

d'Amérique, mais quelques cas amérindiens décrits semblent postérieurs à la découverte du Nouveau Monde et quelques cas supposés de l'Ancien Monde sont plus anciens, soulignant, comme dans le cas de la syphilis, la difficulté de ce type de débats.

Les spondyloarthropathies constituent un groupe de maladies inflammatoires qui touchent le rachis et les articulations périphériques ; ces maladies sont moins destructrices que la polyarthrite rhumatoïde, mais plus invalidantes. La spondylarthrite ankylosante aboutit, dans ses formes évoluées, à la fusion complète de la colonne vertébrale, alors dénommée «colonne bambou», et des côtes (voir la figure 14) ; elle est facile à reconnaître en paléopathologie : les cas décrits sont nombreux, alors que cette maladie est aujourd'hui dix fois moins fréquente que la polyarthrite rhumatoïde. Il s'agirait d'une maladie ancienne dans l'Ancien Monde. Les cas les plus anciens remontent à la période néolithique. On sait que cette pathologie fait partie d'un groupe de maladies inflammatoires qui associent une susceptibilité génétique particulière et une sensibilité à diverses infections qui déclenchent des réactions inflammatoires.

Les lésions des tendons qui entourent l'articulation laissent parfois des traces sur les squelettes anciens. Ainsi les enthésopathies mécaniques sont des lésions micro-traumatiques qui touchent la zone d'insertion d'un tendon ou d'un ligament sur l'os. Ces lésions sont liées à un surmenage de cette zone nommée enthèse, dans le cadre d'activités répétitives. Longtemps négligée en paléopathologie, leur observation sur des squelettes anciens a permis de développer la notion de marqueurs osseux d'activité. Ainsi, nous avons émis l'hypothèse que certains types d'activités physiques répétitives des populations anciennes, telles que les activités de chasse, telles que le lancer de javelot ou le tir à l'arc, étaient peut-être responsables de ce type de lésions.

Au cours de l'hyperostose squelettique diffuse, tous les sites d'insertion des tendons sur les os sont ossifiés. Aujourd'hui, cette maladie qui touche surtout l'homme plutôt âgé, trop gros et ayant parfois un diabète gras (non insulino-dépendant) concerne 6 à 12 pour cent de la population. Elle est également fréquente en paléopathologie. Selon Tony Waldron de l'Université de Londres, la fréquence de cette mala-

die peut varier notablement : il a ainsi retrouvé cette pathologie chez 30 pour cent des moines enterrés dans un cimetière monastique ; il en conclut qu'ils devaient être riches et bien nourris !

Des épidémies du passé à celles d'aujourd'hui

La paléoépidémiologie est une nouvelle approche de la paléopathologie en plein développement. On envisage les maladies à l'échelle des populations anciennes, et non plus à la lumière de l'analyse de cas particuliers. Toutefois, les collections ostéo-archéologiques humaines sont qualifiées à tort de «populations», car il existe de nombreux biais de recrutement et de conservation qui font qu'une «population de cimetière» est très éloignée de la population vivante dont elle est issue. L'histoire des maladies et notamment des infections humaines passe pourtant par cette approche paléoépidémiologique, assistée des méthodes paléomicrobiologiques utilisant la biologie moléculaire. Nous avons eu la chance d'éviter les biais de recrutement lorsque nous avons travaillé sur des charniers de peste des XVI^e et XVIII^e siècles (toutefois, la peste ne laissait pas de traces osseuses et ne peut faire l'objet d'études paléopathologiques directes). Ces séries présentent l'intérêt unique d'avoir été constituées de victimes décédées dans un laps de temps très court, sans sélection, et de constituer une sorte de reflet de la population vivante, condition unique en paléopathologie.

Ceci nous a permis de reconstituer par exemple la prévalence de la tuberculose durant ces périodes : elle est alors particulièrement élevée, proche de 50 pour cent (par comparaison, il y a une quarantaine d'années dans les zones de forte endémicité, en Asie du Sud-Est, la prévalence se situait aux environs de 37 pour cent). La connaissance des modalités évolutives de cer-



G. Pálfi, Université de Szeged, Hongrie

14. «COLONNE DE BAMBOU» : cette portion de la colonne vertébrale d'un homme âgé, issu des fouilles de la nécropole de Pitvaros-Viztároló, en Hongrie, et daté du VIII^e siècle, présente une fusion complète de plusieurs vertèbres. Cet aspect est typique des stades avancés de spondylarthrite ankylosante. Cette maladie est responsable d'une rigidité totale de la colonne vertébrale, entraînant un handicap fonctionnel notable qui peut provoquer des complications respiratoires quand le thorax est aussi atteint par ce mécanisme d'ossification excessive.

taines maladies revêt ainsi un intérêt épidémiologique fondamental pour l'étude et la prévision de l'évolution des maladies actuelles, telle la tuberculose, exemple d'infection qui semblait bien contrôlée et qui, aujourd'hui, acquiert une nouvelle virulence.

Comprendre les situations présentes pour mieux gérer les situations futures, à la lumière de la connaissance du passé, illustre ainsi la devise de l'association internationale de paléopathologie : *Mortui viventes docent*, Les morts servent aux vivants.

Yann ARDAGNA est assistant-ingénieur en anthropologie biologique dans l'Unité d'anthropologie, UMR 6578, CNRS – Université de la Méditerranée – Faculté de médecine de Marseille, où Olivier DUTOIR dirige le Service d'anthropologie biologique.

O. DUTOIR, G. PÁLFI et al., *L'origine de la syphilis en Europe : avant ou après 1493?* Éditions Errance-CAV, Paris-Toulon, 1993.

Pierre THILLAUD, *Paléopathologie humaine*, Kronos, Paris, 1996.

Michel SIGNOLI, *Étude anthropologique de crises démographiques en contexte épidémique. Aspects paléo- et biodémographiques de la Peste en Provence*, Doctorat de L'Université de la Méditerranée, Faculté de Médecine de Marseille, 1998.

G. PÁLFI et al. *Tuberculosis : past and present*, in *Golden Book-Tuberculosis foundation*, Budapest-Szeged, 1999.

Les marées noires naturelles

IAN MACDONALD

Dans le golfe du Mexique, du pétrole s'échappe naturellement des fissures du fond marin et se répand dans l'océan.

Dans le golfe du Mexique, au large du Texas et de la Louisiane, de minuscules bulles de pétrole et de gaz naturel remontent des fonds océaniques, suintant le long des failles qui sillonnent la couche de sédiments, grouillante de vie. Puis, une fois dans l'océan, ces bulles s'élèvent en panaches étroits jusqu'à la surface. Le gaz naturel se répand dans l'atmosphère, tandis que le pétrole dérive à la surface de l'eau ; il s'évapore, se mélange à l'eau et finit par se disperser.

C'est pendant l'été, après plusieurs jours de calme plat, que l'on observe le mieux ces «marées noires» naturelles : de larges rubans de pétrole s'étirent vers l'horizon. Quand on navigue à proximité de ces traînées, on constate que la surface de l'eau est plus lisse et plus brillante qu'à l'accoutumée et que l'eau elle-même semble plus claire. Les poissons volants qui sautent devant le bateau piquent dans l'eau sans éclaboussures. À mesure que l'on avance, l'odeur du pétrole devient plus forte que l'odeur de diesel du moteur. Des nappes visqueuses flottent autour du bateau et se collent parfois à la coque.

Soudain, des gouttelettes de pétrole éclatent à la surface, formant de petits disques irisés qui ont la taille d'une soucoupe, puis d'une assiette, puis d'un plat à tarte. Elles se fondent dans la couche irisée qui dérive à la surface de l'eau. Plus loin, la mer retrouve son apparence habituelle. L'eau s'assombrit, la brise soulève de petites vaguelettes et les poissons volants font jaillir des embruns. Le bateau a dépassé une nappe de pétrole, mais, au loin, d'autres flottent sur la mer.

Autrefois, les garde-côtes les suivaient, pensant qu'elles les mèneraient à un navire qui vidangeait clandestinement ses ballasts. En fait, elles ne sont que des conséquences naturelles de la géologie du golfe du Mexique, une région qui possède les plus grands gisements d'hydrocarbures du monde.

Contre temps et marées

Sous l'action de l'énergie géothermique, les matières organiques enfouies dans les roches sédimentaires de la croûte terrestre se transforment en hydrocarbures. Issus des couches sédimentaires profondes, les hydrocarbures migrent lentement vers la surface, mais sont parfois piégés par des grès poreux, par des schistes fracturés, ou par les restes calcaires d'anciens récifs.

Dans le golfe du Mexique, ces «pièges» géologiques abondent. Au Jurassique, il y a environ 170 millions d'années, une couche de sel s'y est déposée ; aujourd'hui, elle recouvre la plupart des gisements pétrolifères de la région. Elle est déformable, mais quasi incompressible. Au cours des temps géologiques, les sédiments arrachés au continent par l'érosion se sont accumulés sur le plancher océanique. Sous l'action de leur poids inégalement réparti, la couche de sel s'est déformée en s'amincissant ou s'épaississant selon les endroits. Le sel ainsi déplacé a formé des «montées diapiriques» : ces paquets de sel remontent dans les sédiments en adoptant des formes géométriques variées et vont parfois jusqu'à se détacher de la couche de sel sous-jacente.

Ce type de tectonique influe sur la migration des hydrocarbures. Le sel étant imperméable, les hydrocarbures restent

piégés au-dessous. Parfois, la couche de sel se brise sous l'effet des contraintes internes : de grandes failles s'enfoncent jusqu'aux réservoirs d'hydrocarbures profondément enfouis, qui trouvent ainsi un chemin jusqu'à la surface du plancher océanique.

La géologie du golfe du Mexique est unique au monde et la région a joué un rôle de tout premier plan dans l'histoire de l'industrie pétrolière. La première plate-forme pétrolière y fut installée en 1947, et beaucoup d'autres ont été installées depuis. Grâce aux progrès techniques, on a repéré des gisements de plus en plus profonds, dont on réussit à extraire le pétrole. L'exploitation pétrolière a favorisé l'essor économique de la région. Les plates-formes, les navires pétroliers et les raffineries font partie du paysage du golfe du Mexique. Le secteur emploie une main-d'œuvre importante qui travaille souvent en mer pour satisfaire les besoins toujours croissants de notre société. Dans ce contexte, les marées noires naturelles intéressent l'industrie pétrolière.

Les Précolombiens connaissaient déjà leur existence et utilisaient le goudron qu'ils ramassaient sur les plages comme matériau de calfatage. Des récits espagnols du XVI^e siècle mentionnent ces nappes de pétrole flottantes. En 1910, John Soley, lieutenant dans la marine américaine, publie la première étude systématique des nappes de pétrole dans *Scientific American*. Il relève toutes les mentions de nappes de pétrole consignées dans les carnets de bord des navires qui ont sillonné le golfe : le commandant du paquebot *Comedian* raconte qu'il a vu trois jets de pétrole sortir de la mer au même endroit. À l'époque,



J. Blair, Crocodile Photos

1. LORSQU'UNE GOUTTELETTE DE PÉTROLE montant des profondeurs de l'océan arrive à la surface, elle éclate et s'étale en formant une tâche irisée. Sur cette photographie, la tâche a à peu près la taille d'une assiette.

2. SUR CETTE VUE AÉRIENNE, on aperçoit de longues trainées entre les ombres des nuages : ce sont des nappes d'hydrocarbures issues du plancher océanique.

R. Becker

l'origine des marées noires restait une énigme. Soley pensait – naïvement – que le pétrole qui émergeait loin des côtes était d'origine inorganique. Les détails rapportés par les marins dont il étudia les récits (les nappes de pétrole flottantes, les oiseaux mazoutés, les morceaux de goudron, la puanteur âcre...) évoquent les marées noires accidentelles qui surviennent trop souvent aujourd'hui. D'après ces descriptions, qui datent d'une centaine d'années, le pétrole semblait s'échapper du plancher océanique en plus grandes quantités qu'aujourd'hui.

Une carte des marées noires naturelles

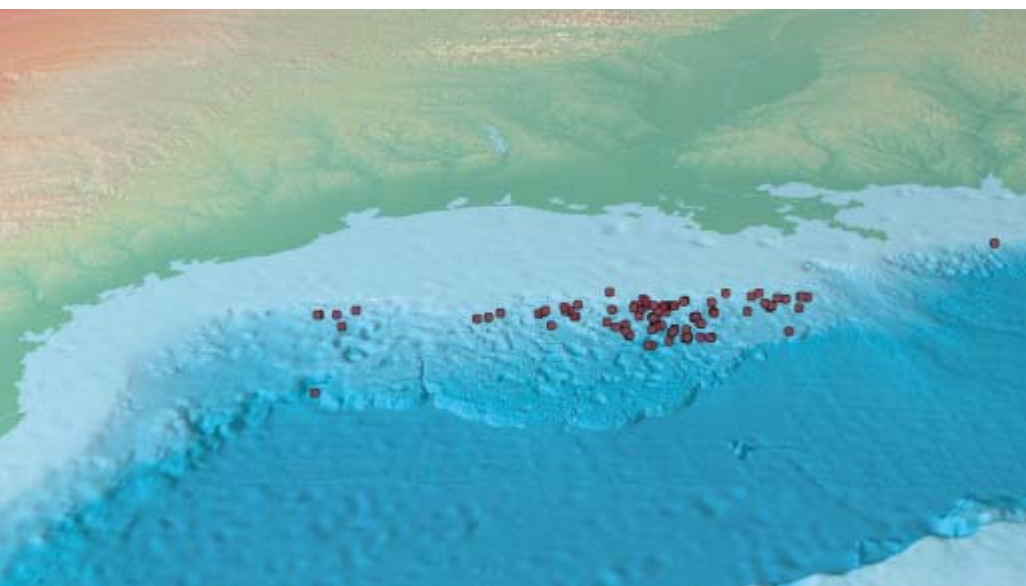
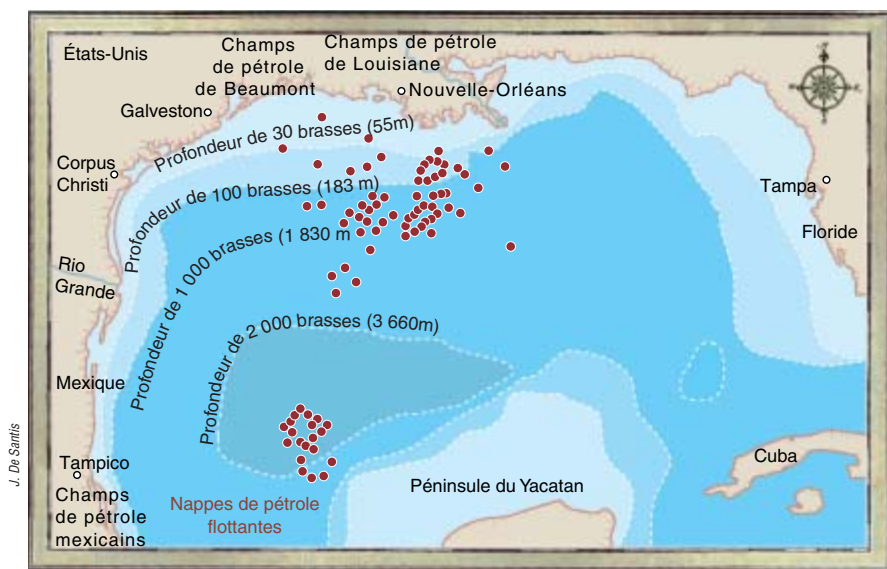
Soley dressa une carte des marées noires naturelles d'après les récits qu'il avait retrouvés, et d'après les positions des navires qui avaient été relevées de façon rudimentaire. Aujourd'hui, les océanographes surveillent les nappes de pétrole par satellite : elles sont visibles de très loin, grâce à leurs propriétés physiques et chimiques. Les couches d'hydrocarbures dont l'épaisseur est supérieure à quatre micromètres (l'épaisseur moyenne des marées noires acci-

dentelles) sont brun-rougeâtre ou ocres. Une fois exposée à l'atmosphère, la fraction volatile du pétrole s'évapore rapidement. Le résidu cireux restant forme une émulsion avec l'eau de mer et finit par coaguler en billes de goudrons et en nappes flottantes. Les couches d'hydrocarbures dont l'épaisseur est comprise entre un et quatre micromètres sont irisées, comme les flaques d'huile sur les routes. Les marées noires naturelles de faible épaisseur (entre 0,01 et 1 micromètre), ne sont constituées que de quelques dizaines de couches moléculaires, mais les liaisons chimiques sont suffisamment fortes pour que le film qu'elles forment soit très résistant. Ces couches tensioactives empêchent le vent de soulever des vagues à la surface de la mer. En l'absence de vaguelette, l'eau réfléchit la lumière presque aussi efficacement qu'un miroir, ce qui lui confère son aspect luisant. La lumière ne se réfléchit pas de la même façon sur l'eau et sur les flaques de pétrole, de sorte que, lorsque le Soleil éclaire la surface de l'océan dans des conditions favorables, ces nappes sont visibles du pont d'un bateau, mais aussi d'un avion ou même d'un satellite : les astronautes les voient lorsqu'ils observent les reflets du Soleil sur la mer.

Au centre d'un reflet, les taches sont beaucoup plus brillantes que l'eau environnante, tandis qu'aux bords du reflet, elles sont plus sombres : la plupart des rayons lumineux qui s'y réfléchissent ne parviennent pas à l'œil de l'observateur (voir la figure 4).

Au radar, les nappes de pétrole apparaissent également sombres, les sources d'ondes radio et les détecteurs sont en incidence rasante. Les radars embarqués sur des satellites, tel le *European Radar Satellite* ou le satellite canadien *RADARSAT*, ont repéré des traces de pétrole et suivi leur évolution dans le temps sur presque toute la surface de l'océan. On utilise parfois ces observations pour étudier les courants océaniques, car elles fournissent des informations plus détaillées que les instruments océanographiques classiques. La surveillance par satellite aide aussi les géologues à localiser les gisements de pétrole sous-marins.

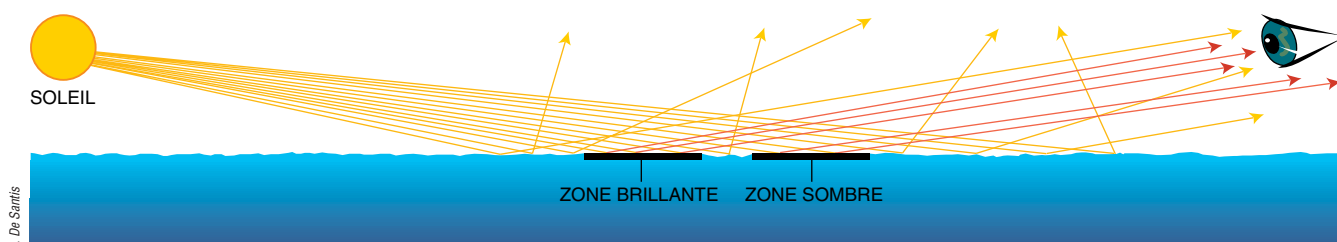
Pour repérer les nappes de pétrole, on doit savoir les distinguer des autres couches tensioactives qui recouvrent l'océan par endroits et qui sont produites par le frai des poissons, par le plancton, par des végétaux... Quand elles sont concentrées par des courants



3. D'APRÈS LA PREMIÈRE ÉTUDE SYSTÉMATIQUE, les marées noires naturelles observées entre 1902 et 1909 (*en haut*) dans le golfe du Mexique étaient surtout localisées au Sud-Ouest du delta du Mississippi. Celles que l'on a découvertes récemment grâce aux techniques modernes d'observation, par satellite notamment, sont à peu près aux mêmes endroits (*en bas*), ce qui laisse supposer que de nombreux sites actifs au début du *xx^e* siècle le sont encore aujourd'hui.

4. LE REFLET DU SOLEIL observé par les astronautes qui passent au-dessus du golfe du Mexique indique plusieurs nappes de pétrole (*photographie ci-contre*). Là où la réflexion du Soleil est la plus intense, ces nappes sont très brillantes. À la périphérie de la nappe, elles sont plus sombres que les eaux environnantes. Dans le premier cas, la surface de la nappe réfléchit les rayons du Soleil, tel un miroir, vers l'observateur, tandis que, dans le second, les rayons sont réfléchis sous un angle tel qu'ils ne l'atteignent pas. La surface de l'eau environnante apparaît plus brillante, car la lumière incidente est diffusée dans plusieurs directions (certains rayons atteignent l'œil de l'observateur).

National Aeronautics and Space Administration



marins convergents, elles peuvent être confondues avec des nappes de pétrole. Toutefois, les instruments embarqués à bord des satellites les distinguent notamment parce que le pétrole et le gaz naturel s'échappent de sources fixes situées au bord des failles sous-marines, sur le plancher océanique. Les modèles mathématiques montrent que les gouttes de pétrole issues d'une même source située à un kilomètre de profondeur atteignent la surface de l'océan dans une même zone de quelque 100 mètres de diamètre, ce que l'on observe dans le golfe du Mexique. De plus, le pétrole atteint la surface à moins de deux kilomètres de sa source. En pratique, des détections répétées de nappes de pétrole dans une zone fixe d'une centaine de mètres de diamètre indiquent la présence d'une source de pétrole sur le fond océanique.

Pour localiser une source, encore faut-il savoir distinguer la tête de la nappe de sa queue. Si l'on observe de la fumée de cigarette, on constate que la partie la plus étroite correspond à l'origine, mais contrairement aux particules de fumée, qui ne s'attirent pas, les gouttelettes de pétrole ont tendance à fusionner, formant les nappes que l'on observe à la surface de l'eau. Dès qu'elles ont fait surface, les gouttes de pétrole s'étalent, en même temps qu'elles dérivent sous l'action du vent et des courants. En théorie, elles devraient s'étaler jusqu'à former une couche monomoléculaire, mais, en réalité, les bords des rubans sont si minces qu'ils se désagrègent. En aval de la

source, le film de pétrole mesure 0,1 micromètre d'épaisseur environ, ce qui correspond à plusieurs couches moléculaires. Les zones plus minces du film se sont effritées : la nappe est plus large à l'aplomb de sa source qu'à son extrémité, quand elle a été charriée à la surface de la mer, par les vents et les courants.

La longueur d'une nappe dépend des conditions météorologiques. Lorsque la mer est agitée, la nappe se désagrège rapidement. Par temps calme, elle atteint parfois 25 kilomètres de longueur. Le vent détermine la forme du ruban : quand sa direction varie progressivement, le ruban décrit de larges courbes, tandis que s'il change brusquement de sens, le ruban décrit des zigzag. La durée de vie de la nappe est l'intervalle de temps entre le moment où le vent change de direction et celui où le ruban change de forme. Avec mes collègues de l'Université du Texas, nous avons estimé, d'après diverses observations par satellite, que, dans la partie la plus éloignée de la source, le pétrole flotte pendant 12 à 24 heures.

Les marées noires naturelles sont une aubaine pour les océanographes qui cartographient les courants marins ou pour les compagnies pétrolières à la recherche de nouveaux gisements, mais quel est leur impact sur les organismes vivants ? Dans les années 1980, Mahlon Kennicut et son équipe, de l'Université du Texas, ont étudié la faune qui vit autour des sources d'hydrocarbures sous-marines. Ils ont recueilli divers spécimens, avec un filet de pêche.

L'un des premiers coups de filet contenait plus de 800 kilogrammes de *Calypptogena ponderosa*, une espèce de palourde géante. Pourtant, à cette profondeur, la vie sous-marine est rare. Le filet contenait aussi plusieurs dizaines de tiges brunes et fibreuses. Pensant qu'il s'agissait d'une sorte de roseau, charrié par le Mississippi, qui s'était déposé au fond du golfe, les océanographes les auraient jetées, si l'un d'eux n'avait eu l'idée de les récupérer pour tresser des paniers. En tirant les tiges, il en cassa plusieurs d'où s'écoula un liquide rouge : du sang !

Vivre du pétrole

Après avoir mené leur enquête, ils découvrirent que ces «roseaux» sont des vers vestimentifères, d'une espèce voisine de celle qui vit près des sources hydrothermales du Pacifique. Dans ces milieux, les vers vestimentifères, les palourdes géantes et une espèce de bivalves des abysses se nourrissent de l'énergie chimique libérée par les sources sous-marines d'hydrocarbures, grâce à leur symbiose avec des bactéries : ces dernières oxydent l'hydrogène sulfuré produit par d'autres bactéries (qui ne sont pas des symbiontes) à partir des hydrocarbures. Elles utilisent l'énergie de la réaction pour synthétiser des substances organiques en l'absence de lumière.

En 1986, nous avons plongé au fond du golfe du Mexique à bord d'un sous-marin de recherche. Alors que nous espérions, au mieux, trouver quelques



R. Becker



C. Fisher et R. Wash

5. CETTE SOURCE DE PÉTROLE SOUS-MARINE est recouverte d'un monticule d'hydrate de méthane et entourée de nombreux organismes vivant à ces grandes profondeurs (*ci-dessus*). L'hydrate de méthane est une solution solide de méthane et d'eau, qui se forme aux fortes pressions et aux basses températures. Il héberge un animal microscopique, le ver de glace (*à gauche*) découvert en 1997.

rares vers vestimentifères, nous avons trouvé une faune luxuriante. D'innombrables moules étaient agglutinées autour des sources de gaz bouillonnantes, ainsi que des bactéries, qui formaient un tapis coloré. Des poissons, des crustacés et autres invertébrés, qui vivent normalement dans des eaux moins profondes, étaient massés autour des sources où ils se nourrissaient de ces espèces exotiques.

Depuis, d'autres communautés de ce type ont été découvertes dans le golfe. Elles sont parfois si florissantes qu'elles bouchent les sources d'hydrocarbures : les sous-produits métaboliques des microbes provoquent la précipitation de carbonate de calcium, qui forme des calottes étanches au-dessus des sources. Ces organismes produiraient aussi du méthane responsable de la formation d'hydrates de méthane, des substances qui ressemblent à de la glace et se forment lorsque des molécules de méthane sont piégées dans un réseau de molécules d'eau, à haute pression et à basse température. Ces solides, qui bouchent les gazoducs, ont obligé les exploitants des plates-formes offshore à chauffer et isoler ces canalisations sous-marines à grands frais. Plus récemment, les chercheurs se sont intéressés aux hydrates de méthane qui cristallisent au fond des mers.

Quelle est la quantité de pétrole qui se déverse naturellement dans le golfe du Mexique chaque année? En supposant qu'une seule nappe mesure

environ 100 mètres de largeur et 10 kilomètres de longueur, pour une épaisseur moyenne de 0,1 micromètre, elle contiendrait à peu près 100 litres de pétrole. La durée de vie maximale d'une telle nappe étant de 24 heures, chaque source libère 100 litres de pétrole par jour.

Une pollution naturelle?

On estime que 100 sources d'hydrocarbures sont simultanément en activité dans le golfe : près de quatre millions de litres s'y déverseraient chaque année. Rappelons que l'*Exxon Valdez* a déversé à peu près la même quantité de pétrole lors de son naufrage dans le détroit du prince William, en Alaska en 1989 (soit 40 000 tonnes environ). Pour mémoire, l'*Amoco Cadiz* et l'*Érika* en ont déversé respectivement 230 000 en 1978 et 10 000 en 1999. Heureusement, l'écosystème du golfe du Mexique, où les sources sont actives depuis plus

d'un million d'années, survit à cette «pollution» pétrolière.

Les marées noires naturelles ont produit autant de pétrole et de gaz que l'industrie pétrolière n'en a extrait des gisements sous-marins. La différence d'échelle de temps explique pourquoi une marée noire naturelle fait beaucoup moins de dégâts qu'un accident pétrolier. L'existence des épanchements naturels n'excuse en aucun cas la pollution accidentelle. Alors que l'océan supporte des centaines de tonnes de pétrole déversées chaque mois, si l'hydrocarbure est répandu sous forme de gouttelettes sur des milliers de kilomètres carrés, la même quantité déversée sur une aire de nidification d'oiseaux de mer détruit inévitablement la population locale. Après certaines marées noires accidentelles, l'écosystème met des années à guérir, et certains dommages sont irréversibles. Les marées noires naturelles ne semblent pas avoir de conséquences délétères sur l'environnement marin.

Ian MACDONALD est océanographe à l'Université du Texas.

K.A. KVENVOLDEN, *Reassessment of the Rates at Which Oil from Natural Sources Enters the Marine Environment*, in *Marine Environmental Research*, vol. 10, pp. 223-243, 1983.

I.R. MACDONALD et al., *Natural Oil Slicks in the Gulf of Mexico Visible from Space*, in *Journal of Geophysical Research*,

vol. 98, n° C9, pp.16351-16364, 15 septembre 1993.

I.R. MACDONALD et al., *Remote Sensing Inventory of Active Oil Seeps and Chemosynthetic Communities in the Northern Gulf of Mexico*, in *Hydrocarbon Migration and Its Near-Surface Expression*, sous la direction de D. Schumacher et M.A. Abrams, American Association of Petroleum Geologists Memoir 66, 1996.

