

An aerial photograph of the ocean showing several large, swirling eddies. The water is dark, and the eddies are lighter, creating a complex, swirling pattern across the entire page.

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 Kouro-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.

