

ART & SCIENCE

Des fleurs incandescentes dans le ciel

Les feux d'artifice sont indissociables de maintes festivités. Cette tradition millénaire associe l'art des artificiers à la science des chimistes... pour le plus grand bonheur de nos yeux.

Loïc MANGIN

Du 14 juillet 2016, on préférera ne retenir que les éblouissantes fleurs colorées qui illuminèrent le ciel une fois la nuit tombée : les feux d'artifice. Ils nous ont fait redresser la tête et écarquiller les yeux devant l'art des artificiers, un art millénaire auquel la science a prêté main-forte pour le rendre encore plus spectaculaire.

Tout commence en Chine, sous la dynastie des Tang, qui a régné du VII^e au début du X^e siècle. C'est là que sont nées les quatre grandes inventions qui allaient révolutionner le monde : la boussole, le papier, l'imprimerie et, celle qui nous intéresse ici, la poudre à canon. Ce mélange de salpêtre, de soufre et de charbon de bois est détonnant ! La moindre étincelle conduit à sa combustion rapide, qui se traduit par une déflagration. Outre son usage militaire, cette mixture a aussi été très tôt utilisée lors de festivités sous la forme de feux d'artifice. Ce sont les débuts de la pyrotechnie, dont les spécialistes, en Chine ancienne, étaient très respectés.

Cette technique et ce savoir-faire seront ensuite transmis aux Arabes, qui parlaient de « fleurs chinoises », dès le XIII^e siècle, puis aux Européens au XVII^e siècle. En 1747, la nouvelle édition du *Traité des feux d'artifice pour le spectacle*, d'Amédée François Frézier (la version originale datant de 1706), contribua au lancement de la mode des feux d'artifice en Occident, portée par l'engouement de l'époque pour l'Extrême-Orient.

Les feux d'artifice sont vite devenus indispensables aux grandes fêtes. Ainsi, le 15 mai 1749, un spectacle pyrotechnique impressionnant est donné à Londres (*cartouche page ci-contre*). Il s'agit de célébrer le roi George II de Grande-Bretagne et la signature un an plus tôt du traité d'Aix-la-Chapelle, qui marquait la fin de la guerre de la Succession en Autriche, au cours de laquelle la poudre à canon a beaucoup parlé.

Pour l'occasion, Georg Friedrich Haendel compose sa *Music for the Royal Fireworks* (« Musique pour les feux d'artifice royaux »). Hélas, pendant la représentation, une étincelle

Le Traité des feux d'artifice pour le spectacle, d'Amédée François Frézier, contribua à la mode des feux d'artifice en Occident

met le feu au *Temple de la Paix*, un pavillon qui abrite plusieurs milliers de fusées d'artifice, et fait trois victimes parmi les spectateurs...

Aujourd'hui, la sécurité s'est beaucoup améliorée, notamment grâce à une meilleure maîtrise des mécanismes en jeu. Quel que soit le résultat dans le ciel, ils sont similaires. Une fusée, le plus souvent une sphère en papier, est placée dans un canon en acier ou en carton, d'où elle s'élance sous l'impulsion de la déflagration d'une première charge de poudre (la chasse) allumée par une mèche. Une autre, nommée espolette, prend le relais et transmet la flamme à la charge centrale,

dite d'éclatement, au cœur de la boule dont la périphérie est tapissée d'« étoiles ». Ces dernières sont de petits agrégats de substances pyrotechniques que l'explosion portera à très haute température et projettera vers l'extérieur : c'est le feu d'artifice, dont la forme (en fleur, en anneau...) dépend de l'agencement des « étoiles » dans la fusée.

Le salpêtre de la poudre originelle a été remplacé par un composé oxydant, du nitrate ou du perchlorate, qui libère de l'oxygène. Le soufre et le carbone (substances réductrices qui servent de combustible) sont mélangés à des composés qui deviennent incandescentes au moment de l'explosion.

Les couleurs sont une question de chimie. Dans les étoiles ou dans la charge d'éclatement, des dérivés du strontium, du calcium, du cuivre, du bore et du sodium se traduisent par une lumière respectivement rouge, orange, bleue, verte et jaune. La température est aussi essentielle : selon qu'elle est très élevée ou non, les composés à base d'aluminium ou de magnésium donneront une lumière argentée ou blanche.

Si vous avez raté les feux d'artifice de juillet, deux rendez-vous d'envergure sont prévus en septembre pour vous rattraper. Sinon, sachez que l'*airbag* de votre voiture se déclenche aussi par un mécanisme pyrotechnique... ■

Le spectacle du Groupe F, dans le cadre des Grandes Eaux nocturnes du Château de Versailles, jusqu'au 17 septembre ; « le plus grand feu d'artifice d'Europe » au Domaine national de Saint-Cloud (92), le 10 septembre.



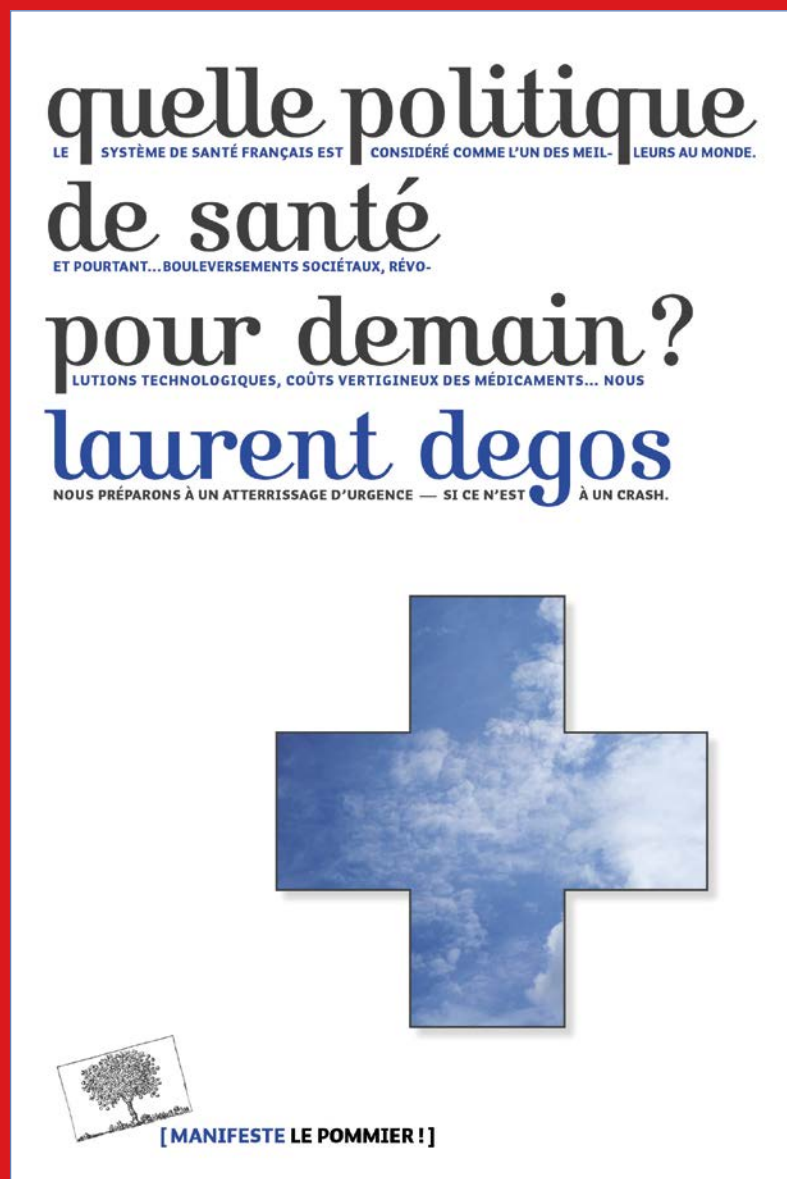
Le monde change, la santé aussi.



Un des principaux acteurs de la médecine d'aujourd'hui prend la plume pour donner le cap d'une politique de santé adaptée au monde - et au patient - de demain.



Laurent Degos - 160 p. - 13 €



Retrouvez toutes nos nouveautés sur notre site
www.editions-lepommier.fr



IDÉES DE PHYSIQUE

Des fluides sens dessus dessous

Pourquoi un verre d'eau tenu à l'envers se vide-t-il, en dépit de l'opposition de la pression atmosphérique ? Parce qu'un liquide dense reposant sur un fluide plus léger constitue un système en équilibre instable.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Une boisson contenue dans une paille verticale dont l'extrémité supérieure est bouchée ne s'écoule pas. Il est en revanche impossible de conserver cette même boisson dans un verre renversé et vertical. Pourquoi ? La réponse réside dans l'« instabilité de Rayleigh-Taylor », qui perturbe l'interface de deux fluides lorsque le fluide du dessus est plus dense que le fluide du dessous. Cette instabilité est visible autour de nous dans les bouteilles percées, les verres retournés, les « lampes à lave » ou les magnifiques marbrures des « peintures accidentelles » de l'artiste mexicain (et politiquement très engagé) David Alfaro Siqueiros (1896-1974).

Verre retourné, chute d'eau assurée

Commençons par une expérience. Versons de l'eau dans un verre sans le remplir entièrement, recouvrons l'ouverture d'une feuille de papier cartonné et retournons l'ensemble, tête en bas, en maintenant le papier cartonné pour que l'eau ne s'écoule pas. Lorsque la feuille de carton est à nouveau à l'horizontale, lâchons-la. Au lieu de tomber, celle-ci reste comme collée au verre et le contenu liquide ne s'écoule pas (voir la figure ci-contre). Comment l'expliquer ?

Tout est affaire de pression. Initialement, l'air qui surmonte l'eau dans le verre est à la pression atmosphérique. La pression au fond du verre est donc égale à cette pression

additionnée de la pression hydrostatique correspondant à la hauteur de la colonne d'eau. Supposons que celle-ci soit d'environ 5 centimètres. La pression hydrostatique vaut alors 0,5 % de la pression atmosphérique (dans l'eau, la pression augmente de 1 atmosphère quand on s'enfonce de 10 mètres).

Lorsque le verre est renversé et qu'on lâche la feuille, la pression s'exerçant sur cette dernière dépasse donc légèrement la pression atmosphérique. L'ensemble eau-feuille se met alors à chuter en bloc. Ce faisant, le volume d'air dans le verre augmente, sa pression diminue et lorsque celle-ci

a diminué de 0,5 %, la pression au niveau de la feuille devient égale à la pression atmosphérique : la chute cesse. Si la hauteur d'air au-dessus de l'eau est de 1 centimètre, on calcule facilement que l'ensemble eau-feuille descend de un vingtième de millimètre : une chute imperceptible.

Que se passe-t-il maintenant si nous enlevons rapidement le papier cartonné en le tirant horizontalement ? Tout ce que nous avons dit précédemment laisserait penser que l'eau peut rester dans le verre : comme, à la suite de la minichute, la pression à l'interface air-eau est la même dans l'air et dans

Pression de l'air enfermé : $P_0 - P_H$

Pression au bas de la colonne : $(P_0 - P_H) + P_H = P_0$

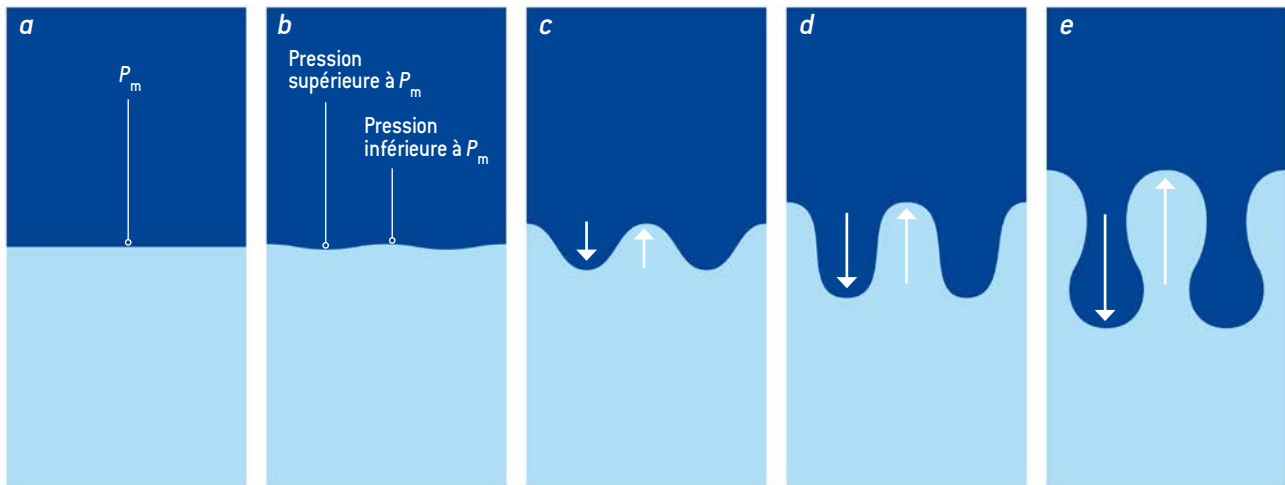
Pression atmosphérique (P_0)

Pression hydrostatique due à la hauteur d'eau (P_H)



LE CONTENU LIQUIDE D'UN VERRE RENVERSÉ et dont l'ouverture est recouverte par une feuille cartonnée (à gauche) ou par de la gaze ou un grillage fin (à droite) ne se déverse pas. En revanche, si l'on retire la feuille cartonnée ou la gaze, malgré l'équilibre initial des pressions, l'interface liquide-air se déstabilise très rapidement et le liquide tombe.

Dessins de Bruno Vacaro



L'INSTABILITÉ DE RAYLEIGH-TAYLOR

porte sur l'interface de deux fluides de densités différentes, le fluide le plus dense (*en bleu foncé*) étant posé au-dessus de l'autre (*en bleu clair*). Même si, initialement, l'interface est parfaitement plane et horizontale (a), de minuscules fluctuations sont inévitables (b). Là où il y a un creux, la pression du fluide du dessus est supérieure à la pression médiane P_m , de sorte que le creux s'amplifie ; de la même façon, la pression dans les bosses étant inférieure à la pression médiane, les bosses grossissent (c). L'interface se déstabilise et les deux fluides s'interpénètrent (d, e).

l'eau en tout point de la surface, l'équilibre mécanique semble en effet assuré. Pourtant, l'expérience nous montre que cet équilibre est instable : l'eau se déverse ! En revanche, si l'on effectue l'expérience en remplaçant la feuille cartonnée par un grillage fin, un tissu ou une gaze tendue, l'équilibre persiste.

Pour le comprendre, imaginons que l'interface horizontale entre deux fluides soit déformée par de très légères ondulations, d'amplitude $+A$ ou $-A$ par rapport à un niveau médian. Le fluide le plus dense (l'eau par exemple), de densité ρ_1 , surmonte le second fluide (l'air par exemple) de densité ρ_2 (avec $\rho_1 > \rho_2$).

Dans les creux par rapport à la médiane horizontale, la hauteur de la colonne de fluide dense est augmentée de A : la pression hydrostatique y augmente de la quantité $(\rho_1 - \rho_2)gA$ par rapport à la pression médiane, g étant l'accélération de la pesanteur. Dans les bosses, c'est le contraire : la pression diminue de la même quantité. Il s'ensuit que dans les creux, l'interface est repoussée vers le bas, tandis que dans les bosses elle est aspirée vers le haut. Autrement dit, les ondulations s'amplifient, ce qui déstabilise l'interface (voir la figure ci-dessus) : c'est l'instabilité de Rayleigh-Taylor, nommée ainsi d'après les physiciens anglais John Rayleigh (1842-1919) et Geoffrey Taylor (1886-1975) qui en ont déterminé les caractéristiques.

Comment se fait-il que, dans l'expérience utilisant un grillage fin pour contenir l'eau du verre, l'interface air-eau reste stable ?

On a ici un mécanisme stabilisateur : la tension de surface, qui s'oppose à toute augmentation de l'aire d'une interface. Lorsque la surface n'est pas plane, cette tension superficielle engendre des surpressions dans les parties concaves par rapport aux parties convexes, ce qui favorise les déplacements de fluide susceptibles d'aplanir l'interface (c'est comme si l'interface était une surface élastique).

La tension de surface, un facteur stabilisant

Ces surpressions ne contrebalancent les effets de pression hydrostatique que si la taille caractéristique de l'ondulation ou de la perturbation de l'interface est inférieure à la longueur dite capillaire. Dans le cas de l'interface air-eau, cette dernière vaut de l'ordre de 3 millimètres. En pratique, cela signifie que si un orifice a un diamètre inférieur à cette longueur, la tension de surface domine et l'interface est stable, tandis que si l'orifice a un diamètre supérieur, la gravité l'emporte, l'instabilité de Rayleigh-Taylor se développe et l'interface est instable.

Accessoirement, c'est aussi la tension de surface qui évite que l'eau ne s'écoule à travers le petit interstice formé entre la feuille cartonnée et le rebord du verre lors de notre première expérience.

Une fois l'instabilité déclenchée, la suite des événements dépend de nombreux paramètres, dont notamment la viscosité



Retrouvez la rubrique
Idées de physique sur
www.pourlascience.fr

des fluides et leur tension interfaciale. La pénétration d'un fluide dans l'autre peut se faire sous la forme de « doigts » qui s'élèvent pour l'un, plongent pour l'autre. Éventuellement, ces doigts se transforment en panaches ressemblant à des champignons, ou se détachent et forment des bulles.

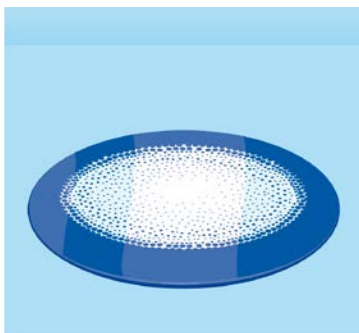
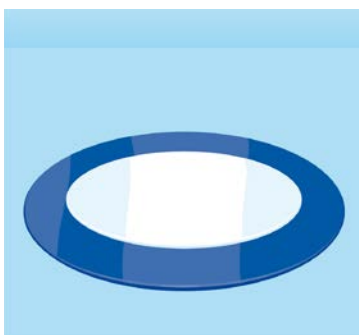
C'est ce que l'on observe dans les lampes à lave, qui étaient à la mode dans les années 1970. Dans un tel objet à température ambiante, un mélange d'huiles minérales, de paraffine et de tétrachlorure de carbone est surmonté d'eau. Le tout se trouve au-dessus d'une lampe. Quand la lampe est éteinte, l'interface des deux fluides est parfaitement horizontale.

Lorsqu'on allume la lampe, l'échauffement dilate plus fortement le fluide du dessous. Il devient alors moins dense, l'instabilité de Rayleigh-Taylor se déclenche et le fluide s'élève lentement, sous la forme de grosses bulles mues par la poussée d'Archimède. Arrivé dans le haut de la lampe, le fluide se refroidit, gagne en densité et retombe jusqu'en bas, puis le cycle recommence.

Les œuvres de David Alfaro Siqueiros offrent un autre exemple où l'instabilité de Rayleigh-Taylor joue un rôle capital. L'artiste mexicain a inventé en 1936 une technique qu'il appela « peinture accidentelle ».

Sur une toile horizontale, on verse une première peinture, qu'on laisse s'étaler progressivement jusqu'à une épaisseur de 1 à 2 millimètres. Puis, sur cette première couche, on en verse une seconde, de teinte différente et, surtout, un peu plus dense. Cette dernière commence par recouvrir la première couche, mais, au bout de quelques dizaines de secondes, sous l'effet de l'instabilité de Rayleigh-Taylor, on voit la première couleur réapparaître en formant des motifs aléatoires qui grossissent puis se figent lorsque la peinture sèche [voir la figure ci-contre].

L'analyse et les mesures des physiciens ont confirmé les tailles caractéristiques de ces motifs, qui dépendent notamment des densités des fluides et de leur tension de surface – mais ces études n'élucident évidemment pas la puissance esthétique des œuvres telles que *Collective suicide* ou *Birth of fascism*. ■



LES « PEINTURES ACCIDENTELLES »

de l'artiste mexicain David Alfaro Siqueiros étaient réalisées en déposant, sur une première couche de peinture, une seconde couche d'une peinture de teinte différente et de densité un peu supérieure.

Au bout de quelques instants, l'instabilité de Rayleigh-Taylor se développe : la peinture de la couche inférieure remonte par endroits en dessinant des taches dans la couche du dessus, et ces motifs se figent à mesure que la peinture sèche.

■ LES AUTEURS



Jean-Michel COURTAY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris. Leur blog : www.scilogs.fr/idees-de-physique

■ BIBLIOGRAPHIE

S. Zetina *et al.*, A hydrodynamic instability is used to create aesthetically appealing patterns in painting, *PLoS One*, vol. 10(5), e0126135, 2015 [<http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0126135>].

D. H. Sharp, An overview of Rayleigh-Taylor instability, *Physica D*, vol. 12, pp.3-18, 1984.

QUESTION AUX EXPERTS

La France détient-elle une partie de l'Antarctique ?

Malgré des revendications, aucun État ne possède de territoire en Antarctique. En fait, l'exploitation économique du continent austral est... gelée jusqu'en 2048 !

Pierre JOUVENTIN

L'Arctique, au nord, est de la banquise flottant sur l'océan. L'Antarctique, au sud, est en revanche un continent plus grand que l'Europe. En hiver, sa superficie double du fait de la glace de mer qui l'entoure. Malgré sa forme circulaire et des revendications territoriales qui lui donnent, dans certains ouvrages, l'aspect d'un gâteau ou d'un camembert découpé en portions, aucun pays n'en possède de part depuis la signature du traité sur l'Antarctique entré en vigueur en 1961. Cependant, les techniques ont fait de tels progrès que cet enfer climatique est devenu en partie exploitable, ce qui tend à faire resurgir les revendications territoriales.

Étant recouverte de glaces sur une épaisseur moyenne de plus de 2 000 mètres, l'Antarctique a longtemps paru sans intérêt. De fait, seulement 2 % de la surface du sol est visible durant l'été austral. Dans la péninsule antarctique, plus proche des terres habitées, le climat est moins extrême qu'au centre (où l'on a frôlé les -90°C). Des indices de pétrole y ont été trouvés et trois pays revendiquent ce territoire. L'Argentine et le Chili y envoient même des couples dont la femme accouchera sur place, ce qui crée des natifs pour étayer les prétentions territoriales... Certaines stations, qui pullulent sur la péninsule Antarctique, ne sont d'ailleurs scientifiques qu'en théorie.

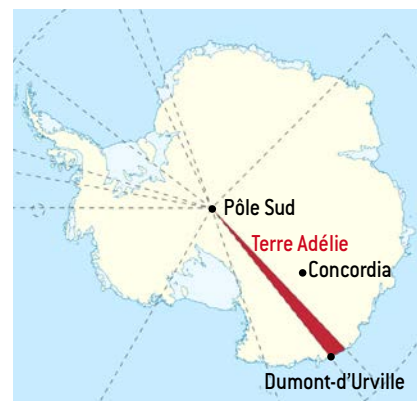
Les revendications territoriales de chaque État sont fondées sur ses voyages d'exploration. C'est la raison pour laquelle la France

pourrait un jour avoir des droits sur la terre Adélie, découverte le 22 janvier 1840 par l'amiral Jules Dumont d'Urville, qui l'a baptisée du prénom de son épouse, Adèle. Il en revint sain et sauf avec son équipage pour décéder deux ans plus tard dans le premier accident ferroviaire français. Le rocher sur lequel les explorateurs débarquèrent se trouve maintenant à quatre kilomètres de la côte, un décalage peut-être dû au réchauffement climatique, dont l'origine humaine a été mise en évidence notamment grâce à l'analyse des gaz emprisonnés dans les glaces antarctiques.

Deux bases permanentes françaises

La terre Adélie, revendiquée par la France, constitue aujourd'hui un secteur délimité par six degrés de longitude. Elle abrite l'une des deux bases permanentes gérées par l'Institut français pour la recherche et la technologie polaire (l'IFRTP, basé à Brest et dépendant du CNRS). Nommée Dumont-d'Urville, cette base est le paradis des sciences de la vie, car elle a été construite sur un archipel où, en été, les animaux polaires se reproduisent (sauf le manchot empereur qui choisit la plus mauvaise saison, mais dont une colonie se trouve à quelques centaines de mètres).

L'autre base, Concordia, est installée à l'intérieur du continent, à un endroit où des forages profonds de glace ancienne sont possibles. Beaucoup plus récente, elle est



© Wikimedia Commons/TUBS

consacrée aux sciences physiques et climatologiques. Cet effort porte ses fruits, puisque, grâce au travail accompli sur le continent blanc, les recherches françaises en glaciologie, en océanographie et en biologie animale sont parmi les plus avancées du monde.

Dans les années 1980, la pression des industriels américains se faisant de plus en plus grande, l'exploitation des ressources minérales de ce continent fut sur le point d'être décidée. La France a entraîné les autres pays et a permis d'obtenir, avec l'aide de l'Australie, un moratoire. Signé le 4 octobre 1991, le protocole de Madrid est entré en vigueur le 14 janvier 1998. Il gèle pour cinquante ans les richesses antarctiques, donc jusqu'en 2048. Expert en biologie de la délégation française pendant ces tractations, j'ai pu constater que la passion pour les pôles du Premier ministre de l'époque, Michel Rocard, n'a pas été pour rien dans le succès d'une vaste opération diplomatique faisant de l'Antarctique une « terre de paix et de science ».

Pour l'heure, la principale menace pesant sur le milieu antarctique n'est pas son exploitation industrielle, mais la fréquentation touristique qui augmente chaque année. En vingt-cinq ans, le nombre annuel de visiteurs est passé de moins de 5 000 à plus de 37 000. Une fréquentation multipliée par huit... ■

Pierre JOUVENTIN, éthologue émérite, a dirigé durant près de quinze ans le laboratoire d'écologie du CNRS à Chizé.