnectés d'un bout à l'autre de la Méditerranée. Ils sont là depuis le début de la mission. J'en ai vu aussi dans beaucoup d'autres régions océaniques : sur le bord du Gulf Stream, dans l'Atlantique Sud et au large de la Californie et du Mexique. »

C'était la première fois que l'on observait des tourbillons en spirale dans plusieurs régions à la fois et que ceux-ci persistaient pendant au moins une semaine.

Même si les observations de spirales en diverses régions océaniques avaient continué pendant les missions qui suivirent STS-8, c'est Scully-Power qui a obtenu de nouvelles images significatives. Premier océanographe à voler dans l'espace, sa mission était d'observer, cataloguer et documenter les tourbillons dans le plus grand nombre possible de régions océaniques. Les résultats furent spectaculaires.

Toute la Méditerranée était couverte de tourbillons pendant toute la mission. D'autres séquences tourbillonnaires furent observées le long du mur nord du Gulf Stream, au large du Brésil, de la Californie méridionale, à l'ouest du Mexique, quoique sur des régions moins étendues qu'en Méditerranée. Dans chaque cas, les tourbillons étaient associés à des cisaillements possibles, soit le long d'une côte, soit à la frontière d'un grand courant.

Il ressortait de ces observations



*Surface de la région sud-ouest de l'océan Indien, le 2 septembre 1983. C'est le début de l'observation effectuée par le capitaine Richard Truly, montrant bien, dans l'hémisphère sud, la rotation des tourbillons en spirale dans le sens des aiguilles d'une montre. Les longues nappes de surface interconnectées représentent les lignes de flux d'eau rentrant et sortant des spirales. Les observations et photographies du capitaine Truly nous ont donné l'indication certaine que les tourbillons en spirale étaient influencés par l'effet Coriolis.*

*photo. C'était une vision fantastique — ils apparaissaient soudainement — nous volions au-dessus de l'Atlantique Nord, assez calme, avec quelques nuages. Je n'aurais jamais pensé voir ces grandes efflorescences de plancton aussi loin dans le nord. »*

Ce passage est tiré de la discussion après vol entre le commandant et le pilote (les colonels Bob Overmeyer et Dick Gregory) de la mission navette 61-B, au moment où ils décrivaient la surface de 400 km d'efflorescence planctonique brillante, tournoyant dans un champ de tourbillons en spirale à 45°N dans l'Atlantique. C'était la première observation d'une grande efflorescence de plancton à une si haute latitude, dans l'extension du Gulf Stream.

*« C'est presque comme si vous pouviez "voir" le courant du Mozambique rugissant à travers le venturi qui correspond au canal qui sépare Madagascar et la côte africaine. Il y avait quelques tourbillons au nord et beaucoup d'autres au sud de l'île. Dans le canal, les tourbillons étaient séparés par de*

que les principales forces génératrices étaient de forts cisaillements horizontaux, le long des côtes dans les mers bordières et le long des courants en plein océan. Nous avons conclu que des tourbillons existaient probablement dans toutes les mers où l'on trouvait de tels cisaillements. De plus, il semblait assez clair que les surfactants (voir encadré page 10) répandus à la surface de grandes régions océaniques étaient essentiels pour permettre des observations, visuelles ou par imagerie radar dans la bande L.

Grâce aux efforts convaincants de Scully-Power, il est aussi apparu que les surfactants étaient beaucoup plus répandus à la surface de l'océan que

ce que l'on imaginait avant. Par conséquent, les microplanctons et d'autres activités biologiques marines dans la région supérieure de l'océan devaient être plus importants que ce que l'on estimait généralement. Du coup, le Bureau de la recherche navale lança un important programme de recherches sur la productivité biologique. Et les ordinateurs du laboratoire NUSC de Newport ont travaillé jour et nuit sur la théorie de la dynamique des tourbillons en spirale. (A ce jour, en 1998, ils n'ont toujours pas abouti.)

*« J'ai crié pour appeler le pilote pour qu'il vienne à mes côtés [au poste de pilotage] et prenne l'autre appareil de*

*longues ligne de courant. J'étais même surpris d'y trouver des tourbillons. »*

Cette observation perspicace du commandant de la mission navette 51-F (le colonel Gordon Fullerton) donna de nouvelles informations sur l'hydrodynamique des tourbillons présents dans les courants qui passent à travers de larges canaux.

Pendant le printemps 1985, nous avons acquis une confortable certitude pour un concept de spirales qui se formaient le long des grands cisaillements horizontaux dans l'océan. Mon article décrivant nos connaissances de l'époque fut finalement publié début 1985. C'était le premier rapport scientifique présentant et

commentant des photographies des tourbillons ; il se concentrait sur les observations réalisées par STS-7 et STS-8. Plus tard dans la même année, le rapport de Scully-Power sur ses observations de 41-G fut publié et largement distribué au sein de la NASA, de l'US Navy, de la Royal Navy ainsi que des grandes institutions océanographiques du pays.

Il y a eu un grand enthousiasme aussi bien chez le secrétaire à l'US Navy que chez le chef des opérations navales. A leur suggestion, Scully-Power est allé faire des présentations à l'administrateur de la NASA, au conseiller scientifique de la Maison Blanche, au chef de la CIA et à ses collaborateurs directs, à diverses unités de la flotte atlantique et enfin à des océanographes de Woods Hole, de Scripps et d'autres institutions. Dans le même temps, je présentais le sujet au commandant des forces navales dans le Pacifique et à son état-major, au commandant des forces sous-marines dans le Pacifique, au centre d'océanographie naval de Pearl Harbor, au centre de guerre anti-sous-marine et aux personnels intéressés du centre des systèmes océaniques à San Diego.

## Les astronautes observateurs

Les équipages d'astronautes qui préparaient les missions de 1985 et 1986, ainsi d'ailleurs que tous les astronautes du corps, n'étaient pas exclus de toute cette effervescence.

L'idée que les tourbillons en spirale ne se trouvaient que dans les régions océaniques où il y avait de forts cisaillements horizontaux commença à être remise en question lorsque le commandant et le pilote de la mission 61-B sont revenus avec des photographies et des observations de structures à submésosécale dans la mer des Philippines, dans le golfe du Mexique et dans l'Atlantique nord. Bien que la séquence spectaculaire observée dans ce dernier océan se fut déroulée dans des eaux probablement influencées par le bord nord du Gulf Stream, les autres observations concernaient des mers où aucun courant d'aucune sorte n'était identifié.

Une petite lampe semblait s'allumer dans les profondeurs de notre

cerveau collectif : les tourbillons en spirale sont-ils des phénomènes communs à tous les types de surfaces marines ? Sont-ils présents partout dans l'océan, leur observation n'étant limitée que par la présence ou l'absence de surfactants et l'angle approprié des rayons solaires ?

Au fur et à mesure que les équipages revenaient, mission après mission, avec des photographies de presque tous les océans observables, la réponse est rapidement devenue affirmative. On a observé des tourbillons en spirale dans les eaux de l'Atlantique, du Pacifique, de l'océan Indien, de la mer des Sargasses, de la mer Caspienne, etc. C'est maintenant l'évidence, les tourbillons en spirale sont partout ; ils sont omniprésents !!

Avec tout de même une exception — l'équateur, malgré la présence d'une forte action de cisaillement créée par les courants équatoriaux. La meilleure observation disponible a été réalisée par le commandant Gary Payton, pendant le vol 51-C de la navette. Il a détecté une petite spirale de 5 km de diamètre à 11°S de l'équateur, dans l'océan Indien.

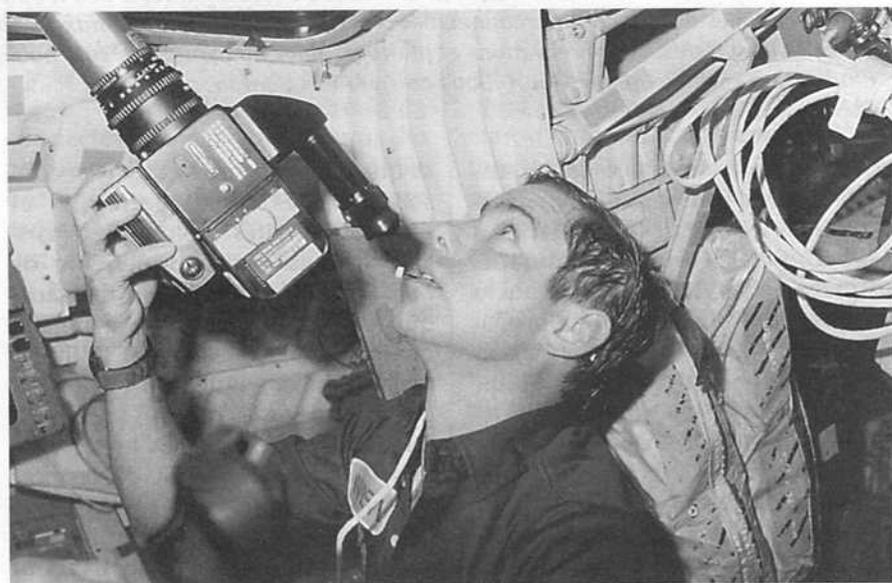
C'est ainsi qu'est né le concours du « tourbillon-le-plus-proche-de-l'équateur » parmi les équipages d'astronautes (rendu attractif, en partie, par un premier prix d'une caisse de bière Coors offerte par mes soins). Scully-Power et moi-même avions calculé (sur le dos d'un étui de billet d'avion) que les spirales ne s'appro-

cheraient jamais de l'équateur plus près que la latitude 6°, du fait de la disparition de l'effet Coriolis.

*« Nous étions assez occupés les trois premiers jours de la mission. Nous avons fait quelques tentatives pour observer des tourbillons près de l'équateur mais sans succès. L'angle des rayons solaires ne nous donnait pas de réverbération suffisante. Nous devions atterrir le quatrième jour — bien sûr, vous êtes au courant — mais de toute façon, nous avons utilisé toutes nos pellicules. Lorsque la mission a été étendue d'une journée et demie, il ne restait plus grand chose à faire. Alors tout le monde s'est mis à l'observation. Nous les avons tous vus mais nous n'avions plus de pellicule. Même pas du 35 mm. J'ai marqué la position grâce à l'ordinateur de bord. Tout un champ de spirales entre 5 et 6° sud. »*

Ces commentaires sont du commandant de la navette (le capitaine Robert « Hoot » Gibson) pendant la session de photographies qui a suivi le retour de la mission 61-C, en janvier 1986. Quatre des cinq astronautes composant l'équipage (Hoot, Charlie Bolden, Steve Hawley et Pinky Nelson) avaient vu les tourbillons en spirale mais il n'y a pas eu de photos.

Le programme d'activité dense et la courte durée de la mission 61-C ont empêché toute photographie de l'océan tropical. Suivant parfaitement le conseil de routine — « ne revenez pas avec des pellicules vierges » — tous les films de 70 et 35 mm avaient



**Le colonel Brewster Shaw, pilote de STS-9, en novembre-décembre 1983. Il utilise un Hasselblad 70 mm modifié pour l'espace.**

été utilisés comme prévu. Mais l'inattendu est arrivé. Le mauvais temps qui régnait à la base aérienne d'Edwards a repoussé l'atterrissage. Tout l'équipage, disposant du temps nécessaire et d'un bon éclairage de l'équateur, particulièrement dans l'océan Indien, pouvait alors participer au concours mentionné plus haut.

Tous les membres de l'équipage 61-C ont vu le champ de tourbillons. Tous leurs doigts se sont jetés sur les claviers d'ordinateur pour avoir une position précise. On n'a jamais vraiment su quel doigt est arrivé en premier. Sans pellicule vierge, l'équipage était réduit à la tâche séculaire d'observation : décrire la scène par écrit. Il est intéressant de noter que les trois dessins disponibles (les « artistes » ont requis l'anonymat) sont presque identiques ; ils décrivent une série de trois (ou quatre ?) tourbillons en spirale interconnectés, en rotation cyclonique — dans le sens des aiguilles d'une montre —, centrés sur la latitude 6°S dans l'océan Indien.

(Tout le monde s'est partagé la caisse de bière Coors, y compris le directeur des opérations de vol.)

## Postdécouverte

La saga de la découverte des tourbillons en spirale en haute mer est un exemple parfait de l'information océanographique qui résulte d'une bonne collaboration entre astronautes et océanographes spatiaux, de la vue perçante des observateurs en orbite, de l'attention soutenue des équipes de la navette à la scène qui se déroule rapidement sous eux dans le scintillement du Soleil, de leurs capacités photographiques sans cesse en progrès, de l'interprétation et de l'analyse intensives par les océanographes spatiaux, de la transmission rapide de cette information interprétée aux équipages des vols à venir et de l'implication de spécialistes de la mer en provenance de plusieurs disciplines dans les évaluations océanographiques.

On continue à observer et photographier des tourbillons en spirale au cours des missions navettes. Les astronautes américains les ont également photographiés depuis le poste d'observation de la station spatiale russe Mir, en utilisant un appareil

Hasselblad modifié de 70 mm. On ne sait pas si les cosmonautes russes ont observé et/ou photographié ces phénomènes océaniques. Il n'y a pas eu de communication internationale sur ce sujet.

Ces tourbillons ont également été observés dans des régions océaniques où il y a eu des expéditions océanographiques, parfois continues. Il semble maintenant certain qu'en haute mer, loin des frontières des courants, la distribution, l'interconnexion et/ou l'isolement des tourbillons soient liés à la topographie sous-jacente de la thermocline. Ils sont restreints à la partie de l'océan qui est proche de la surface, telle qu'elle fût définie par feu Konstantin Fedorov ; c'est clairement là le domaine de prédilection des tourbillons en spirale.

## LES TOURBILLONS EN SPIRALE AUJOURD'HUI

La plupart de ce que nous savons aujourd'hui sur les tourbillons en spirale vient d'observations et de photographies réalisées par les astronautes de la navette. Il y a aussi quelques images du SAR [radar à ouverture synthétique, *NdT*] de SEASAT et du SIR-A transporté sur STS-2, et les images SEASAT reconnues *a posteriori* (les SAR qui sont actuellement en orbite sur les satellites européen et canadien sont destinés à l'étude des formes de paysage et n'ont donc pas encore produit d'images de tourbillons).

Il existe un petit nombre de photographies d'avant la navette qui ont pu saisir des spirales. Toutefois, ce n'est qu'après que celles-ci sont apparues évidentes, grâce aux observations de la navette, que l'on a pu interpréter leur présence sur ces vieilles photos datant d'Apollo ou de Skylab. A partir d'un ensemble séquentiel d'images infrarouges retravaillées, on a noté des tourbillons inhabituels qui se sont révélés être des spirales. L'algorithme utilisé au centre satellitaire de Scripps étant unique, nous ne connaissons aucune autre image infrarouge montrant des tourbillons en spirale.

Les données océanographiques sur les tourbillons sont rares. Les mesures réalisées par la Royal Navy, croi-

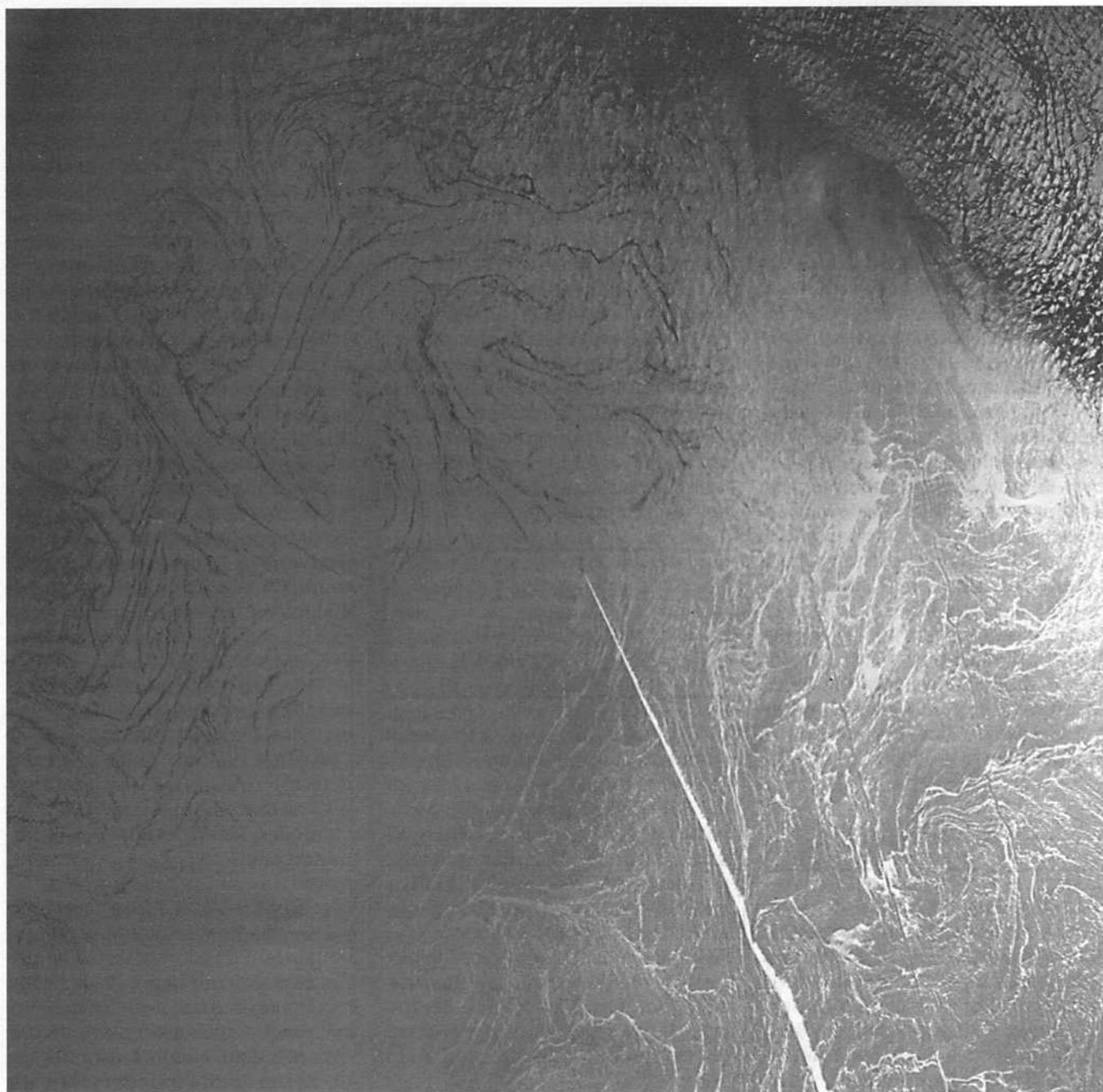
sées avec celles du vol 41-G SIR-B, ont pu établir la présence d'un cisaillement océanique de pleine mer qui a probablement mené à la création d'une spirale. La meilleure information a été donnée par une expédition norvégienne dans la mer du Groenland, lorsqu'un navire et un avion de recherches ont récolté simultanément des données. Pour le reste, c'est-à-dire l'essentiel, les évaluations océanographiques des tourbillons en spirale ont été intuitives et déductives.

En gardant cette restriction à l'esprit, voici donc ce que nous savons de ces tourbillons :

1. Les diamètres sont inférieurs à 30 km, généralement situés entre 5 et 15 km. On a pu mesurer des diamètres inférieurs à 5 km à partir de photographies verticales, encore que la détermination des frontières soit subjective, mais on n'a jamais observé de tourbillons en spirale plus grands que 30 km en plein océan.

2. Le sens de rotation est toujours cyclonique — dans le sens inverse des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord et dans le sens des aiguilles d'une montre au sud de l'équateur. On n'a jamais observé, détecté en images radar ou photographié de tourbillons en spirale anticycloniques. Même lorsque des « tourbillons d'interférence » se forment, lorsqu'un courant rencontre une île, le tourbillon qui se forme derrière la partie gauche de l'île (en regardant dans le sens du courant dans l'hémisphère nord) commence de façon anticyclonique mais devient très vite cyclonique, après avoir parcouru une distance équivalente à un ou deux diamètres tourbillonnaires. On n'a jamais pu observer de vortex apparus de type « von Karman », à l'inverse de ce qui se passe dans l'atmosphère marine, sous le vent des îles océaniques.

3. La caractéristique visuelle dominante des tourbillons tient aux lignes de courant de nappes étroites qui soulignent le mouvement spiral et qui représentent un cisaillement horizontal au cœur du tourbillon. On n'a pas réalisé de mesures *in situ* des vitesses de rotation mais on a fait un certain nombre de calculs, basés sur les déformations subies par les sillages de navires. Ces évaluations nous donnent une vitesse rotationnelle supérieure à 20 cm/s, qui atteint probablement les 100 cm/s dans les lignes de courant proches du cen-



*Une photographie prise à partir du sud en direction des côtes lybiennes, par le capitaine David Leestma le 9 octobre 1984, à bord de Challenger. Dans cette partie de la mer Méditerranée, un supertanker prenait la direction est, laissant un sillage réfléchi par le Soleil. La brillance de ce sillage donne à penser que le navire opérait un dégazage. On peut noter le fléchissement du sillage du bateau autour d'un tourbillon en spirale.*

tre de la spirale.

Dans une série de photos de la Méditerranée ouest, où des données obtenues simultanément par le satellite NOAA-7 montraient une frontière thermique de 5°C, le différentiel de vitesse d'un côté à l'autre d'une ligne de courant a été estimé à 200 cm/s, là encore grâce au déplacement du sillage d'un navire. Par ailleurs, on a pu observer dans le Golfe persique la destruction d'un champ entier de tourbillons en spirale, rattrapé par un

courant côtier dont la vitesse dépassait les 800 cm/s ; cette vitesse avait été déterminée par un océanographe se trouvant à bord du porte-avions Enterprise.

4. Si les tourbillons sont en rotation, ils ont forcément une profondeur minimum. Les données sont sommaires mais celles qui existent indiquent que les tourbillons en spirale ne sont pas des phénomènes de surface superficielle. Les mesures réalisées par la Royal Navy dans la baie

de Biscay, en octobre 1984, ont montré que le cisaillement de courant continuait au-delà de 50 m de profondeur. Même si elles ne vont pas plus profond, les spirales ont donc une importance significative dans le bilan d'énergie cinétique de la partie proche de la surface de l'océan.

Mais revenons aux données extraordinaires acquises par les Norvégiens en avril 1985, lorsqu'ils ont examiné une spirale dans la zone glaciaire bordière au large du Groenland. Un

tourbillon d'un diamètre d'environ 50 km fut photographié et observé en ondes radars par un SLAR (radar actif à vision latérale) aéroporté. De très nombreux fragments de glace permettaient de reconnaître très facilement les lignes spiralées. Grâce aux profils en température établis par le navire de recherche accompagnateur, on a pu mettre en évidence la présence d'un noyau central tourbillonnant allant jusqu'à 300 m de profondeur ; en fait, aussi loin qu'allaient les mesures. Les isothermes du cône d'eau froide sont devenues horizontales à des profondeurs situées entre 75 et 100 m, se courbant vers le haut à la surface en formant une « baignoire » d'eau chaude à 4,5°C ! Il n'y avait pas d'eau à cette température à 200 km à la ronde ! En dépit de la chaleur du noyau, le sens de rotation restait cyclonique.

5. Grâce aux vols spatiaux habités, les tourbillons en spirale ont été observés dans tous les océans ainsi que dans des mers intérieures, de 45°S à 55°N. Rien de magique dans ces limites en latitude. C'est simplement que l'élévation du Soleil et les paramètres orbitaux de la navette ont empêché une vision convenable sur les sites situés plus près des pôles. On les a observés aussi jusqu'à 6° de l'équateur mais jamais au-delà, en dépit de bonnes conditions de vision et de photographie.

Les tourbillons en spirale pourraient bien dominer l'océan supérieur. Ils apparaissent comme de vastes champs de tourbillons interconnectés, couvrant parfois toute la surface d'une mer bordière — la Méditerranée, le golfe du Mexique, le golfe d'Oman, la mer Noire, la mer du Japon ou même la mer Caspienne intérieure. Dans l'océan, on a fréquemment observé des champs similaires ainsi que dans des eaux confinées comme le canal du Mozambique ou la mer de Tasmanie.

En plein océan, loin de toute configuration terrestre et dans des eaux trop profondes pour être influencées par la topographie du fond de la mer, on trouve de grands tourbillons en spirale. Dans les parties de l'océan où l'action cisaillante des courants est improbable, par exemple dans zones centrales océaniques, les tourbillons en spirale sont là. Une fois que les astronautes se sont familiarisés avec les caractéristiques visuelles typiques des tourbillons, chaque mission a

ramené de nombreuses photographies et observations.

On ne peut plus douter de l'omniprésence des tourbillons en spirale. A chaque fois que les caractéristiques de la surface de la mer le permettent — vitesses de vent inférieures à 4 m/s, scintillement du Soleil et présence, même minimale, de surfactants — on peut observer et photographier les tourbillons en spirale.

6. Les conditions océanographiques dans lesquelles ces tourbillons en spirale sont engendrés ne sont pas connues, mais il semble certain qu'ils doivent être entraînés par une forme ou une autre d'action cisaillante horizontale. Du fait de leur taille, inférieure à 30 km, les spirales ne répondraient pas aux forces de Coriolis si elles suivaient la théorie des ondes linéaires. Et pourtant elles le font. Les tentatives visant à les modéliser en utilisant des équations non linéaires n'ont pas encore abouti.

Nous ne savons pratiquement rien de la vie des spirales. Bien que l'on ait souvent pu les observer à plusieurs reprises dans les mêmes régions, avec des intervalles de un à trois jours, on pouvait reconnaître le champ tourbillonnaire mais jamais un tourbillon individuel. On peut raisonnablement estimer que les spirales, une fois formées, ont des durées de vie de quelques jours, comme dans le cas du tourbillon du Groenland. Au minimum, ils restent dans une forme relativement fixe pendant les 10 à 15 h quand ils sont traversés par un bateau, comme en témoignent les innombrables photographies de sillages traversant un champ tourbillonnaire.

## L'OCÉAN, COMPLEXE ET DYNAMIQUE

En 1984, il était clair (grâce aux observations spatiales de Scully-Power) que l'océan est beaucoup plus complexe que ce que l'on imaginait auparavant. Comme il l'écrivait avec moi en 1987 :

*« On ne peut plus considérer l'océan comme homogène ou uniformément stratifié ; il est dynamique à toutes les échelles. Cependant, quoiqu'il ne soit pas homogène, il n'est pas uniformément complexe. De plus, ces complexités ne sont pas statiques puisqu'elles parcou-*

*rent l'océan. Donc, sur une base quotidienne, des régions particulières de l'océan se révèlent plus complexes que les zones environnantes [...]. »*

La plupart des « complexités » que Scully-Power et moi avons discuté étaient les tourbillons en spirale. Maintenant que nous savons que ces phénomènes sont répandus à travers les océans aussi bien que dans les mers bordières ou intérieures, qu'allons-nous faire de leur existence ? Allons-nous considérer l'énergie cinétique enfermée dans les eaux qui spiralent ? Nous pourrions alors en ajouter la quantité à celle proposée par le Dr Munk en 1976. Il est possible de calculer l'énergie cinétique d'un tourbillon en spirale en faisant une série d'hypothèses reposant sur nos connaissances. On peut en déterminer le diamètre à partir d'une photographie spatiale ou d'une image radar. Il y a généralement assez d'informations pertinentes pour déterminer une profondeur minimale. Le tourbillon ne sera de toute façon pas plus profond que la thermocline. Il est aussi possible de calculer la quantité d'énergie cinétique d'un champ donné de tourbillons en spirale à un moment donné. Le « champ donné » est celui qui a été observé ou photographié à un moment particulier de l'orbite ou bien sur plusieurs minutes le long de la trajectoire orbitale de la navette spatiale.

Ces deux types de calculs ont été effectués par Scully-Power et moi-même ; d'abord, en vitesse, sur une nappe en papier, dans un bar proche du centre spatial Johnson ; ensuite, à partir d'une simulation informatique étonnamment bonne. Les nombres d'ergs obtenus dans chacune des deux méthodes visant à évaluer l'énergie cinétique étaient assez proches — intéressant morceau d'ésotérisme... L'énergie cinétique totale contenue dans ces tourbillons représente environ la moitié de l'important pourcentage mentionné par Munk à Edimbourg en 1976, même s'il a peut-être un peu exagéré. Peut-être. Dans tous les océans, il existe sans doute 5 millions de tourbillons en spirale qui tournent en un instant donné. Le problème tient à ce que l'on calcule l'énergie à partir de spirales individuelles dont les caractéristiques sont éphémères, alors que le champ de spirales peut persister pendant des jours, des semaines ou plus longtemps encore.

Par conséquent, essayer de séparer dans les modèles de circulation générale la contribution des tourbillons en spirale de celle des spirales à méso-échelle serait non seulement infructueux mais n'aurait pas de sens. La question de l'impact des tourbillons en spirale sur les interactions entre les océans et l'atmosphère tient à autre chose. Les tourbillons en spirale tournent dans le sens cyclonique, dans les deux hémisphères. Ils possèdent donc des noyaux d'eaux froides qui montent des profondeurs. Ces eaux sont plus riches en nutriments que l'océan environnant, ce qui entraîne donc la croissance fulgurante de plancton. La proportion en oxygène et en gaz carbonique diminue donc dans les eaux de surface, pour des raisons physiques et biologiques. Pour un seul tourbillon, l'effet sur un modèle informatique prédictif correspond à une puce qui se pose sur un éléphant ; même pas celui d'un « papillon dans la mer de Chine ». Pour un champ de tourbillons en spirale, tel que celui observé par le capitaine Richard Truly sur STS-8, de 2 000 km de large, allant de l'océan Indien jusqu'au sud-ouest de l'océan Pacifique, les flux de chaleur et de gaz sont énormes.

Au point où nous sommes arrivés de l'histoire de cette découverte scientifique, personne n'a une idée de la façon de faire des calculs sur le rôle des tourbillons en spirale dans un modèle prédictif de climat ou de météorologie, même si cette influence est certainement majeure. Les modèles informatiques, qu'ils s'occupent du temps quotidien, du changement climatique ou de l'influence de l'homme sur l'effet de serre, doivent connaître : 1) les conditions initiales dans l'océan et l'atmosphère, avec précision ; 2) la capacité de régulation en température de l'océan ; 3) la quantité et la directionnalité des flux de gaz et de particules, pour ce qui concerne l'océan ; 4) l'échelle et la variabilité de ces flux dans le temps ; ainsi que 5) l'effet de l'activité solaire et des changements dans l'orbite terrestre.

(Vous noterez peut-être que je n'ai pas mentionné la composante de l'équation avec laquelle nous sommes bombardés jour après jour dans les médias : les gaz à effet de serre d'origine humaine. Pourquoi ? Parce que c'est la partie la plus petite de l'équation. La vapeur d'eau, que nous

ne pouvons pas contrôler, représente 96% des gaz à effet de serre. Les apports de l'homme, en gaz carbonique, en méthane et/ou en CFC, sont tellement mineurs que personne ne peut s'assurer avec certitude de leur fonction dans la régulation en température de notre planète.)

Dans l'avenir, la méthode scientifique pourrait bien nous amener à connaître suffisamment la dynamique de la surface de la Terre et de l'atmosphère pour nous permettre

de construire des modèles prédictifs sur le climat et l'océan. Nous n'y sommes pas encore ! Mon ami le professeur Ben J. Cagle aime à répéter, lorsque nous examinons ensemble les progrès des modèles informatiques : « Dès qu'un scientifique est en possession des faits physiques, ses connaissances générales lui suffisent pour aboutir à une conclusion intuitive qui est meilleure que n'importe quel modèle informatique. » Et il insiste sur le terme « scientifique ».

### Références et lectures suggérées

- W. Alpers et E. Salusti, 1983, « Scylla and Charybdis Observed from Space », SEASAT Special issue II., *J. Geophys. Res.*, Vol. 88, pp. 1800-1808.
- J.R. Apel, H.M. Byrn, J.R. Proni et R.L. Chamell, 1975, « Observations of oceanic internal and surface waves from the Earth Resources Technology Satellite », *J. Geophys. Res.*, Vol. 80, pp. 865-881.
- R.L. Bernstein et W.B. White, 1974, « Time and length scales of baroclinic eddies in the Central North Pacific Ocean », *J. Geophys. Oceanogr.* Vol. 4
- C. Burgess, 1995, *Oceans to Orbit : The Story of Paul Scully-Power, Australia's First Astronaut*, Sydney, Australie, Playright Pub. Pty. Ltd.
- K.O. Emery et R.E. Stevenson, 1972, « Taiwan - A Ship at Sea », *Acta Oceanographica Taiwanica*, N°2, pp. 1-10.
- K.N. Fedorov et A.I. Ginzburg, 1986, « Vortex Dipoles in the Ocean and in Laboratory Task », *Am. Geophys.*, Vol. 4, N° 5.
- Anna I. Ginzburg, 1992, « Non-Stationary Vortical Motions in the Ocean », *Oceanology*, USSR Acad. Sci., Vol. 32, pp. 997-1004.
- A.I. Ginzburg, et al., 1987, « Mushroom-Shaped Currents in the Presence of Rotation and Stratification », *Doki. Akad. Nauk. (URSS)*, Vol. 292, N°2.
- A.S. Monin et V.P. Krasitskiy, « Ocean Surface Phenomena », *Gidrometeoizdat* (Leningrad, URSS).
- W.H. Munk, P. Scully-Power et F. Zachariasen, 1987, « Ships from Space », *Proc. R. Soc. (Londres)* A 412, pp. 231-254.
- A.R. Osborne et T.L. Burch, 1980, « Internal Solitons in the Andaman Sea », *Science*, Vol. 208, pp. 451-460.
- C.S. Nilsson, J.C. Andrews et P. Scully-Power, 1977, « Observations of Eddy Formation in Eastern Australia », *J. Phys. Oceanog.*, Vol. 7, N° 5, pp. 659-699.
- P. Scully-Power et R.E. Stevenson, 1985, « New Advances towards Ocean Acoustics and Space Integration », in *Adaptive Methods in Underwater Acoustics*, ed. H.G. Urban (Reidel Publishing Co.), pp. 711-729.
- \_\_\_\_\_, 1987, « Swallowing the Transparency Pill ? », *Proc. U.S. Navy. Inst.* (Dec.), pp. 150-152.
- R.E. Stevenson, 1968, « The Synoptic View of the Ocean from Space, UMSCHAU, » *Wissenschaft u. Technik*, Heft 21, pp. 643-649.
- \_\_\_\_\_, 1974, « Observations from Skylab of Mesoscale Turbulence in Ocean Currents », *Nature*, Vol. 250, N° 5468, pp. 638-640.
- \_\_\_\_\_, 1977, « Huelva front and Malaga, Spain, Eddy Chain as Defined by Satellite and Oceanographic Data », *Sond. DHZ*, Band 30, Heft 2, pp. 51-53.
- \_\_\_\_\_, 1979, « Antipodal Seas, in Apollo-Soyuz test Project », *Summary Science Report*, Vol. 11, Washington, D.C., NASA SP-412, pp. 409-429.
- \_\_\_\_\_, 1985, « Oceanography from Orbit », *Encyclopedia Britannica*, 1985 Annual Pub., pp. 188-205.
- \_\_\_\_\_, 1989, *Oceanography from the Space Shuttle*, Boulder, Colo. : University Center for Atmospheric Research and Office of Naval Research.
- R.E. Stevenson et P. Scully-Power, 1974, « Oceanic Turbulence Observed from Skylab », *Bull. Am. Inst. Aero & Astro*, Vol. 344, N° 11.
- R.E. Stevenson, L.D. Carter, S.P. Vonder Haar et R.O. Stone, 1977, « Visual Observations of the Ocean » in *NASA Report SP-380* (Washington, D.C., NASA, Sci. and Tech Office), pp. 287-290.
- J.F. Vesecky et R.H. Stewart, 1982, « The observation of ocean surface phenomena using imagery from the SEASAT synthetic aperture radar. An assessment », *J. Geophys. Res.*, C 87, pp. 3387-3430.