

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