

L'obélisque noir du palais de Salmanasar III, à Nimrud (voir la figure 3), relate, en 20 bas-reliefs et par des inscriptions à son sommet et à sa base, les nombreuses campagnes militaires du roi et les tributs reçus des différentes régions de son empire pendant son règne (–858 à –824). Sur une des faces, on observe des animaux rapportés au roi de l'Orient : deux «chameaux à deux dos», un éléphant d'Inde et deux singes. Sous le règne de Salmanasar III, le style des sculptures change : les



British Museum

3. L'obélisque noir du palais de Salmanasar III.



British Museum

4. Le zoo conçu par le roi Sennachérib.

détails sont bien plus nombreux que sous le règne d'Assurnazirpal II, où le style est plus figé.

On a retrouvé d'autres vestiges qui témoignent de l'attrait du roi assyrien Sennachérib pour ce qu'il appelait son «Palais sans rival», un zoo construit à Ninive vers –700. Sennachérib aimait créer des habitats naturels pour élever des animaux, tant étrangers qu'indigènes. D'après divers textes contemporains, «les plantations étaient très réussies ; les hérons qui venaient de très loin y nichaient, les cochons et divers animaux avaient de nombreux petits». Sur un des bas-reliefs (voir la figure 4), on observe une truie qui se promène avec ses jeunes. Au-dessus, presque caché par des roseaux entrelacés, un cerf se repose. Le roi surveillait avec la même attention ses jardins d'agrément. D'après une étude récente faite à l'Université d'Oxford, les légendaires jardins suspendus de Babylone ne seraient pas ceux de Nabuchodonosor, qui vécut au VI^e siècle avant notre ère, mais ceux de Sennachérib, situés plusieurs kilomètres au Nord.

Karen Polinger Foster étudie les langues et les civilisations du Moyen-Orient à l'Université Yale.

Julia S. BERRALL, *The Garden : An Illustrated History*, Viking Press, 1966.

Animals in Archaeology, sous la direction de A. Houghton Brodrick, Praeger, 1972.

John BAINES et Jaromir MÁLEK, *Atlas of Ancient Egypt*, Facts on File, 1980.

Michael ROAF, *Cultural Atlas of Mesopotamia and the Ancient Near East*, Facts on File, 1990.

Stephanie DALLEY, *Nineveh, Babylon and the Hanging Gardens : Cuneiform and Classical Sources Reconciled*, in *Journal of the British School of Archaeology in Iraq*, Londres, vol. 56, pp. 45-58, 1994.

Patrick F. HOULIHAN, *The Animal World of the Pharaohs*, Thames and Hudson, 1996.

Vicki CROKE, *The Modern Ark : The Story of Zoos, Past, Present and Future*, Charles Scribner's Sons, 1997.

Le méthane dans les océans

ERWIN SUESS • GERHARD BOHRMANN • JENS GREINERT • ERWIN LAUSCH

Les hydrates de méthane présents dans les océans contiennent plus d'énergie que la totalité des réserves mondiales de combustibles fossiles. Toutefois, si le réchauffement global les décomposait, le méthane libéré aggraverait l'effet de serre.



1. LE NAVIRE DE RECHERCHE SONNE a remonté du plancher océanique de grandes quantités d'hydrate de méthane, une sorte de glace où le méthane est piégé. En fondant, les hydrates de méthane libèrent ce dernier, que l'on peut brûler (à droite).



Ce fut un moment fascinant lorsque l'énorme grappin télécommandé s'ouvrit et déversa son contenu sur le pont du bateau. Dans la boue sombre remontée du fond du Pacifique brillait et moussait une substance blanche qui ressemblait à de la neige effervescente. En la voyant fondre sous nos yeux, nous savions que notre mission était un succès.

C'était le 12 juillet 1996, et nous étions à bord du navire de recherche *Sonne*, qui effectuait sa 110^e croisière pour le Centre de recherche en géosciences marines de l'Université de Kiel. Depuis quelque temps, nous utilisions une caméra vidéo traînée par le navire pour explorer les fonds océaniques, à 100 kilomètres des côtes de l'Oregon. Soudain, à une profondeur de 785 mètres, nous avons vu plusieurs étranges taches claires (voir la figure 8) : s'agissait-il d'hydrate de méthane, une glace composée d'eau et de méthane ? Stable aux fortes pressions qui règnent au fond de l'océan, la substance se décompose rapidement à l'air libre. Des études sismiques et des forages

avaient établi la présence d'hydrate de méthane dans la région que nous explorions, mais cet hydrate semblait être bien au-dessous du fond océanique. Pour nous assurer de la nature de la substance, nous devons en prélever un échantillon. C'est pourquoi nous avons descendu le grappin qui avait, ainsi, confirmé les prévisions.

Nous avons récupéré 500 kilogrammes de blocs effervescents, que nous avons placés dans des conteneurs réfrigérés à l'azote liquide afin de les conserver. Il y en avait tant que nous avons utilisé quelques fragments afin de nous amuser avec : en approchant une flamme d'un des morceaux, nous avons obtenu la combustion du méthane, ce qui n'a laissé qu'une flaque d'eau.

Le succès de l'opération a deux causes : la commande du gros grappin, grâce à un système vidéo, nous a permis de creuser le fond juste au bon endroit, et sa remontée rapide, à partir d'une faible profondeur, a évité la décomposition du bloc prélevé. Une équipe de l'Université du Texas avait



Photographies : Geomar

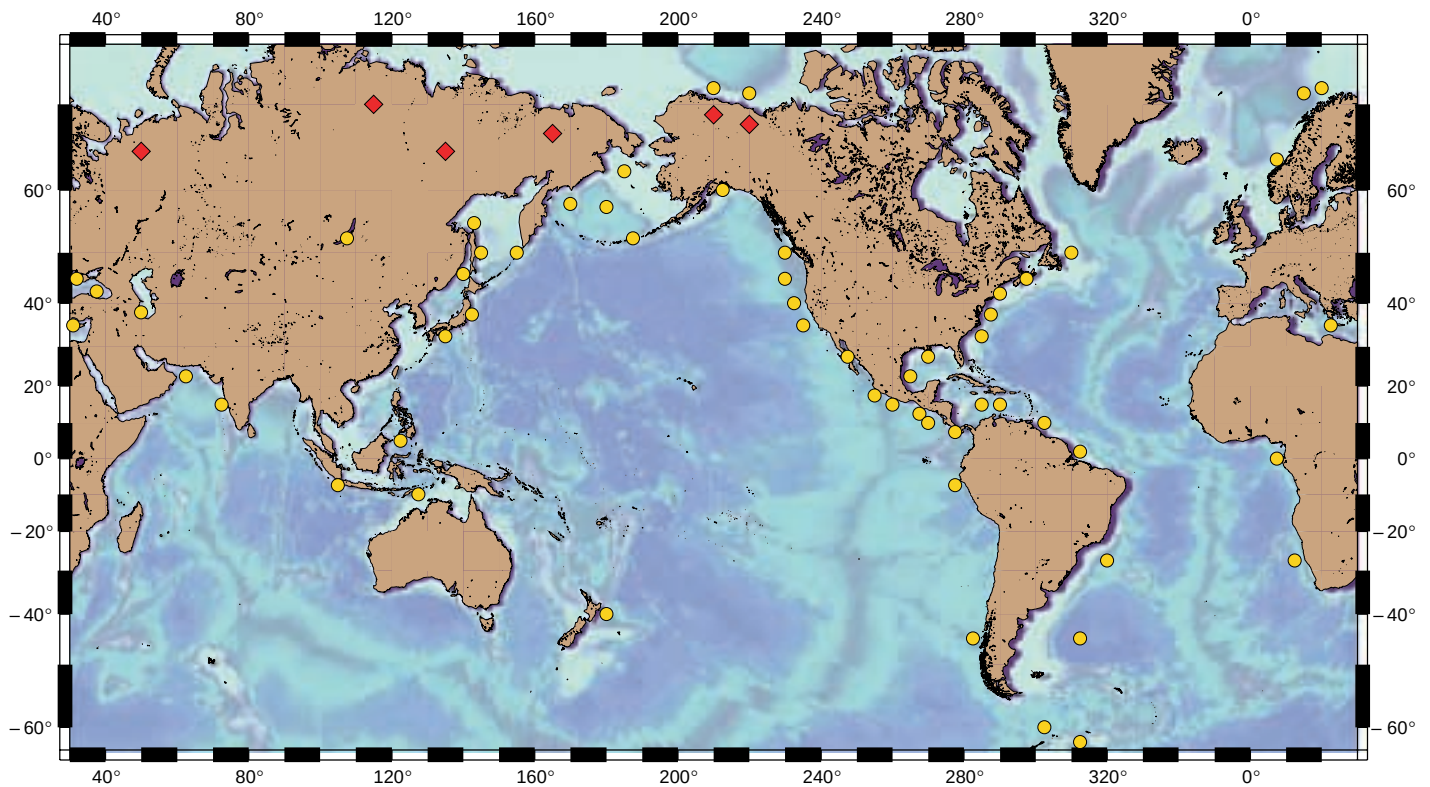
précédemment observé de l'hydrate de méthane dans le golfe du Mexique, mais elle n'en avait remonté que très peu. En d'autres occasions, des forages avaient également remonté quelques petits fragments.

Pourtant les hydrates de gaz ne sont pas rares : depuis quelques années, les océanographes en trouvent des

quantités considérables, dans le monde entier (voir la figure 2). Aujourd'hui, on estime que les hydrates de méthane présents au fond des océans contiennent, au total, deux fois plus de carbone que la totalité des gisements connus de gaz naturel, de pétrole et de charbon.

En 1997, Gerald Dickens et ses collègues de l'Université d'Ann Arbor ont

précisé les estimations en analysant des carottes prélevées dans le plancher océanique et placées dans des récipients sous pression : une zone de 26 000 kilomètres carrés, au large de la côte Sud-Est des États-Unis, contient 35 milliards de tonnes de carbone, soit 105 fois la consommation de gaz naturel des États-Unis en 1996.

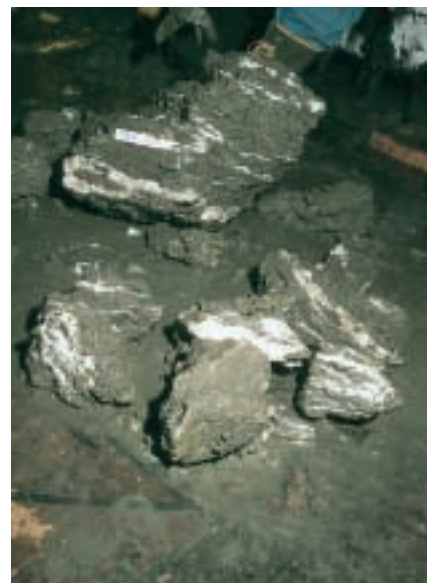


2. RÉPARTITION DES GISEMENTS D'HYDRATE DE MÉTHANE dans le monde. Ils sont généralement présents sur les talus et sur les

plateaux continentaux (points jaunes), et dans les régions où le sol est gelé en permanence (losanges rouges).



3. UN GRAPPIN TÉLÉCOMMANDÉ et équipé d'un système vidéo (à gauche) a remonté un échantillon de sédiment qu'il a prélevé dans un champ d'hydrate de méthane, au large de l'Oregon. Les morceaux (à droite)



d'hydrate pur (blanc), de sédiments et de calcaire. En plus du méthane, l'hydrate remonté contenait du sulfure d'hydrogène, nauséabond et toxique, dont les océanographes ont dû se protéger à l'aide de masques.

Toutefois, ce trésor difficile à récupérer est aussi un danger pour l'environnement : si une infime partie seulement de ces hydrates se décomposait, elle libérerait des quantités considérables de méthane, qui exerceraient un effet de serre 30 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère. Bien que le méthane subsiste peu de temps dans l'atmosphère (dix ans en moyenne), son oxydation libère du dioxyde de carbone. La décomposition des hydrates de gaz dans les fonds océaniques présente également un autre risque : elle peut provoquer des glissements de sédiments sur les talus continentaux (un tel phénomène semble s'être produit il y a environ 8 000 ans au large des côtes norvégiennes).

Des cages à gaz

Les hydrates de gaz sont connus depuis 1811 : le physico-chimiste britannique Humphry Davy décrit un hydrate composé d'eau et de chlore. Toutefois ces corps restèrent longtemps incompris : quelle était leur composition ? Et leur structure physique ? Depuis le milieu du XX^e siècle, on sait que les molécules de gaz sont piégées dans la glace, comme si elles étaient emprisonnées dans de minuscules cages (voir la figure 5) : les composés-cages sont nommés clathrates (du latin *clatratus*, «encapsulé»).

Le réseau cristallin des hydrates est généralement cubique, mais sa structure exacte dépend du type de molécules piégées : l'un des réseaux, à petites cavités, piège les petites molécules telles que le méthane (CH_4), le dioxyde de carbone (CO_2) ou le sulfure d'hydrogène (H_2S) ; l'autre réseau, à cavités plus grosses, peut emprisonner des hydrocarbures variés.

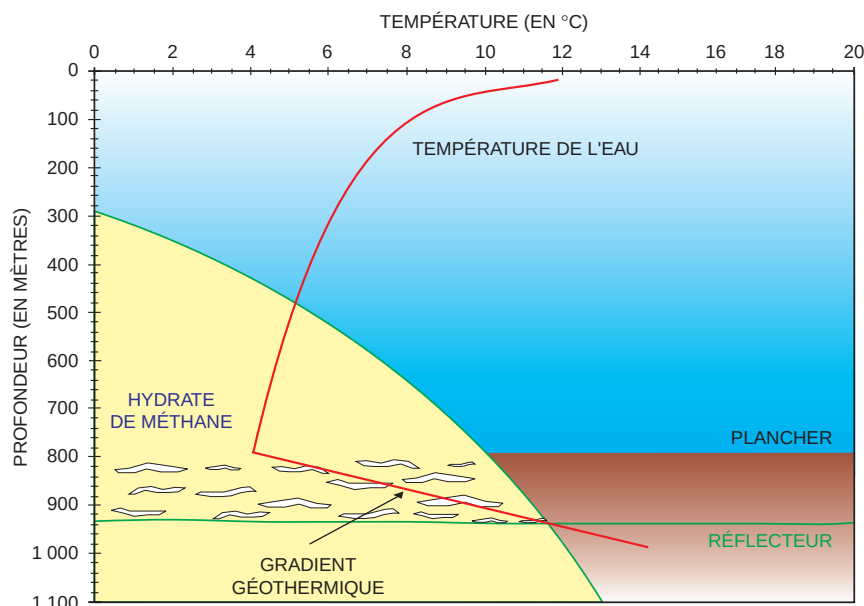
Ces cages cristallines peuvent stocker des quantités étonnantes de gaz : la fonte de un centimètre cube d'hydrate de méthane libère jusqu'à 164 centimètres cubes de méthane. En outre, les diverses cages d'un hydrate peuvent contenir des molécules différentes : l'hydrate que nous avons récupéré en 1996 contenait un à deux pour cent de sulfure d'hydrogène, composé toxique et nauséabond qui nous força à porter des masques de protection (voir la figure 3).

Les géologues ne s'intéressèrent aux hydrates de gaz que dans les années 1930, quand ils apprirent que ces substances gênaient le transport du gaz dans les gazoducs. Puis, dans les années 1960,

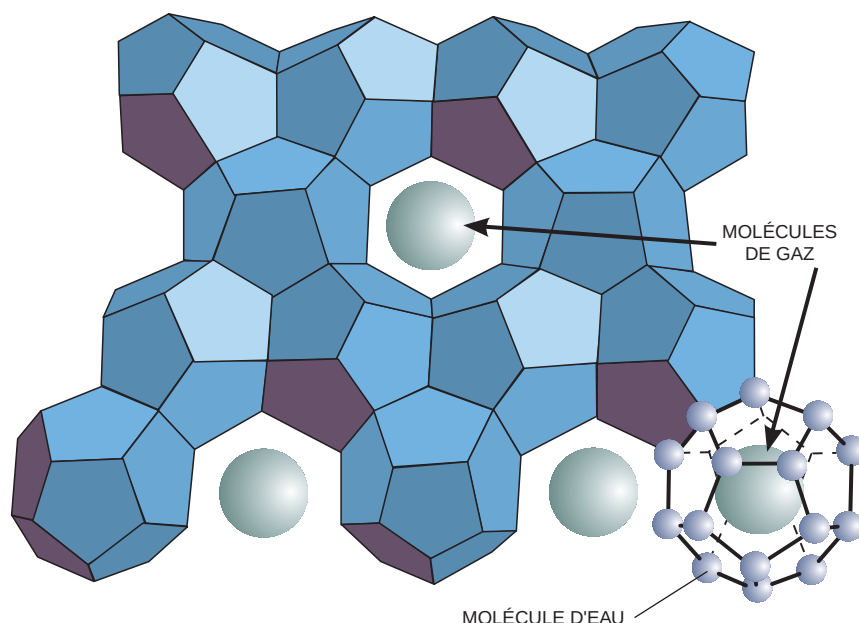
on découvrit les premiers gisements naturels d'hydrates de gaz dans les sols gelés de Sibérie et d'Amérique du Nord. Vers 1970, les géophysiciens américains George Bryan et John Ewing commencèrent à supposer que les fonds océaniques renfermaient également de l'hydrate de méthane : au cours d'études sismologiques de la ride Blake, ils observèrent un réflecteur d'ondes sismiques inhabituel. Situé à quelque 600 mètres

sous le fond océanique, ce réflecteur avait une forme identique à celle du contour de la ride. Ils en conclurent que les réflexions étaient dues à l'interface d'une couche d'hydrate de méthane et d'une couche de gaz libre, en dessous.

Les océanographes ont ensuite retrouvé ce type de réflecteur dans les bassins océaniques du monde entier : les forages ont confirmé que le réflecteur est particulièrement net



4. LE DOMAINE DE STABILITÉ de l'hydrate de méthane sous sa forme naturelle, c'est-à-dire associé à du sulfure d'hydrogène (2,6 pour cent), est représenté en jaune sur ce diagramme de phase. La limite inférieure de la couche d'hydrate, dans le plancher océanique, est située au point où le gradient géothermique (qui indique l'augmentation de la température en fonction de la profondeur) atteint le bord de la zone. Cette limite inférieure apparaît, dans les études sismiques, par un réflecteur qui ressemble à celui du fond.



5. DES MOLÉCULES D'EAU forment des cages dodécédriques (en bas à droite) dans les hydrates de gaz. Ces cages piègent des molécules de gaz variés, tels le méthane ou le sulfure d'hydrogène.

quand du méthane gazeux s'accumule sous une couche de sédiments que l'hydrate a cimentée. Cependant, les navires de forage recueillaient rarement l'hydrate dans les échantillons prélevés ; on n'observait sa présence qu'indirectement, par une concentration élevée en méthane gazeux et par une diminution de la concentration en ions chlorure dans l'eau interstitielle.

Pour que de l'hydrate de méthane se forme dans l'océan, quatre conditions doivent être réunies : du méthane doit être présent (il est généralement formé par décomposition de matière organique) ; la concentration en gaz doit être supérieure à la concentration maximale du gaz dissous ; la température doit être très peu inférieure à la température de congélation ; et la pression doit être de l'ordre de celle qui s'exerce à 500 mètres de profondeur.

Ces quatre conditions sont souvent réunies sur les talus continentaux, où le fond océanique plonge d'un plateau peu profond vers une plaine abyssale. Dans la plupart des bassins océaniques, ces talus portent une couche d'hydrate de méthane, qui s'enfonce, sous le fond de l'océan, jusqu'à plusieurs centaines de mètres dans le sédiment. À sa base, cette couche est fondue par la chaleur provenant de l'intérieur du Globe, et le méthane gazeux s'accumule. Quand des sédiments se déposent, la position de la poche d'hydrate de méthane migre, parce que les parties inférieures fondent ; la couche d'hydrate monte à travers les couches de sédiments nouvellement déposés, laissant des traces de son passage.

Loin des talus continentaux, on trouve rarement de l'hydrate de méthane, parce que la matière organique qui engendrerait du méthane s'y dépose peu. De même, on trouve peu d'hydrates sur les plateaux continentaux, parce que la profondeur est faible : la pression est insuffisante et la température excessive. On connaît des exceptions : des hydrates de gaz sont présents dans des eaux peu profondes des régions polaires, parce que la pression relativement

faible est compensée par des températures très basses, et dans quelques mers très profondes où se déposent en abondance des sédiments riches en matière organique.

Les océanographes cherchent de l'hydrate de méthane dans toutes ces régions océaniques. La zone de subduction Cascadia, au large de l'Oregon, semble être un site particulièrement propice : par endroits, le plancher océanique y est pavé d'hydrates. Ces zones, qui mesurent parfois plusieurs centaines de mètres carrés, sont souvent tapissées d'épaisses couches de dépôts bactériens. Le long de cette marge continentale, la plaque Juan de Fuca, dont la surface forme une petite partie du plancher océanique du Pacifique du Nord-Est, glisse sous la plaque Nord-américaine à une vitesse de 4,5 centimètres par an. Lors de cette subduction, les sédiments que porte la plaque qui s'enfonce sont raclés par la plaque supérieure et plissés ou empilés en plu-

sieurs couches, telles des écailles géantes. Les matériaux déformés forment un prisme d'accrétion qui s'entasse contre la plaque Nord-américaine. Dans la région étudiée, plusieurs rides ont été formées, presque parallèlement à la côte.

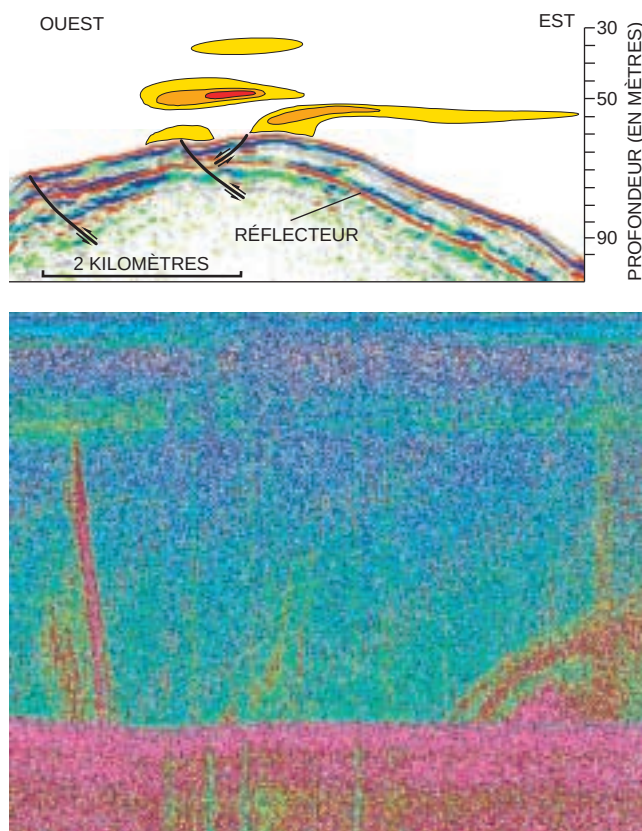
La zone de subduction Cascadia est l'une des régions où les géologues étudient les marges continentales actives : la subduction provoque des séismes, un volcanisme actif et la formation de chaînes de montagnes. L'étude des hydrates de gaz a éclairé la compréhension des rides d'accrétion, au point que les États-Unis ont renommé la ride d'accrétion numéro 2 : depuis janvier 1988, c'est la ride des hydrates.

Au cours de la subduction, la pression comprime les sédiments et en exprime l'eau et les gaz. Ces derniers sont expulsés du plancher océanique par des sources froides. En 1984, l'un de nous (E. Suess) découvrit ces sources sous-marines froides dans la zone de subduction Cascadia, à l'aide du submersible américain *Alvin* de l'Institut océanographique de Woods Hole. On considère aujourd'hui que ces sources sont caractéristiques des zones de subduction.

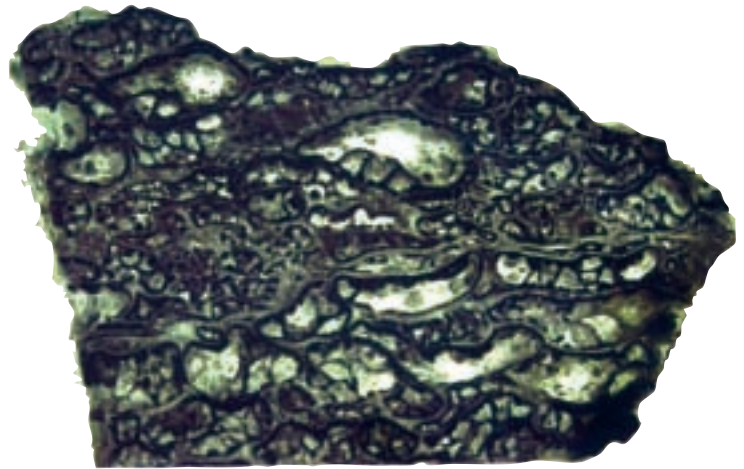
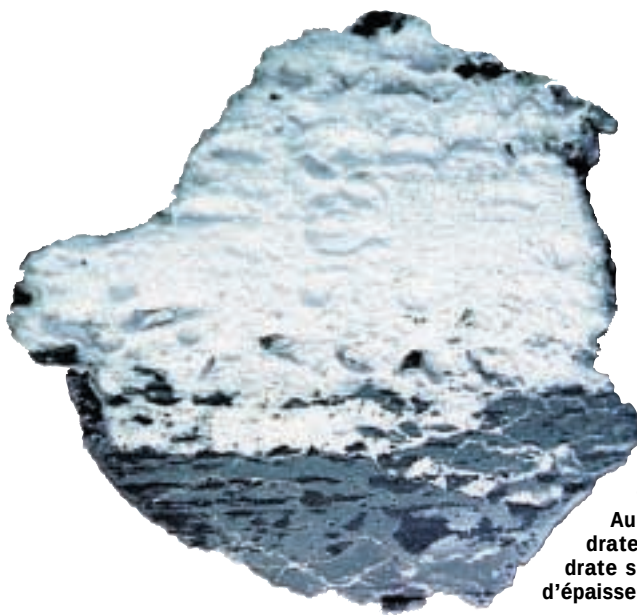
Les sources froides et leurs occupants

Les analyses chimiques de ces sources ont montré qu'elles ne libèrent pas simplement de l'eau interstitielle, directement issue du sédiment : la concentration en sel est trop faible. On suppose donc que de l'eau provenant de la fonte d'hydrates (les hydrates sont composés d'eau douce) s'est mélangée à l'eau interstitielle.

D'où vient cette eau ? La pression permanente de la plaque qui s'enfonce plisse les couches sédimentaires. Le long des limites de plis, qui s'ouvrent à travers les strates du sédiment rempli d'hydrates de gaz, les fluides et les gaz remontent des profondeurs, chauffant les couches solides et déstabilisant les hydrates. Ainsi du sulfure d'hydrogène et de l'ammoniac sont libérés en même temps que le méthane.



6. ON A DÉTECTÉ des panaches de méthane dans l'eau de mer au-dessus de failles (lignes noires avec flèches dans le schéma supérieur). Dans le profil sismique du plancher océanique, la limite inférieure de la couche d'hydrates de gaz est clairement visible sous forme d'un réflecteur. Les zones jaunes, orange et rouges, dans l'image supérieure, indiquent des concentrations respectivement égales à 5, 10 et 50 nanolitres par litre. Un sonar utilisé pour la détection des bancs de poissons a identifié des panaches de méthane qui s'élevaient du plancher océanique dans la mer d'Okhotsk (en bas).



7. LA STRUCTURE VÉSICULAIRE des hydrates de gaz prélevés au large de l'Oregon, en 1996, donne des indices sur leur formation. L'échantillon de gauche s'est formé quelques mètres au-dessous du plancher océanique. À cet endroit, du méthane s'échappant sous forme gazeuse a été piégé dans des couches de sédiments plus denses. Au cours du processus, le méthane a réagi avec l'eau pour former de l'hydrate de méthane dans les interstices des sédiments. Les «lentilles» d'hydrate sont clairement visibles dans la coupe polie d'environ deux millimètres d'épaisseur représentée ci-dessus.

L'oxydation des composés libérés forme du dioxyde de carbone, des sulfates et des nitrates, qui nourrissent une abondante communauté de bactéries. Ces micro-organismes produisent à leur tour des nutriments essentiels pour des coquillages et pour des vers avec lesquels ils vivent en symbiose. Les bactéries occupent des tissus spéciaux des branchies des coquillages ou le trophosome (une adaptation de l'intestin) des vers. Elles bénéficient de l'oxygène que brassent les coquillages et les vers. Des colonies de cette faune particulière sont l'une des caractéristiques des sources froides, qui sont des oasis de vie dans le fond océanique.

Certains vers vivent même directement dans l'hydrate de méthane. À une profondeur de 700 mètres, dans le golfe du Mexique, on a observé des vers roses de deux à cinq centimètres de long qui avaient creusé leurs terriers, serrés les uns contre les autres, en fondant l'hydrate (voir la figure 9). Cette espèce jusqu'alors inconnue, *Hesiocaeca methanolica*, coopère également avec des bactéries pour profiter de la présence de méthane.

Nos études de sources froides ont également montré que les gaz libérés en ces endroits modifient activement les fonds. Quand l'hydrate de méthane devient instable, l'oxydation du méthane libéré, en formant du dioxyde de carbone, provoque la formation de bicarbonate de sodium, qui se combine aux ions calcium présents dans l'eau de mer pour former du calcaire.

Ce dernier est alors sous une forme solide, stable, tandis que les sédiments sont entraînés par l'érosion, qui dénuie d'immenses blocs. Le long de la dorsale des hydrates, le calcaire forme ainsi une croûte et des concrétions, il tapisse les sources et compose le corps des cheminées. On trouve des exemples de ce phénomène sur des centaines de mètres carrés.

Les structures calcaires qui indiquent la présence antérieure d'une couche d'hydrate peuvent également constituer des structures fossiles dans d'anciennes strates géologiques. On les nommait des biothermes, en reprenant le nom qui est utilisé pour décrire des structures créées par les coraux, les éponges ou certaines algues. Toutefois, bien qu'il y ait également des coquillages dans le calcaire formé à partir des hydrates, ce dernier est essentiellement d'origine inorganique : on a récemment proposé de les nommer plutôt des chimiothermes.

L'instabilité des fonds océaniques

Malgré l'activité des organismes vivants dans les sources froides et malgré la formation de calcaire, des quantités notables de méthane s'échappent dans l'océan : dans les panaches de gaz que nous avons analysés, nous avons trouvé jusqu'à 74 microlitres de méthane par litre d'eau de mer (1 300 fois la concentration normale).

Le méthane des hydrates constitue une gigantesque source de carbone et d'énergie, dans un environnement unique. On ignore encore combien de méthane est oxydé dans l'eau et combien de méthane est libéré, mais on sait qu'une forte remontée tectonique pourrait libérer des quantités considérables de ce gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Notre abondante récolte d'hydrate de méthane, en 1996, a procuré des échantillons en nombre suffisant pour des analyses détaillées. Une première étude des blocs d'hydrate, à bord du navire *Sonne*, avait révélé que la structure différait notablement de celle d'échantillons qui avaient été récupérés au cours de forages, à des profondeurs supérieures. Dans ce dernier cas, l'hydrate remplit les interstices entre les grains de sable et les particules d'argile et les cimente. En revanche, près de la surface du plancher océanique, des couches d'hydrate de plusieurs millimètres ou centimètres d'épaisseur courent quasi parallèlement aux strates, les coupant parfois, ou formant des veines dans le sédiment.

Puis, de retour de mission, les chimistes de l'Institut Alfred Wegener de Bremerhaven ont réalisé des coupes minces, en travaillant à la température de -23°C : ils y ont trouvé des bulles de diamètre atteignant un centimètre (voir la figure 7). Peter Brewer et ses collègues de l'Aquarium de Moss Landing ont récemment réalisé une synthèse

expérimentale d'hydrate de méthane dans les conditions naturelles. À une profondeur de 910 mètres, dans l'océan, ils ont fait passer du méthane gazeux à travers des couches de sable plongées dans l'eau : en quelques minutes, parfois en quelques secondes, ils ont obtenu des hydrates dont la texture ressemblait à celle du matériau naturel que nous avions prélevé.

L'hydrate prélevé au large de l'Oregon contient non seulement du méthane, mais également de 1,5 à 3 pour cent de

sulfure d'hydrogène, et des traces d'éthane, de propane et de dioxyde de carbone. Les analyses chimiques et la détermination des divers isotopes du carbone (le noyau de ces atomes contient toujours six protons, mais le nombre de neutrons varie selon les isotopes) ont confirmé que le méthane se forme par décomposition microbienne de matière organique dans le sédiment.

Contrairement au Pacifique, qui est entouré de nombreuses zones de subduction, l'Atlantique est ceint de

marges continentales passives, éloignées de toute limite de plaque. Malgré leur faible activité tectonique, ces talus sont pourtant dynamiques : les sédiments apportés du continent déstabilisent parfois les pentes et provoquent des glissements de terrains sous-marins ou d'importants effondrements. L'un des glissements les plus spectaculaires a eu lieu au large de la côte norvégienne, à la latitude de Trondheim, il y a quelque 8 000 ans : 5 600 mètres cubes de sédiments ont glissé sur une

La Méditerranée et le golfe de Guinée

Longtemps ignorée, la présence massive d'hydrates de gaz dans certaines régions sous-marines du Globe a des conséquences importantes, tant pour la compréhension de la Terre que pour l'industrie. L'*Ifremer* et, plus généralement, l'océanographie française possèdent des compétences de tout premier plan dans les domaines de l'imagerie acoustique des grands fonds marins et de l'observation directe des fonds au moyen des submersibles. Aussi, la contribution française à l'effort de recherche international sur les hydrates s'est tout naturellement développée autour de la mise en œuvre de ces moyens d'exploration.

Alors que les hydrates ont été principalement découverts dans les eaux les plus froides, des équipes françaises et hollandaises ont observé des accumulations d'hydrates de gaz dans les bassins méditerranéens : plusieurs équipes scientifiques, sous l'impulsion de l'*Ifremer* (Institut français de recherches pour l'exploitation de la mer) et de l'institution correspondante aux Pays-Bas, ont entrepris, ensemble, l'exploration des volcans de boue du fond de la Méditerranée. Particulièrement nombreux au Sud de la Crète, ces volcans de boue sont des cônes d'éjection de sédiments fluidisés, observés en fond de mer. Ces sédiments pourraient provenir de plusieurs kilomètres sous le fond de la mer, où des conditions de surpression des fluides interstitiels prévalent.

Les scientifiques français et hollandais qui ont utilisé le sous-marin *Nautilus* de l'*Ifremer*, lors de la mission MEDINAUT, réalisée en novembre 1998, ont observé de nombreux suintements de fluides froids et une intense activité biologique à la surface des volcans de boue, au Sud de la Crète et de la Turquie, ainsi que de fortes concentrations en méthane dans l'eau de mer à leur voisinage. Ils ont relié ces observations à la présence d'accumulations d'hydrates de gaz au sein des volcans de boue. La prochaine étape sera de mieux évaluer l'importance de ces accumulations.

Les hydrates de gaz déterminent les propriétés physiques des sédiments qui les renferment : réduisant la perméabilité des sédiments, ils facilitent le piégeage des hydrocarbures dans les niveaux sédimentaires sous-jacents (en particulier des gaz) ; d'autre part, une possible fragi-

lisation mécanique des terrains induit des risques de glissement sous-marin. Dans les provinces pétrolières où l'exploration se situe par des profondeurs d'eau supérieures à 500 mètres (golfe de Guinée, golfe du Mexique, Brésil, mer du Nord), les hydrates de gaz constituent donc un facteur de risque industriel important.

C'est pourquoi, il n'est pas étonnant que les hydrates de gaz constituent un des quatre thèmes de recherche du programme scientifique de recherche *ZaiAngo*, commencé en 1998 par *Ifremer* et par *Elf-ep* sur la marge Gabon-Congo-Angola. Ce programme est fondé sur plusieurs campagnes océanographiques, de 1998 à 2001. L'étude des hydrates de gaz et, plus largement, de la circulation des fluides dans cette zone comporte quatre volets : la reconnaissance acoustique des zones actives, l'étude sismique détaillée des formations à hydrates, l'étude du champ de températures à l'interface eau-sédiment, l'étude des échanges à l'interface eau-sédiment et dans la colonne d'eau. En décembre 1999, à l'aide du système sismique remorqué près du fond *Pasisar* et à l'aide d'un réseau de capteurs, posé sur le fond, on déterminera les propriétés mécaniques du milieu, ainsi que les quantités de gaz libre et d'hydrates présents. Pour connaître la stabilité des hydrates à court terme, on mesurera la température au fond et dans le sous-sol. Deux sondes resteront plantées dans le fond pendant près d'une année, afin d'enregistrer d'éventuelles modifications du champ de températures au cours des saisons. Pour mieux comprendre la genèse des hydrates de gaz et leur évolution, les échanges à l'interface eau-sédiment et dans la colonne d'eau seront analysés fin 2000, dans la cadre d'un programme d'observation du fond conduit avec l'engin de reconnaissance d'*Ifremer* : le *ROV Victor 6000*.

Si une multitude de questions subsistent aussi bien sur le plan géologique, biologique, physique ou chimique concernant les hydrates de gaz, les efforts de recherche importants qui sont entrepris par les différents pays devraient donner des résultats dans les années à venir et démontrer toute l'importance de ce phénomène sur l'évolution des marges et du système Terre en général.

Bruno SAVOYE et Jean-Paul FOUCHER
Ifremer Brest



8. LES HYDRATES DE GAZ apparaissent sous la forme de zones blanches sur les images du plancher océanique qui ont été filmées par un traîneau équipé d'une caméra vidéo au large de l'Oregon (l'objet suspendu au bout de la corde est un lest). Des bivalves ont colonisé les zones extérieures aux champs d'hydrates.

distance de 800 kilomètres, du bord supérieur du talus continental jusqu'au bassin norvégien.

Ce glissement, qui a dû provoquer des raz de marée dévastateurs, a probablement été déclenché par des hydrates de gaz accumulés à des profondeurs comprises entre 400 et 1 500 mètres. L'instabilité des hydrates semble avoir été déclenchée par le réchauffement correspondant à la dernière glaciation. Un phénomène de ce genre peut-il se reproduire ? Le problème de la stabilité du talus continental se pose aujourd'hui, en raison du réchauffement du climat terrestre. Un réchauffement de l'atmosphère inférieure de seulement un ou deux degrés risque de perturber l'hydrate de méthane qui cimente aujourd'hui les particules des sédiments.

Au Sud de la Norvège, le risque de nouveaux glissements paraît faible, car les champs d'hydrate se sont déjà largement décomposés. En revanche, au Nord du glissement Storrega, on a détecté des structures qui pourraient glisser, ainsi que des champs d'hydrates en mouvement. Au cours de l'été 1998, des océanographes les ont explorés à l'aide de deux submersibles, *Mir I* et *Mir II*, du navire de recherche *Mstislav Keldysh* de l'Institut russe d'océanologie de Moscou.

Au cours de l'expédition, les océanographes ont également étudié le volcan de boue situé plus au Nord et qui pourrait être alimenté par la décomposition d'hydrates. Large de trois kilomètres et haute de 20 mètres, cette structure, aujourd'hui inactive, fut

découverte en 1995, au cours d'une étude des fonds marins par sonar. Elle est à une profondeur de 1 250 mètres, près du site d'un ancien glissement ; des traces d'émission de méthane ont été trouvées parmi des tapis de bactéries ; une faune caractéristique des sources froides est présente, mais il n'y a pas encore de preuve que les hydrates sont la cause de l'éjection de la boue.

Enfin, J. Mienert et son collègue Jörg Posewang ont récemment analysé les résultats d'études sismiques et les mesures de vitesse des ondes de compression dans les sédiments renfermant des hydrates de gaz. Apparemment, la partie qui surmonte le réflecteur n'est pas composée d'une couche continue d'hydrate. Notamment, ils ont mis en évidence deux couches de sédiments cimentées par de l'hydrate de gaz, superposées comme deux étages d'un immeuble. La couche intermédiaire contient du gaz libre dans les espaces interstitiels des sédiments. Les deux couches d'hydrate, épaisses chacune de 60 mètres, sont interrompues par des zones verticales où le gaz remonte vers le plancher océanique, d'où une présence de gaz libre à l'intérieur d'une zone censée contenir de l'hydrate stable. Le plancher océanique glacé semble ainsi étonnamment dynamique.

Les hydrates de gaz sont instables dans d'autres régions. Par exemple, on a observé des champs d'hydrates analogues dans la mer de Barents, un vaste plateau continental au Nord du cercle polaire, dans le golfe du Mexique ou dans la région de la ride Blake. William

Comment optimiser la fabrication de vos produits émulsionnés ?

Séminaire à Paris, les mercredi 24 et jeudi 25 novembre 1999

Du laboratoire à la production, la méthodologie pour améliorer la qualité de vos produits

- ▼ *Quelles sont les notions essentielles pour comprendre les émulsions ?*
- ▼ *La formulation, la stabilité du mélange, ...*
- ▼ *Quelles sont les différentes technologies utilisées à connaître ?*
- ▼ *Quels sont les éléments à maîtriser pour optimiser le transfert d'échelle du laboratoire au centre de production ?*
- ▼ *Comment rédiger son cahier des charges pour retenir le meilleur équipement ?*
- ▼ *Quels sont les enseignements à retenir de différents secteurs industriels : le médical, l'alimentaire, la pharmacie, la cosmétique, ... ?*

Pour plus de renseignements :

M/Mme, Prénom, Nom -----
Fonction ----- Service -----
Société -----
Tél. direct ----- Fax direct -----
E-mail -----
Adresse -----

Code postal, ville -----

☐ Je souhaite recevoir le programme de ce séminaire de formation.

La demande est à adresser à Euroforum, 35 rue Greneta,
75002 PARIS, ou par fax au 01 44 88 14 99,
ou par E-mail : fma@euroforum.fr

Dillon, de l'Observatoire géologique de Woods Hole, a repéré des failles, des effondrements et des affaissements au large des côtes Sud-Est des États-Unis, liés à la décomposition de l'hydrate et à la libération de méthane, tandis qu'un projet de recherche germano-russe (Komex) explore la mer d'Okhotsk.

Cette mer marginale, presque aussi grande que la mer du Nord et la mer Baltique réunies, est délimitée par la péninsule du Kamtchatka et l'arc insulaire des Kouriles. On connaît mal son origine et sa structure géologique. Comme ses eaux abritent d'énormes masses de plancton, elle joue un rôle clé dans le cycle global du carbone. D'autre part, avec des températures de surface de -2 °C, elle est l'une des rares régions où l'eau de surface chargée d'oxygène s'enfonce vers les abysses pour se répandre ensuite vers le Sud et vers l'Est, assurant la ventilation de grandes parties du Pacifique Nord : la mer d'Okhotsk est considérée comme le « poumon septentrional » de l'océan Pacifique.

Les panaches de méthane

Les expéditions Komex ont découvert des hydrates de méthane à l'Est de l'île Sakhaline et à l'Ouest de la chaîne des îles Kouriles. Notre traîneau équipé d'une caméra vidéo a montré des sources froides et leurs communautés caractéristiques. À l'aide d'un sonar de recherche de bancs de poissons, nous avons identifié des panaches de méthane, tandis que des analyses de l'eau montraient une sursaturation de l'eau en gaz d'un facteur 10 000. Au Nord-Est de l'île Sakhaline, par des profondeurs de 1 700 mètres environ, le traîneau vidéo a montré un paysage étrange, avec des cheminées de barytine (sulfate de baryum) de dix mètres de haut, qui caractérisent des sources froides.

La mer d'Okhotsk est couverte de glace jusqu'au 45° parallèle environ (la latitude de Bordeaux), pendant sept mois par an. D'énormes quantités de méthane qui sont libérées des hydrates et des sources froides s'accumulent sous cette couverture de glace. Durant les premières expéditions Komex, au cours de l'hiver 1991, on a mesuré une concentration de 6,5 millilitres de méthane par litre d'eau sous la couche de glace. Pendant l'été suivant, lorsque la mer fut libérée des glaces, la concentration en méthane avait chuté à 0,13 millilitre par litre : le méthane piégé

par les glaces d'hiver avait été libéré dans l'atmosphère. Bien qu'isolée, cette mesure montre que la mer d'Okhotsk est une importante source de méthane atmosphérique. Ces mesures pourraient également expliquer les fluctuations saisonnières de la concentration en méthane atmosphérique enregistrées par la station de mesure de l'île Shemya, à l'extrémité Sud-Ouest des îles Aléoutiennes.

Les climatologues admettent aujourd'hui que le méthane libéré à partir des hydrates a eu, dans le passé, de profonds effets sur le climat global. À la fin du Paléocène (il y a environ 55 millions d'années), par exemple, les températures de la terre et de l'océan semblent avoir augmenté brusquement : de nombreuses espèces de foraminifères se sont éteintes, ainsi que d'autres organismes unicellulaires qui vivaient à la surface de l'océan et dans les eaux profondes. L'abondance de l'isotope léger du carbone (le carbone 12) a augmenté dans les coquilles et dans la matière organique de l'époque : manifestement, de grandes quantités de carbone sont apparues dans la biosphère. Cette dernière observation explique l'augmentation de température : les bactéries qui décomposent la matière organique enrichissent le méthane en carbone 12. De ce fait, elles enrichissent aussi les hydrates, de sorte que si ces derniers se décomposent, on retrouve un excès de carbone 12 dans le dioxyde de carbone. La décomposition des hydrates pourrait avoir résulté d'une modification de la circulation océanique, telle qu'il semble y en avoir eu à cette époque.

Gerald Dickens et ses collègues, à Woods Hole, ont utilisé un modèle informatique pour tester cette hypothèse. Ils ont supposé qu'une quantité d'hydrate correspondant à environ huit pour cent des réserves mondiales actuelles s'est décomposée, que le méthane libéré a aussitôt (à l'échelle des temps géologiques) été transformé en dioxyde de carbone. Sur un intervalle simulé de 10 000 ans, ils ont ajouté chaque année à leur atmosphère modélisée 160 kilomètres cubes de dioxyde de carbone renfermant du carbone 12. Les calculs montrent que l'ajout de dioxyde de carbone a provoqué un réchauffement de l'atmosphère inférieure de deux degrés ; simultanément, l'abondance des divers isotopes du carbone s'est établie aux valeurs observées dans les fossiles. Puis, comme



Ch. Fischer et P. Santos, Pennsylvania State University

9. DES EXPLORATIONS effectuées à l'aide d'un sous-marin ont montré des vers de couleur rose, mesurant deux à cinq centimètres de long, qui avaient établi leurs galeries dans des hydrates de gaz qu'ils avaient fondus (en bas). Une espèce inconnue jusqu'ici, *Hesio-caeca methanolica* (en haut) vit en symbiose avec des bactéries qui se nourrissent du méthane de l'hydrate.

pour les données réelles, cette abondance s'est progressivement normalisée en l'espace de 200 000 ans.

Malgré les risques, les réserves estimées d'hydrate de méthane sont si considérables que de nombreuses sociétés pétrolières s'y intéressent. Des équipes de recherche, notamment en France et au Japon, prévoient leur récupération et leur utilisation, mais l'exploitation de cette prodigieuse source d'énergie à des coûts raisonnables présente des difficultés considérables.

Tout d'abord, les hydrates sont en profondeur et, souvent, sous le fond océanique. Ils sont très instables, voire explosifs. Même si l'on disposait d'un

système de convoyage jusqu'en surface, que faire ensuite des grandes quantités de boue et de calcaire auxquelles l'hydrate est mélangé ? Le gaz libre présent sous la couche d'hydrate n'est pas non plus facile à exploiter : la pression est trop faible pour faire jaillir le méthane à une vitesse suffisante pour le rendre exploitable.

On pourrait améliorer le rendement grâce à des techniques similaires à celles qui servent à récupérer le pétrole, lorsque les puits sont épuisés (on injecterait de la vapeur ou de l'eau chaude afin de fondre l'hydrate et de libérer davantage de méthane, puis ce dernier serait pompé à travers un autre trou de forage), mais, là encore, les coûts seraient élevés. Enfin, comment ramener le combustible à terre ? Les pipelines sous-marins sont très coûteux et exposés, sur le talus continental, aux glissements de terrain. Ce risque serait encore accru par l'extraction de l'hydrate qui stabilise les talus.

Pour éviter ces difficultés, certains ont proposé d'économiser le prix des pipelines en liquéfiant le gaz sur des navires ou sur des plates-formes de forage : le méthane serait d'abord transformé en hydrogène et en monoxyde de carbone ; puis, à l'aide d'un catalyseur, on synthétiserait des hydrocarbures liquides à longue chaîne que l'on pourrait facilement transporter par bateau. Ce type de solution a ses défauts : il fait perdre 35 pour cent de l'énergie. D'autres envisagent une installation de production installée sur le plancher océanique, où le méthane se combinerait avec l'eau pour former de l'hydrate pur. Celui-ci serait alors remorqué dans des réservoirs de stockage en forme de zeppelins. Quels que soient les résultats des recherches dans le domaine des hydrates, le futur sera certainement riche en découvertes et en innovations.

Erwin SUESS, Gerhard BOHRMANN et Jens GREINERT travaillent au Département de géologie de l'environnement marin du Centre de recherche GEOMAR, à Kiel. Erwin LAUSCH est membre du conseil d'administration de GEOMAR.

K. KVENVOLDEN et al., *Worldwide Distribution of Subaquatic Gas Hydrates*, in *Geo-Marine Letters*, vol. 13, pp. 32-40, 1993.

E. SUESS et al., *Methanhydratfund von FS Sonne vor der Westküste Nordamerikas*, in *Geowissenschaften*, vol. 15, pp. 194-199, juin 1997.

E. SUESS et al., *Fluid Venting in the Eastern Aleutian Subduction Zone*, in *Journal of Geophysical Research*, vol. 103, n° 2, pp. 2597-2614, 10 février 1998.

J.-P. HENRIET et J. MIENERT, *Gas Hydrates : Relevance to World Margin Stability and Climatic Change*, in *Geological Society Special Publication*, vol. 137, 1998.

G. BOHRMANN et al., *Authigenic Carbonates from the Cascadia Subduction Zone and their Relation to Gas Hydrate Stability*, in *Geology*, vol. 26, pp. 647-650, 1998.

Le vrai et le faux en peinture de chevalet

PATRICK LE CHANU

À l'aide de techniques d'examen et d'analyse, le scientifique peut discerner les indices d'une falsification artistique. Pour d'autres questions, telle l'attribution d'une œuvre, les progrès sont plus lents

Qui êtes-vous pour prétendre posséder un Picasso ?
Richard Weiss, 1998.

Pourquoi les débats sur les faux sont-ils aussi passionnés ? Essentiellement en raison d'une récupération commerciale, préjudiciable à l'étude sereine d'une œuvre. Au-delà de ces débats, le statut du chercheur qui étudie les peintures en laboratoire reste de définition délicate : les historiens de l'art et les conservateurs de musée doivent guider son travail, mais le scientifique doit respecter la méthodologie des sciences exactes. De quels outils disposent le scientifique pour étudier une œuvre ?

Les méthodes d'examen consistent à réaliser des images des œuvres à l'aide de divers rayonnements. Les images dans l'infrarouge, par exemple, révèlent le dessin sous-jacent, tandis que les images dans l'ultraviolet font ressortir des repeints récents. Les méthodes d'analyse physico-chimique quant à elles, visent plutôt à l'identification des matériaux constitutifs, indices précieux pour reconstituer l'histoire de la création d'un tableau.

À partir de quelques exemples, nous verrons comment ces méthodes sont utilisées et quelles sont

leurs limites. Le plus souvent, ce n'est pas l'authenticité qui pose problème, mais l'attribution. Là, le laboratoire reste encore assez démuné.

Qu'est-ce qu'un faux ?

Les médias relatent régulièrement des affaires de falsifications artistiques. Sous cette rubrique, on trouve en fait des cas de nature très diverse, dont certains n'ont rien à voir avec le faux. D'ailleurs, qu'est-ce qu'un faux ? C'est un objet créé d'emblée pour tromper

et passer pour ce qu'il n'est pas, du point de vue de son auteur ou de l'époque de sa création.

L'efficacité et l'intérêt des méthodes de laboratoire diffèrent selon les questions que l'on se pose. Première question : à qui est attribué le tableau ? Cette question porte exclusivement sur la paternité d'une œuvre créée en toute sincérité par un artiste, mais dont le lien avec celui-ci n'a pas été scellé par une signature ou par un monogramme. Ces cas de tableaux anonymes sont très nombreux dans

la peinture antérieure au XIX^e siècle.

Vient ensuite la question des copies. Souvent peintes à des fins pédagogiques par des artistes en cours de formation, elles sont innombrables, et leur quantité dépasse de beaucoup celle des faux avérés. Ainsi, lors de son séjour en Italie, Pierre Paul Rubens (1577-1640) copia les grands maîtres italiens. En raison de la célébrité de leurs auteurs, les copies peintes par des maîtres lors de leur apprentissage sont aujourd'hui bien plus recherchées que bien des œuvres originales. Lorsqu'elles ne portent pas la signature de leur auteur, les copies peuvent être ensuite frauduleusement présentées comme des œuvres de celui ou de celle qu'elles imitent.



1. CETTE PIÉTA que l'on prit d'abord pour un tableau de l'école rhénane du XV^e siècle serait un faux. Le tableau aurait été peint au début du XX^e siècle par le «Fausaire pathétique» qui a été trahi par l'utilisation d'un style différent de celui du XV^e siècle.