

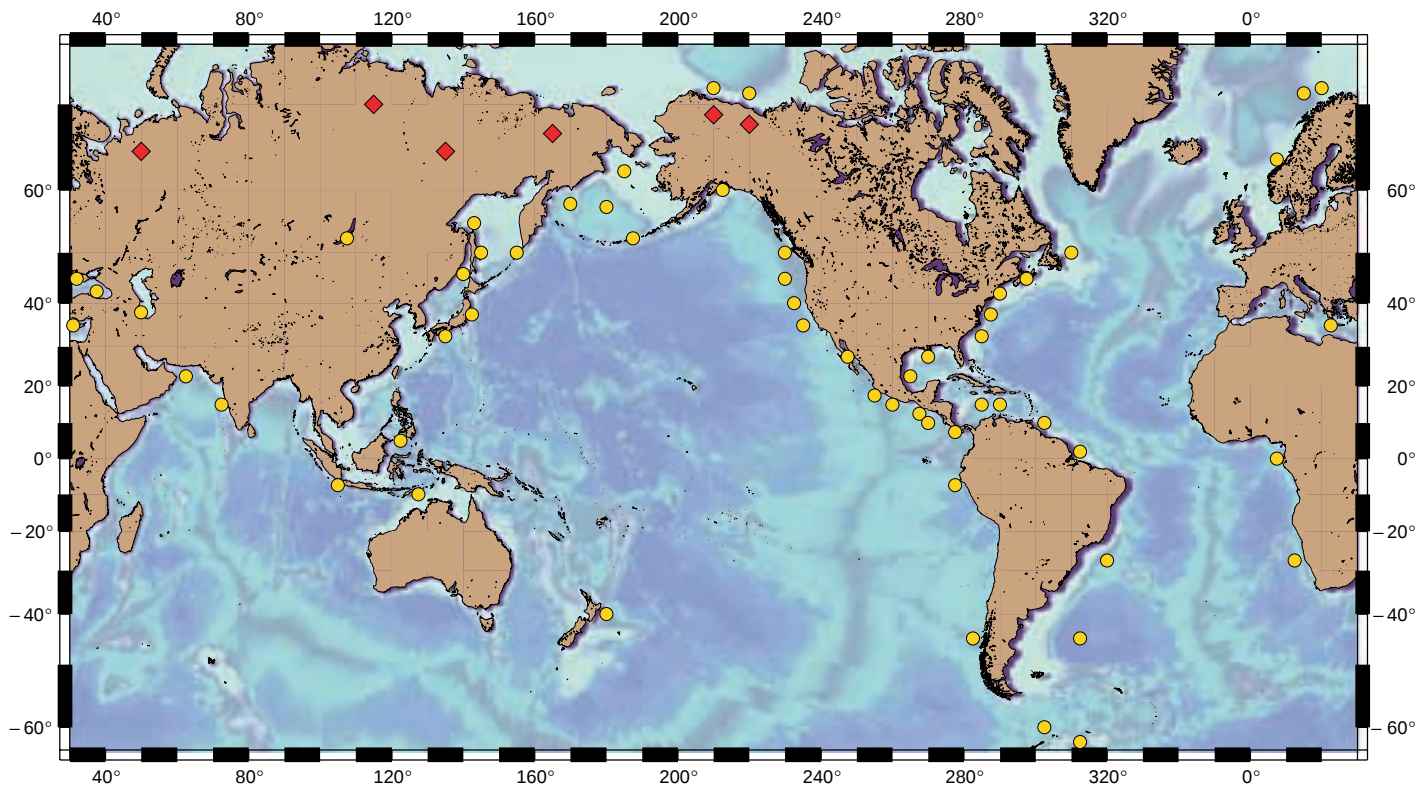
précédemment observé de l'hydrate de méthane dans le golfe du Mexique, mais elle n'en avait remonté que très peu. En d'autres occasions, des forages avaient également remonté quelques petits fragments.

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.

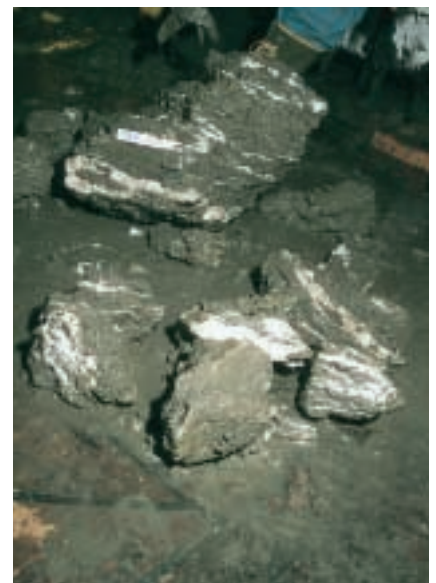


2. RÉPARTITION DES GISEMENTS D'HYDRATE DE MÉTHANE dans le monde. Ils sont généralement présents sur les talus et sur les

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.

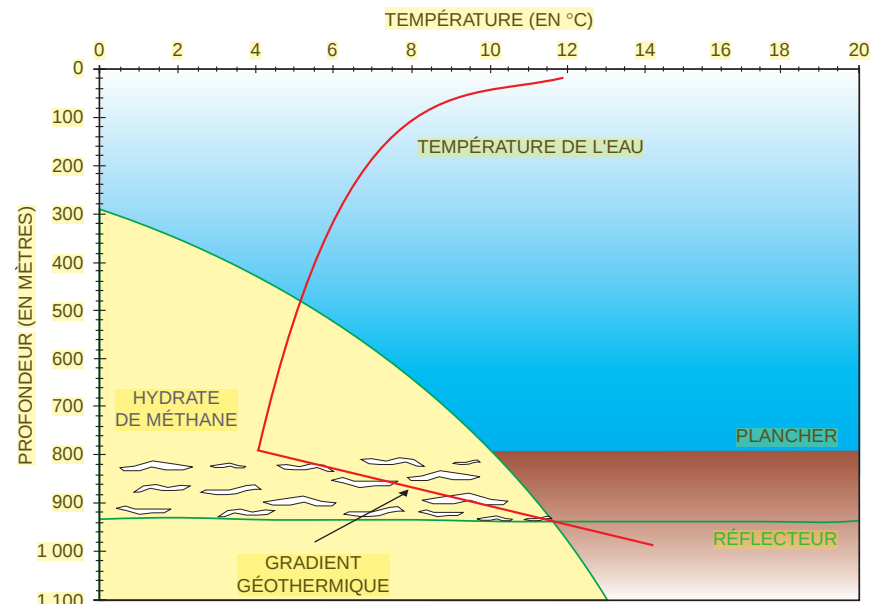
Ces cages cristallines peuvent stocker des quantités étonnantes de gaz : la fonte de un centimètre cube d'hydrate de méthane libère jusqu'à 164 centimètres cubes de méthane. En outre, les diverses cages d'un hydrate peuvent contenir des molécules différentes : l'hydrate que nous avons récupéré en 1996 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,

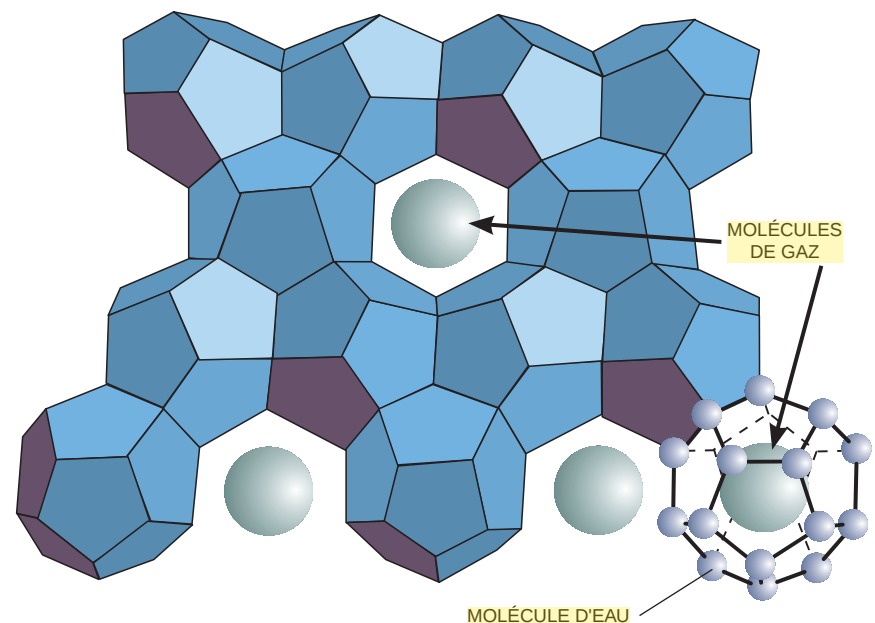
on découvrit les premiers gisements naturels d'hydrates de gaz dans les sols gelés de Sibérie et d'Amérique du Nord. Vers 1970, les géophysiciens américains George Bryan et John Ewing commencèrent à supposer que les fonds océaniques renfermaient également de l'hydrate de méthane : au cours d'études sismologiques 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 MOLECULES D'EAU forment des cages dodécaédriques (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.

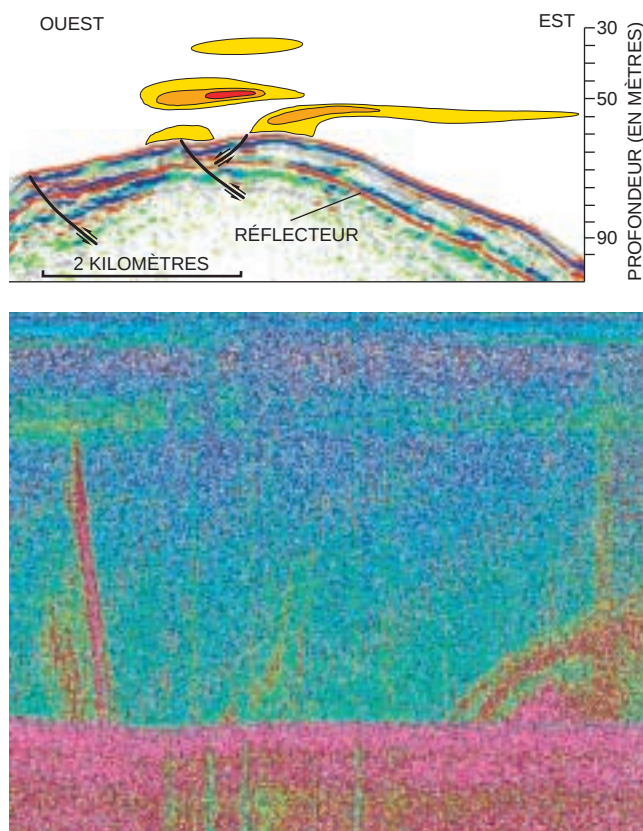
La zone de subduction Cascadia est l'une des régions où les géologues étudient les marges continentales actives : la subduction provoque des séismes, un volcanisme actif et la formation de chaînes de montagnes. L'étude des hydrates de gaz a éclairé la compréhension des rides d'accrétion, au point que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