

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'épais 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.

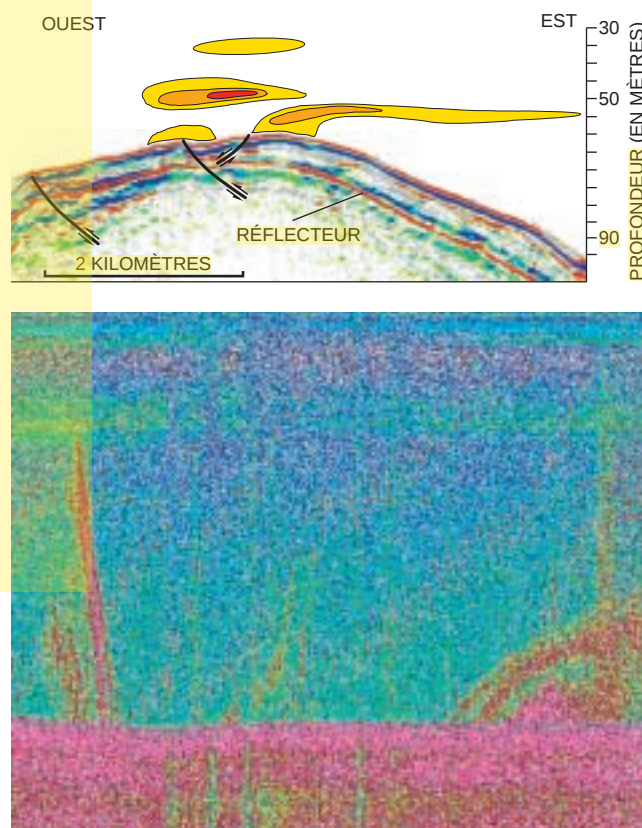
La zone de subduction Cascadia est l'une des régions où les géologues étudient les marges continentales actives : la subduction provoque des séismes, un volcanisme actif et la formation de chaînes de montagnes. L'étude des hydrates de gaz a éclairé la compréhension des rides d'accrétion, au point que 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.

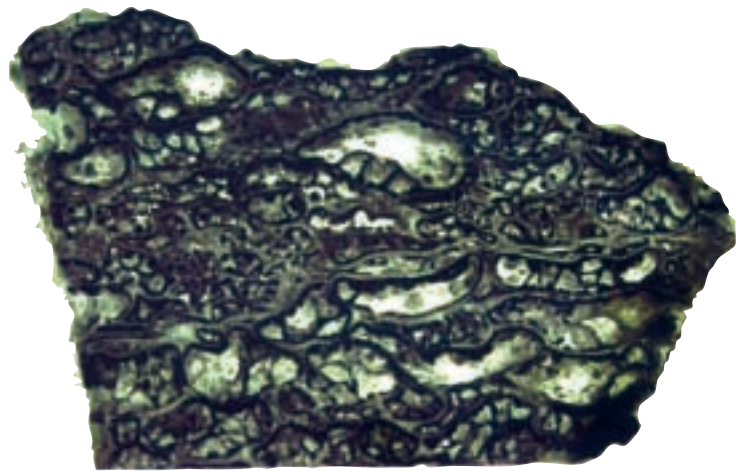
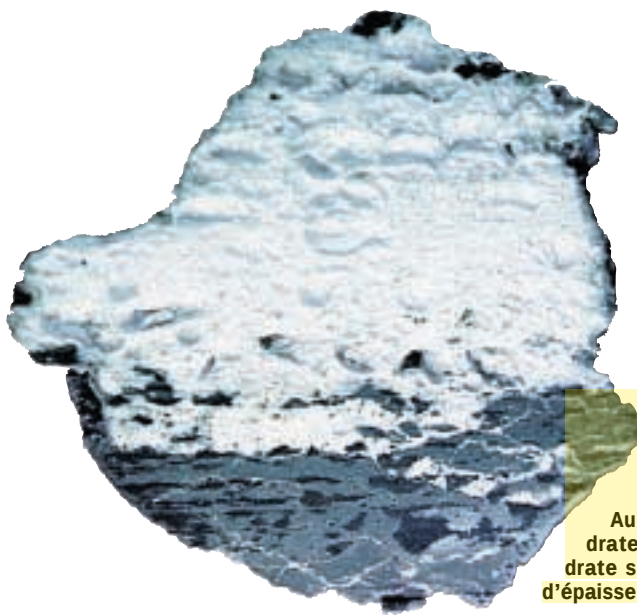
Les sources froides et leurs occupants

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