

LES HYDRATES DE MÉTHANE : RÉSERVE ÉNORME D'ÉNERGIE ET DANGER CLIMATIQUE POTENTIEL

Albert PISSART

Résumé

Des quantités énormes d'hydrates de méthane sont accumulées dans le pergélisol et sous les fonds sous-marins. Il y aurait sous cette forme autant d'énergie accumulée que celle qui existe dans l'ensemble de toutes les sources d'énergie fossile à savoir les gisements de charbon, de pétrole et de gaz. Le méthane provient de la décomposition en profondeur des matières organiques comprises dans les sédiments. Le méthane dégagé migre doucement vers la surface et, en présence d'eau et à des températures et pressions convenables, il est piégé sous forme d'hydrates de méthane, soit sous une forme solide qui reste stable tant que la température et la pression ne varient pas. Depuis des dizaines de millions d'années, des hydrates s'accumulent ainsi dans le sous-sol des régions à pergélisol et, à toutes les latitudes, sur les marges continentales des océans.

Cette source d'énergie sera exploitée industriellement au cours de la présente décennie. Les compagnies pétrolières et certains états investissent, en effet, des sommes très importantes pour exploiter ce méthane, ce qui est possible en diminuant la pression ou en réchauffant le sol. Le Japon sera sans doute le premier état à exploiter de tels gisements à proximité de ses côtes.

Par ailleurs, le méthane de l'atmosphère est un gaz avec un puissant effet de serre. Il a un potentiel de réchauffement 21x supérieur au CO² sur une période de 100 ans. Il intervient actuellement pour 17% dans l'effet de serre. Des réchauffements climatiques extrêmement importants comme celui qui s'est produit à la limite Paléocène/Eocène sont attribués actuellement à un accroissement très considérable du méthane de l'atmosphère à la suite du dégazage des hydrates. Des risques de voir se produire un tel dégazage des hydrates à la suite du réchauffement climatique actuel doivent être considérés. Un dégagement de méthane pourrait se produire à la suite du dégel du pergélisol avant le dégazage des hydrates qui se trouvent à plus de 100 m de profondeur. Ce risque est difficile à apprécier car on connaît très mal la répartition du méthane dans le pergélisol. Le dégazage des hydrates de la zone du pergélisol pourrait se produire plus tard. Par ailleurs, une modification des courants océaniques à la suite du réchauffement actuel pourrait provoquer le dégazage des hydrates sous-marins. Les risques paraissent réels mais ne sont sans doute pas menaçants à court terme.

Mots-clés

Hydrate, méthane, énergie, réchauffement climatique

Abstract

Large quantities of methane hydrates have accumulated in permafrost and beneath the ocean floor. This energy reserve is probably greater than the total which exists on earth in coal, hydrocarbons and gas. Methane is formed by decomposition of organic material contained within sediment. Liberated methane migrates slowly towards the surface and, in the presence of water and at suitable temperature and pressure, is trapped in the form of methane hydrate. This is a solid form that remains stable if temperature and pressure do not vary. For many millions of years, hydrates have accumulated beneath the ground in areas of continuous permafrost and, elsewhere, on the oceanic margins of continents.

This source of energy will be commercially exploited in the next decade. Already, oil companies and certain countries have invested large amounts of money investigating methods to exploit methane, usually by either warming the ground or lowering the pressure. Without doubt, Japan will be the first to develop the methane deposits that occur close to its coast.

Atmospheric methane is also a powerful greenhouse gas. It has a heating potential 21 x greater than that of CO² over a 100 year period. It currently constitutes 17% of the greenhouse effect. The important climatic warming that occurred during the Palaeocene-Eocene is attributed to an increase in atmospheric methane following outgassing of hydrates. The hazards associated with future outgassing are considerable. For example, methane will be released following upon the thaw of permafrost. Then, outgassing of hydrates will occur as thaw reaches to more than 100 m in depth. This hazard is difficult to evaluate because the distribution of methane within permafrost is poorly understood. On the other hand, changes in the global thermohaline circulation of the ocean, consequent upon global warming, may also promote outgassing of submarine hydrates. The methane hazard is real but, in the short term, not menacing.

Keywords

Hydrate, methane, energy, global change

I. NATURE DES HYDRATES DE MÉTHANE

Les hydrates de méthane sont constitués de molécules de méthane entourées par un réseau de molécules d'eau disposées en cage d'où le nom de clathrate, du latin *clatrus*, encapsulé, aussi donné aux hydrates (figure 1). Des hydrates peuvent se former avec différents gaz, mais nous considérerons ci-dessous uniquement les hydrates de méthane. Ces hydrates ont l'apparence et la consistance de la glace. Ils se forment quand du méthane est en présence d'eau si la température est basse et la pression élevée. La quantité de méthane emprisonnée est considérable puisque un volume d'hydrate peut contenir jusqu'à 160 fois son volume de méthane (volume de gaz à 0°C et à une pression de 160 mm de Hg). À la température ordinaire, la cage de molécules d'eau se dissocie, l'eau s'écoule et le méthane est libéré (figure 2).

II. HISTORIQUE

Les hydrates de méthane ont été découverts dans les années 1930. Des gazoducs transportant du méthane dans l'arctique s'obturaient par la formation de ces hydrates. Pour que cela ne se produise plus, le méthane transporté dans les gazoducs des régions froides est maintenant asséché et en l'absence de H₂O des hydrates ne peuvent apparaître.

Mais nous considérerons uniquement ici les hydrates de méthane naturels, c'est-à-dire qui existent naturellement dans le sous-sol. Donc, ils n'ont pas été fabriqués en laboratoire et ne sont pas apparus dans des processus industriels comme dans les gazoducs.

C'est autour de 1969 que l'apparition d'hydrates de gaz

dans des conditions naturelles a été découverte en URSS (Vassil'ev *et al.*, 1970). Les scientifiques russes (Max, 2003) ont postulé alors que les conditions de température et de pression favorable à l'apparition de gaz hydrates existaient dans les régions polaires ainsi que dans les sédiments marins. Il est maintenant démontré que les hydrates de méthane existent seulement à la bordure des continents, le plus souvent sur les marges du plateau continental.

En 1970, dans l'ouest de la Sibérie, des tests dans le champ de gaz de Messoyakha ont montré que des hydrates de gaz étaient présents en injectant du méthanol (antigel) dans la zone d'hydrates et en observant alors une augmentation considérable dans la production de gaz. Par ailleurs, si diverses observations permettaient de penser que des hydrates étaient présents dans le delta du Mackenzie, ce n'est qu'en 1999 pendant les forages de Mallik que des échantillons d'hydrates ont été remontés.

Dans les océans, les premiers échantillons ont été obtenus par forage en 1974 dans la mer Noire et en 1982 au large des Côtes du Mexique et du Guatemala. Mais ce n'est qu'en 1983 après que des hydrates aient été extraits du fond de l'océan à l'est de la Caroline (Blake Ridge), qu'il a été admis que les « bottom simulating reflectors » (dont nous reparlerons plus loin) observés dans les études sismiques, indiquaient la présence d'hydrates.

Les publications sur les hydrates étaient rarissimes avant 1983, moins de 50 par an avant 1990 et dépassaient 250 par an en 2000. Actuellement une recherche Google « methane-hydrate » donne 183 000 réponses. L'intérêt pour le sujet a pris une importance considérable pour deux raisons que nous expliquerons : les hydrates de

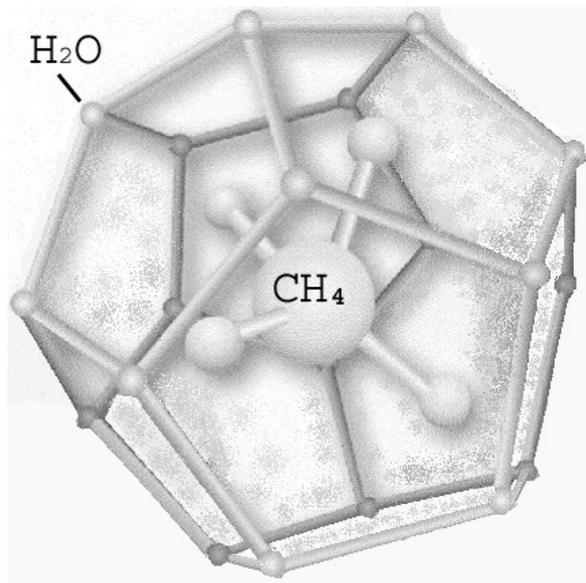


Figure 1. Structure des hydrates de méthane. Les molécules de méthane (CH₄) sont enfermées dans des cages formées par une structure de molécules d'eau (H₂O), sans que aucun lien chimique n'existe entre les molécules des deux corps.



Figure 2. Les hydrates de méthane sont appelés familièrement la glace qui brûle. Sur cette photo, un bloc de méthane à la température ordinaire et à la pression atmosphérique se décompose en libérant le méthane et l'eau qui apparaît sur les mains tenant l'hydrate. Le méthane est, sur cette photo, en feu.

méthane sont une source d'énergie potentielle considérable et le dégazage des hydrates de méthane pourraient entraîner un réchauffement climatique absolument catastrophique.

III. LOCALISATION DES GISEMENTS

La figure 3 localise les endroits où des hydrates ont été reconnus. Sur les continents, ils ne sont présents que sous un pergélisol. Sous les fonds marins, les hydrates sont localisés à la bordure des continents et le plus souvent sur la pente continentale. Les nombreux sites figurés sur la carte suggèrent à tort qu'il est aisé de découvrir des hydrates. Les Japonais affirment qu'en forant au hasard dans l'océan, les chances de trouver un gisement d'hydrates sont moindres que celles de gagner un gros lot à la loterie. Heureusement, la prospection sismique permet sans entreprendre des forages de reconnaître des zones où des hydrates ont la plus grande chance d'être présents.

IV. ORIGINE DES HYDRATES

Le méthane des hydrates a pour origine le plus souvent la décomposition des matières organiques accumulées dans les sédiments (il existe quelquefois, mais rarement, du méthane d'origine profonde, thermogénique qui résulte de la décomposition par la chaleur du kérogène ou du pétrole). Le méthane libéré en profondeur se déplace lentement dans les sédiments vers la surface sous

forme de gaz libre ou dissous dans un liquide contenant des concentrations proches de la saturation en méthane. Quand le méthane arrive dans une zone où la température et la pression sont adéquates, et pour autant que de l'eau existe, il apparaît des hydrates. La migration est comparable à celle qui se produit pour des hydrocarbures conventionnels et conduit à des concentrations d'hydrates dans des structures géologiques favorables telles que des dômes (Majorowicz & Hannigan, 2000 ; Hyndman & Dallimore, 2001). Comme le carbone sédimentaire est seulement abondant à proximité des continents, c'est uniquement en bordure de ceux-ci que des hydrates sont accumulés sous la mer.

V. STABILITÉ DES HYDRATES

A. Dans l'Arctique

Pour comprendre la localisation des hydrates, il faut considérer les conditions de stabilité de ces matériaux, conditions qui sont déterminées par la température et la pression. La figure 4 montre ces conditions pour les régions polaires. La courbe en trait gras représente la limite de stabilité des hydrates en profondeur pour les températures indiquées et pour les diverses profondeurs. Si on considère la situation où la température moyenne annuelle est en surface de -10°C (zone du pergélisol continu), la courbe normale des températures en profondeur est dessinée. La température s'accroît dans cette direction avec le gradient géothermique. En noir,

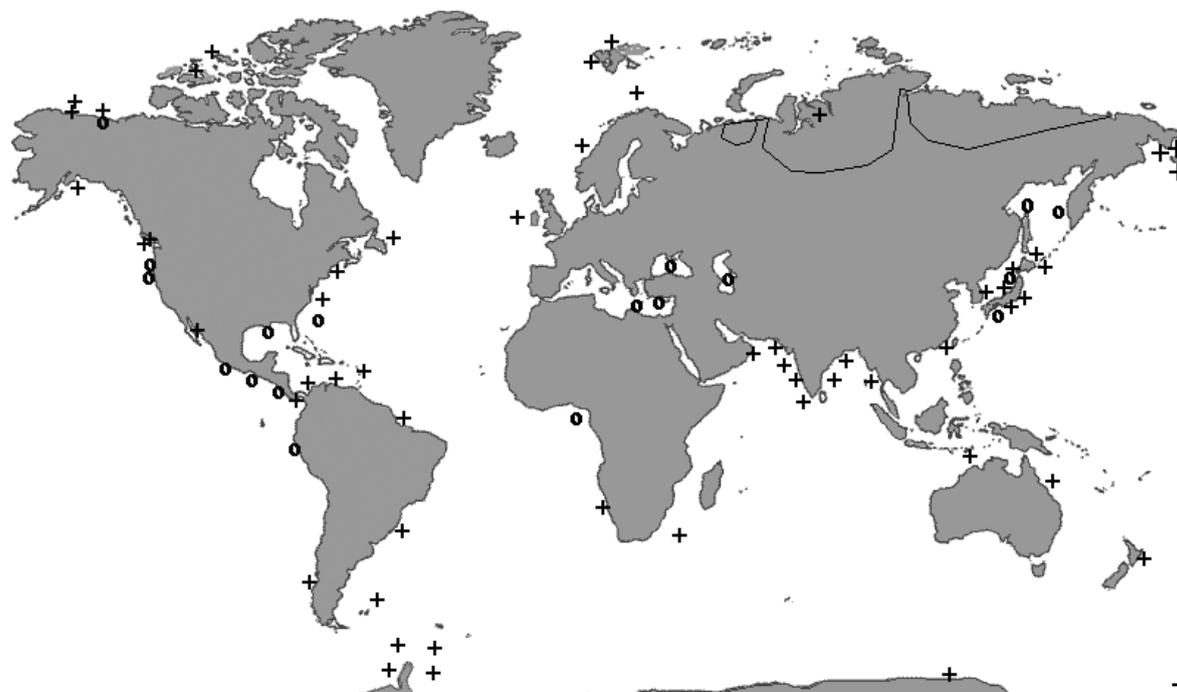


Figure 3. Carte donnant la localisation des endroits où des hydrates de méthane ont été reconnus dans le monde. Les sigles o indiquent les endroits où des échantillons d'hydrates ont été extraits par des sondages, tandis que les sigles + indiquent les endroits où la présence d'hydrates est déduite à partir de prospections sismiques et d'observations indirectes dans les forages. Le trait noir en Sibérie limite les zones où il peut y avoir des hydrates dans et sous le pergélisol (d'après K. A. Kvenvolden et T.D. Lorenson, 2000, et Kvenvolden, 2003).

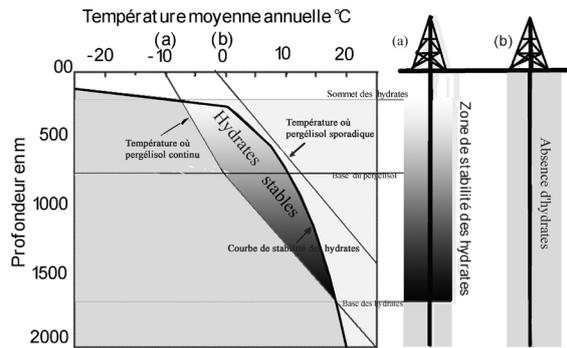


Figure 4. Zone de stabilité des hydrates de méthane dans les régions où existe un pergélisol. La courbe de stabilité des hydrates contrôlée par la température et la pression, est dessinée par un trait gras. En (a) sur la figure, la température moyenne annuelle en surface est de -10°C , ce qui correspond à la zone de pergélisol continu. La température partant de ce point augmente en profondeur avec le gradient géothermique. En cet endroit, les hydrates sont stables à partir d'une profondeur de l'ordre de 200 m. Ils sont présents non seulement dans le pergélisol mais aussi loin en dessous de la base de celui-ci. A droite est figuré ce qui sera trouvé dans un sondage. La gradation de teinte utilisée dans la zone de stabilité indique que la quantité d'hydrates est plus importante en profondeur et spécialement à la base de la zone de stabilité des hydrates. En (b), la température moyenne annuelle est de l'ordre de -2°C ce qui correspond à la limite de la zone du pergélisol. La courbe de température qui part de ce point vers la profondeur résulte du gradient géothermique. Cette droite ne recoupant pas la courbe de stabilité des hydrates, il n'y a pas d'hydrates en profondeur. Sur les continents, les hydrates ne peuvent exister que dans les régions où existe un pergélisol. (D'après Hyndman et Dallimore, 2001, fig.3 modifiée).

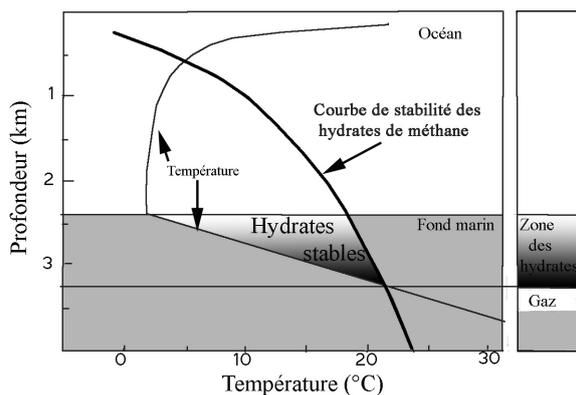


Figure 5. Zone de stabilité des hydrates de méthane, sous les fonds marins.

La présence d'hydrates est contrôlée par la température et la pression. La figure présente à titre d'exemple la situation en un endroit où le fond marin est à 2.4 km de profondeur avec une température à $+2^{\circ}\text{C}$. A droite, apparaissent les observations que l'on peut réaliser dans des sondages : la quantité d'hydrates est plus importante dans la partie inférieure de la zone de stabilité immédiatement au-dessus du réflecteur sismique BSR; une nappe de gaz peut exister immédiatement en dessous. (D'après Hyndman et Dallimore, 2001, fig 4 modifiée).

progressivement plus foncé en profondeur apparaît la zone où des hydrates de méthane peuvent exister. Cette zone comprend l'épaisseur du pergélisol à partir d'une profondeur de plus de 100 m (environ 150 m, d'après Kvenvolden, 2003), mais aussi une zone sous le pergélisol. L'épaisseur totale des sédiments où les hydrates de méthane sont stables atteint sur cette figure 4 plus de 1 600 m.

Si la température moyenne à la surface est un peu inférieure à 0°C , la même figure 4 montre que la courbe de température du sol ne recoupe pas la courbe de stabilité des hydrates et donc que la formation d'hydrates est impossible. En bref, sur les continents, des hydrates de méthane ne peuvent exister que dans les zones où s'étend un pergélisol.

B. Sous les océans

Sous les océans, les conditions de stabilité des hydrates de méthane sont indiquées sur la figure 5. La pression est déterminée par la colonne d'eau ; la température dépend de la température des eaux du fond de l'océan et du degré géothermique. Comme la température au fond des océans est basse, sur la figure 5 de l'ordre de 2°C , la zone de stabilité des hydrates de méthane s'étend depuis le fond de l'océan à 2 500 m de profondeur jusqu'à 3 300 m sous la surface de l'océan, soit sur une épaisseur de près de 800 m. Le dessin indique en outre que les hydrates sont beaucoup plus abondants à la partie inférieure de cette zone. Ces hydrates qui saturent les sédiments, les imperméabilisent et ne permettent pas au méthane de migrer plus loin vers la surface. Il en résulte que du méthane gazeux s'accumule souvent sous la zone de stabilité des hydrates.

Cette limite entre zone où les hydrates sont abondants et la zone où le méthane gazeux s'accumule est décelée par la prospection sismique et a été dénommée « bottom-simulating reflector » (BSR) et en français « réflecteur de simulation du fond » (RSF). Comme nous l'avons dit plus haut, c'est seulement en 1983 qu'il a été admis ce que ce signal parallèle à la surface du fond de l'océan correspondait (figure 6) la limite de la zone de stabilité des hydrates lorsque ceux-ci existent en grande quantité. Les ondes sismiques se propagent en effet rapidement là où les sédiments sont cimentés par les hydrates et beaucoup plus lentement dans les zones directement inférieures où se trouve une nappe de gaz libre. La prospection sismique est ainsi une méthode très utile pour localiser des endroits où se trouvent des hydrates.

La courbe de stabilité des hydrates est différente suivant la composition des gaz qu'ils contiennent. Ainsi Lerche & Noeth (2003) soulignent que 10% d'éthane dans la composition des gaz rend les hydrates stables à 6°C et une pression de 6 atmosphères (60 m de colonne d'eau) alors que, à la même température, les hydrates contenant uniquement du méthane ne sont stables que jusqu'à des pressions d'environ 40 atmosphères (400 m de colonne

d'eau). Les mêmes auteurs indiquent que dans le bassin méridional de la Mer Caspienne, 7 échantillons de gaz étudiés avaient un contenu en méthane de 59 à 87% et un contenu en éthane de 10 à 19%. Enfin, la granulométrie des sédiments qui contiennent les hydrates influence aussi la courbe de stabilité de ceux-ci (Lerche, 2002). Ces multiples influences expliquent qu'il est impossible de donner une limite précise de pression (profondeur) et de température à partir de laquelle des hydrates peuvent être conservés.

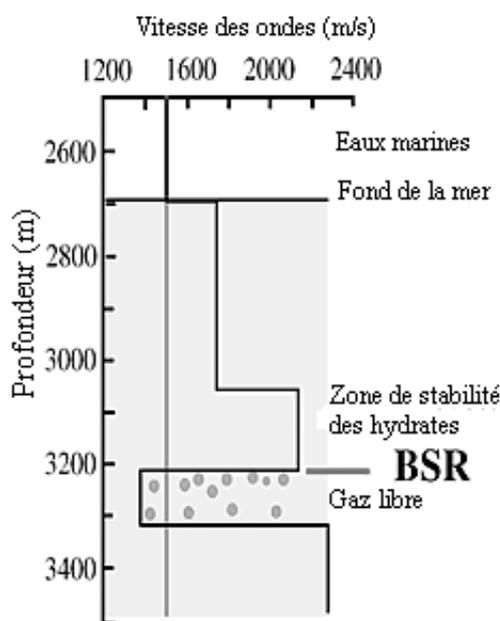
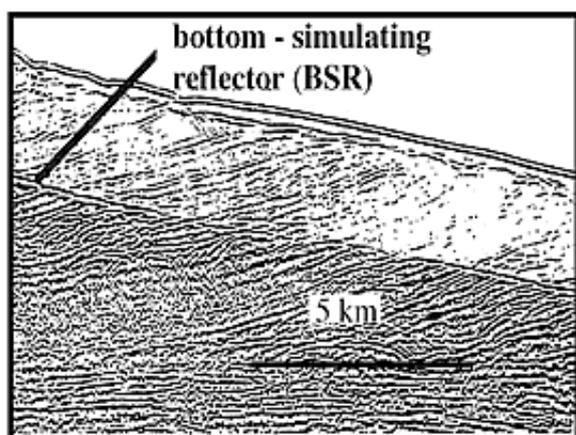


Figure 6. Le réflecteur sismique BSR indique la présence d'hydrates de gaz dans les fonds marins comme le montre l'enregistrement des « Blake Ridges » présenté dans la figure du dessus. Les réflexions faibles au-dessus de la limite BSR correspondent à des contenus variés d'hydrates de gaz dans les pores. En dessous, les fortes réflexions sont dues aux gaz libres dans les pores. La figure inférieure est un modèle des vitesses sismiques montrant le grand contraste des vitesses dans la zone BSR (figure reproduite d'un site internet IFM-GEOMAR intitulé «gas hydrates and methane cycle »).

VI. ESTIMATION DES VOLUMES

La quantité d'hydrates de méthane accumulés dans et sous le pergélisol ainsi que sous les fonds des mers est extrêmement importante. Il y aurait 5 000 Gt (1 Gt = 10⁹ t) accumulés dans les réserves connues de charbon, de pétrole, et de gaz naturel et 10 000 Gt de carbone dans les hydrates. Bien que toujours reproduite dans les publications, cette estimation de Kvenvolden (1988) a été contestée et considérablement réduite dans une publication récente qui estime que la quantité de carbone des hydrates est comprise entre 500 et 2 500 Gt (Milkov, 2004). Buffet & Archer (2004) pour leur part, estiment que sous les océans, 3 000 Gt de carbone existent dans les hydrates et 2 000 Gt sous forme de gaz. Il est clair qu'aujourd'hui n'existent que des estimations des quantités totales qui existent, mais il ne fait pas de doute que la quantité de méthane accumulée dans les hydrates est extrêmement importante.

VII. L'EXPLOITATION PROCHAINE DES HYDRATES, MÉTHODES ET PRÉVISIONS

L'utilisation du méthane comme combustible est intéressante car, par rapport au charbon et au pétrole, il produit moins de CO². D'autre part, le gaz brûle proprement et entraîne peu de problèmes de pollution (Bill, 2003). Des sommes très considérables sont investies par des compagnies privées et aussi des états pour étudier les

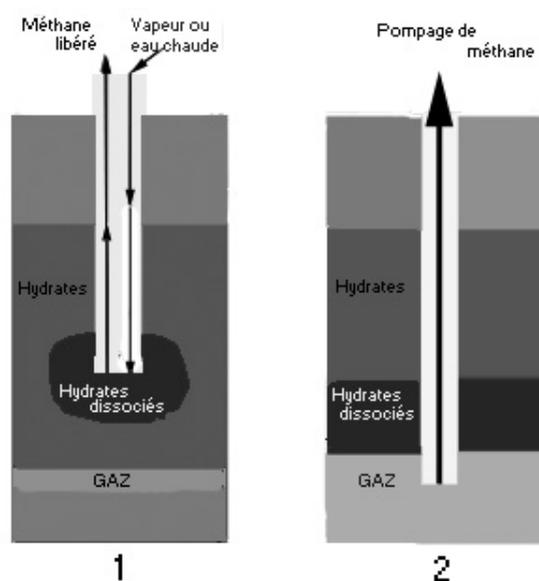


Figure 7. Deux méthodes d'exploitation du méthane contenu dans les hydrates ont été testées dans les sondages de Mallik sur la côte nord du Canada près de la frontière de l'Alaska. 1. A gauche, injection de vapeur ou d'eau chaude dans la zone où les hydrates sont abondants. 2. A droite, pompage du gaz emprisonné sous les hydrates. Par dépressurisation, des hydrates situés au-dessus seront dissociés. Comme cette dissociation demande de la chaleur, la quantité de gaz qui peut être libérée dépend du gradient géothermique.

possibilités d'exploitation du méthane contenu dans les hydrates. Le Japon par exemple qui ne possède pas de réserve d'énergie sur son territoire, espère trouver dans les hydrates connus à proximité de ses côtes les ressources qui lui manquent. Les recherches sont avancées au point que l'exploitation commerciale commencera entre 5 et 10 ans. Et l'intérêt pour les hydrates n'arrête pas d'augmenter (Chatti *et al.*, 2005). Des essais d'exploitation des hydrates du pergélisol ont été réalisés en 2002 à Mallik sur la côte nord du Canada près de la frontière avec l'Alaska. Ils ont montré les possibilités d'exploiter le méthane des hydrates par deux méthodes (figure 7), la première consiste à envoyer de la vapeur ou de l'eau chaude dans la zone où se trouve les hydrates pour provoquer leur dissociation en élevant la température, la seconde consiste à pomper le méthane gazeux qui existe sous la zone des hydrates, pour diminuer la pression et provoquer ainsi la libération du méthane. (La vitesse de dissociation du méthane par cette seconde méthode est limitée par le gradient géothermique car la dissociation des hydrates est endothermique comme la fusion de la glace ordinaire). Beaucoup pensent toutefois que cette dernière méthode sera la plus économique. Les essais de Mallik ont été subsidiés par sept partenaires principaux qui appartiennent à des pays qui s'intéressent beaucoup à cette source d'énergie (the Japan National Oil Corporation (JNOC), the GeoForschungsZentrum Potsdam, Germany (GFZ), the Geological Survey of Canada (GSC), the United States Geological Survey (USGS), the United States Department of the Energy (USDOE), the India Ministry of Petroleum and the Natural Gas (MOPNG) and the Chevron-BP- Burlington joint venture group).

À la suite de ces essais de Mallik, les points de vue ont évolué considérablement et Art Johnson (Hydrate Energy International) à la 4^e Conférence internationale sur les hydrates, (9 à 11 mai 2005 à Victoria, BC Canada), a opposé les vues anciennes aux perspectives qui se présentent actuellement (<http://web.uvic.ca/ceor/hydrates/2005pres.html>). Alors qu'il y a peu, on admettait encore que l'exploitation du méthane des hydrates serait trop coûteuse au point que cette énergie ne pourrait entrer en compétition avec d'autres ressources et qu'il n'y aurait pas d'exploitation commerciale avant 20 ou 30 ans, on admet maintenant que l'exploitation commerciale débutera dans 5 à 10 ans à un prix certes élevé mais pas prohibitif. Les japonais qui seront probablement les premiers à exploiter le méthane sous la mer ont publié dès juillet 2001 leur programme de recherche qui a pour but de faire du Japon le premier exploitant mondial de cette ressource énergétique. Le programme du « MH21 Research Consortium for Methane Hydrate Resources in Japan » mentionne : le projet est prévu pour favoriser le développement technique pour le forage, et la production du méthane des hydrates et pour faciliter son utilisation et sa contribution à l'approvisionnement en énergie du pays à long terme (on estime que les hydrates peuvent fournir

le gaz nécessaire au Japon pendant un siècle). Plus récemment le même consortium indique, toujours sur internet, les problèmes posés par les sondages à réaliser pour atteindre le méthane dans les eaux côtières japonaises. Ceux-ci concernent :

- 1) les difficultés de forage à plus de 1 000 m sous la mer avec les problèmes de stabilité en position de grandes plates-formes ;
- 2) les problèmes liés au Kouro-Shivo, courant marin (5 à 9 km/heure) qui s'écoule dans la zone qui sera exploitée ;
- 3) les difficultés d'éviter la dissociation des hydrates lors des forages ;
- 4) les problèmes liés à la stabilité des sédiments où se trouvent les hydrates, sédiments qui pourraient se déplacer en de grands glissements sous-marins à la suite du dégazage des hydrates sur le talus continental (voir plus loin).

VIII. LES RISQUES DE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUES

A. Les dégazages des hydrates de méthane connus dans le passé

Les géologues admettent actuellement que des réchauffements climatiques catastrophiques se sont produits plusieurs fois dans le passé à la suite de dégazage des hydrates. Les modifications climatiques que ces dégazages ont produites ont été si importantes que de nombreuses espèces ont alors disparu. L'évènement le plus récent est survenu à la limite Paléocène/Eocène, il y a 55.5 millions d'années. Les isotopes du carbone de carbonates marins et du carbone organique terrestre montrent en effet à cette époque une abondance anormale de ^{12}C par rapport au ^{13}C . Cette excursion négative du $\delta^{13}\text{C}$ dont l'importance est de plus de 2.5‰ ne peut être expliquée que par la libération de grandes quantités de carbone organique qui se trouvait dans des hydrates (Dickens, 2003). Le changement climatique a été global et rapide (1 000 à 10 000 ans pour apparaître) mais a mis 200 000 ans pour se résorber. Il est corrélé avec une grande extinction de foraminifères benthiques et une diversification extraordinaire des mammifères terrestres.

Des excursions semblables de $\delta^{13}\text{C}$ observées au même moment en des endroits de la terre éloignés les uns des autres sont connues au Phanérozoïque (Dickens, 2003). À la limite Permien/Trias (252 Ma), au Jurassique (vers 183 MA et vers 157 Ma) et à l'Aptien (120 Ma). Une hypothèse explicative de la cause du phénomène a été avancée pour l'Aptien (début Crétacé) et pour le Paléocène. Jähren *et al.* (2005) défendent en effet l'idée qu'à l'Aptien, c'est un soulèvement tectonique vertical de 4 km de la bordure de la plaque Farallon (plaque tectonique océanique qui est en grande partie disparue sous l'extrémité ouest de la plaque de l'Amérique du Nord) qui s'est produit après que la subduction ait brutalement cessé. Ils estiment que 1 137 Gt de carbone auraient alors été

relâchés sous forme de méthane. Au Paléocène, Svensen (2004) pense que le réchauffement pourrait avoir été causé par l'intrusion de volumineuses masses en fusion provenant du manteau et ayant provoqué une dissociation catastrophique des hydrates. Ainsi s'expliquerait la présence de milliers de dépressions témoignant de sorties de gaz dans les bassins Voring et More de la mer de Norvège. Des processus volcaniques et métamorphiques semblables pourraient aussi expliquer les réchauffements qui se sont produits il y a 252 MA (en relation avec les traps sibériens) et il y a 183 MA (en relation avec la province Karoo en Afrique du Sud).

Des dégagements se sont aussi produits pendant le Quaternaire mais leur importance n'a pas été comparable aux événements géologiques anciens que nous venons d'évoquer. Certains auteurs (Nisbet, 2002) ont voulu attribuer les déglaciations au relâchement du méthane, mais les analyses de la composition ancienne de l'atmosphère à partir des bulles de gaz contenus dans les calottes glaciaires ne confirment pas cette hypothèse. Des analyses des isotopes de foraminifères benthiques et planctoniques (Prokopenko & Williams, 2004 ; de Gabriel-Thoron *et al.*, 2004 ; Hinrichs *et al.*, 2003) ont établi que du méthane relâché des profondeurs de l'océan n'a pas été dissous dans les eaux océaniques en remontant vers la surface, mais a été dégagé dans l'atmosphère et cela, bien que la concentration de méthane dans les eaux océaniques soit considérablement plus faible que sa solubilité (Rehder *et al.*, 2004). Des structures reconnues par la sismique comme celles montrées par Sloan (2003) révèlent aussi par la disparition locale du réflecteur BSR dont nous avons parlé précédemment, le dégagement de méthane. Enfin signalons que des pustules et de petits volcans de boue au fond de l'océan révèlent l'existence de relâchements de méthane non seulement au cours du Quaternaire mais aussi de nos jours (Hill *et al.*, 2004 ; Hovland *et al.* 2005 ; Whelan J. *et al.*, 2005). Les progrès des méthodes sismiques ont permis par ailleurs de voir que des cheminées existaient au travers de la zone de stabilité du méthane (Pecher, 2002 ; Wood, 2002) qui permettent à du méthane de s'échapper vers la surface à partir des nappes de gaz qui existent souvent sous les hydrates. Ces cheminées restent ouvertes peut-être à la suite de la circulation de liquides chauds venus des profondeurs (Wood, 2002) ou par l'apparition d'une salinité très élevée en leur sein (Liu & Flemings, 2006). Par ailleurs, un article paru dans Nature (Adam, 2002) a abordé la question de savoir si la disparition énigmatique de bateaux pourrait être due au dégagement brutal de quantités importantes de méthane sous des navires, dégagement qui en remplaçant l'eau de la mer par un mélange eau-méthane, aurait diminué la densité de l'eau et entraîné leur engloutissement soudain.

Si des traces diverses du dégagement de méthane dans les océans ont été trouvées, l'importance de ces dégagements au cours du dernier million d'années est toujours

discutée. Au départ, les augmentations de méthane observées dans les études des glaces du Groenland et de l'Antarctique ont été attribuées à l'extension des marais dans les régions tropicales (Brook *et al.*, 1999). Par la suite, il est apparu que beaucoup du méthane a été relâché aux latitudes élevées de l'hémisphère Nord et l'hypothèse que la déstabilisation des hydrates a contrôlé les variations atmosphériques de méthane a été proposée (Kennett *et al.*, 2003). Plus récemment, Maslin *et al.* (2004) ont examiné si les datations des dégagements d'hydrates au cours des 45 000 dernières années pouvaient correspondre aux moments de déclenchement de grands glissements de terrain sous-marins connus. Nous verrons en effet un peu plus loin que la dissociation des hydrates a provoqué de grands glissements de terrain sous-marins qui ont libéré des volumes importants de méthane. Les résultats de cette étude montrent que pendant les périodes de Bolling-Allerod, deux grands glissements de terrain se sont produits dans le delta de l'Amazone qui auraient pu chacun libérer 5 à 20 Gt de méthane. Au Préboréal, sept glissements de terrain sont répertoriés dans l'Atlantique Nord dont l'énorme glissement Storegga au large de la Norvège. Des études du budget des isotopes de carbone suggèrent que au moins 30% de l'augmentation de méthane atmosphérique pendant la déglaciation, pourrait être attribué au méthane venant des hydrates (Maslin et Thomas, 2003).

En ce qui concerne les événements de Dansgaard-Oeschger qui ont été des changements brutaux dans la circulation marine pendant la dernière glaciation, il n'apparaît aucune concordance avec de grands glissements sous aquatiques. Mais comme l'écrivent Maslin *et al.* (2004), cela n'exclut pas une influence possible de la température des eaux intermédiaires dans le dégagement de méthane à partir des hydrates.

B. Les dangers de dégazage des hydrates de méthane à la suite du réchauffement climatique actuel

En considérant les risques de dégagement du méthane à partir des hydrates, nous examinerons séparément les risques liés aux hydrates accumulés dans et sous le pergélisol et les risques liés aux hydrates reposant sous les fonds océaniques.

En ce qui concerne les hydrates se trouvant dans et sous le pergélisol, il faut rappeler que la courbe de stabilité des hydrates de méthane ne contenant que du méthane que nous avons présentée sur la figure 4 indique que des hydrates ne peuvent exister qu'à une profondeur de l'ordre de 200 m lorsque la température moyenne annuelle est de -10°C , et à la profondeur de 130 m environ lorsque la température est de -20°C .

Étant donné que le réchauffement se transmet très lentement en profondeur, c'est seulement dans plusieurs siècles que du méthane pourrait être libéré à la suite de la dissociation des hydrates qui se trouvent normalement

à plus de 100 mètres de profondeur. Cette conclusion doit être toutefois nuancée : si les hydrates contiennent 10% d'éthane, la courbe de stabilité des hydrates est décalée et permet l'existence d'hydrates à moins grande profondeur (Lerche et Noeth, 2003) ce qui peut raccourcir de beaucoup le temps nécessaire pour que le réchauffement atteignent cette zone. Par ailleurs, il faut ajouter que la distribution des hydrates et du méthane dans le pergélisol est toujours très mal connue. La partie supérieure du pergélisol très riche en glace est en effet imperméable et peut stocker en son sein des quantités de gaz libre considérables qui pourraient s'être échappées par des fractures au travers de la zone de stabilité des hydrates. Peu de renseignements existent sur ces nappes de gaz car il est de pratique courante dans les sondages de forer aussi vite que possible au travers du pergélisol sans réaliser la moindre étude. Le dégagement de gaz pendant les forages est par ailleurs empêché par l'usage de boues de sondages très denses. Yakushev & Chuvilin (2000) qui insistent sur cette ignorance, rapportent que dans le champ de gaz de Bovanenko (pergélisol épais de 300 m), où 30 forages ont été exécutés en surveillant les dégagements, plus de 50 venues de gaz ont été enregistrés dans le pergélisol avec des débits variant de 50 à 14 000 m³ par jour. La majorité des zones d'où provenaient les gaz se trouvaient à des profondeurs variant entre 50 et 120 m c'est-à-dire au dessus de la zone de stabilité des hydrates de méthane. D'autres exemples de dégagements de gaz en dehors de la zone de stabilité des hydrates sont donnés par les mêmes auteurs dans des placers d'or de la Kolyma, dans des régions de Chukotka où le pergélisol est épais de 150 à 350 m, ainsi que dans la région de l'Amour où des venues de gaz sont apparues à des profondeurs de 20 à 300 m. Indépendamment du méthane provenant des hydrates, la fonte du pergélisol superficiel libérera donc du méthane non seulement à partir du développement de lacs thermokarstiques (Walter *et al.*, 2004 ; Christensen *et al.*, 2004) mais aussi à partir de nappes de méthane libres qui existent dans le pergélisol superficiel. Yakushev & Chuvilin (2000) sont à notre connaissance les seuls à avoir tenté une estimation de la quantité de gaz qui existerait à une profondeur de 60 à 120 m sous la surface. Ils arrivent sur la base des observations faites dans une région de 20 km² du champ de gaz Bovanenko à une valeur de 100×10^9 m³, quantité qui pourrait selon eux augmenter la température des régions polaires nordiques de 1 à 1.5°C. Les observations à partir desquelles cette estimation a été réalisée sont toutefois très limitées et celle-ci doit être considérée avec circonspection.

Sous la mer, les risques sont différents car des hydrates se trouvent directement sous le fond de l'océan. La *pression* peut décroître à la suite d'une diminution du niveau marin. Il est de ce fait possible que des dégagements d'hydrates aient eu lieu lors des maxima glaciaires au moment où le niveau de la mer était descendu d'une centaine de mètres. Un risque d'abaissement du niveau

marin n'existe pas dans notre futur proche puisque le réchauffement sera à l'origine d'une hausse du niveau marin par la fusion des glaciers. Les relèvements isostatiques des fonds marins postérieurs à la fusion des anciennes calottes glaciaires peuvent, par contre, avoir été à l'origine de dégagements de méthane.

En ce qui concerne la *température*, vu la masse océanique, le réchauffement des eaux marines dans leur ensemble ne peut être que très lent et il n'existe qu'un risque très lointain que cela se produise. Par contre, il y a lieu de redouter des changements de la circulation océanique semblables à ceux qui se sont produits plus de 20 fois au cours de la dernière glaciation. Ces modifications peuvent rapidement changer la circulation des eaux marines et amener localement au contact des fonds marins des eaux plus chaudes. Le risque est difficile à estimer puisque depuis 10 000 ans, début du présent interglaciaire, cela ne s'est plus reproduit. Toutefois, les modèles ont montré que la disparition de la dérive Nord Atlantique pourrait être une conséquence du réchauffement climatique et un article récent (Bryden *et al.*, 2005) a même indiqué récemment qu'un ralentissement dans la circulation de l'Atlantique Nord était en cours. Par ailleurs, notre ignorance est toujours très grande quant au méthane qui migre depuis les nappes de gaz sous-jacentes au travers de la zone de stabilité des hydrates et qui pourrait être libéré rapidement si la température du fond de la mer était modifiée (Hornbach *et al.*, 2004). Comme le montre la figure 8, le réchauffement des eaux marines provoquera, si le fond de l'océan est en pente, le dégagement dans l'océan du méthane dans une zone réduite située directement dans la partie la moins profonde de la zone de stabilité des hydrates. Plus bas, c'est en profondeur que les hydrates seront dissociés. L'apparition de ces gaz dans les sédiments et la disparition des hydrates qui cimentent les sédiments peuvent compromettre gravement la stabilité de l'abrupt continental et provoquer des glissements de terrain. Des glissements

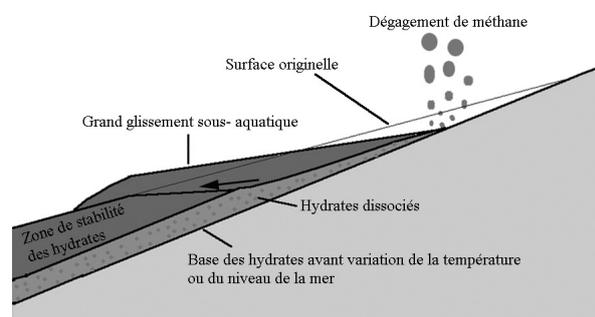


Figure 8. Le réchauffement du fond marin et/ou l'abaissement du niveau marin entraînent la dissociation des hydrates à la partie inférieure de leur zone de stabilité. Cela engendre un dégagement local de méthane à la limite supérieure de la zone de stabilité et peut provoquer des glissements de terrain sous-marins en raison de la disparition des hydrates qui cimentent les formations et de l'apparition de gaz dans les sédiments inférieurs qui provoquent leur liquéfaction.

de terrain gigantesques ont été attribués à cette cause et notamment celui de Storegga à proximité de la Norvège (Bünz *et al.*, 2002). Ce glissement de terrain a déplacé au total 2 400 à 3 200 km³ de sédiments et a affecté une surface de 95 000 km² (Haflidason *et al.*, 2005). Il se serait produit à différents moments mais le principal événement serait survenu entre 7 250 +/- 250 ¹⁴C ans BP et 8 100 +/- 250 ans ¹⁴C BP. Ce grand glissement de terrain a provoqué un tsunami dont des traces ont été observées sur les côtes de Norvège (Solheim *et al.*, 2004).

CONCLUSION

Le risque de dégagement du méthane accumulé dans les hydrates est sans aucun doute le risque climatique le plus grave pour l'humanité comme l'ont indiqué plusieurs auteurs (Nisbet, 2002; Kennett *et al.*, 2003).

Le risque ne paraît pas immédiat, sauf en cas de changement de la circulation océanique. Ce changement de la circulation des eaux, prévu par les modèles, était attendu pour beaucoup plus tard de telle sorte que les observations de Bryden *et al.* (2005) montrant que le débit du Gulf Stream a diminué considérablement, ont surpris beaucoup de spécialistes. Ces observations devraient cependant être confirmées avant d'annoncer un danger proche. Il n'empêche, un risque réel existe mais probablement à long ou à très long terme. Toutefois, notre ignorance quant à la distribution des hydrates et du méthane reste grande et des surprises sont toujours possibles !

BIBLIOGRAPHIE

- ADAM D., 2002. Methane hydrates : fire from ice. *Nature* 418 : 913-914 (29 August 2002).
- BILL J. K., 2003. Economic perspective of methane from hydrate. (p. 349-360) In : *Natural gaz hydrate in Oceanic and permafrost Environment*. Max M. D. (ed), Kluwer Academic Publishers, 415 p.
- BROOK E.J., SEVERINGHAUS J., HARDER S. & BENDER M., 1999. Atmospheric methane and millennial scale climate change. In Clark P.U. *et al.* (eds). *Mechanisms of global climate change at millennial time scales*. American geophysical Union, Geophysical Monograph, 112 : 165-175.
- BRYDEN H.L., LONGWORTH H.R. & CUNNINGHAM S.A., 2005. Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25° N. *Nature*, 438 : 655-657 (1 December 2005).
- BÜNZ S., MIENERT J. & BERNDT C., 2002. Geological controls on the Storegga gas-hydrate system of the mid-Norwegian continental margin. *Earth and Planetary Science Letters*, 209, (3-4) : 291-307.
- BUFFET B. & ARCHER D., 2004. Global inventory of methane clathrate : sensitivity to changes in the deep ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 227 (3-4) : 185-199.
- CHATTI I., DELAHAYE A., FOURNAISON L. & PETIT J.-P., 2005. Benefits and drawbacks of clathrate hydrates : a review of their areas of interest. *Energy Conversion and Management*, 46 (9-10) : 1333-1343.
- CHRISTENSEN T.R., JOHANSSON T., ÅKERMAN J., MASTEPANOV M., MALMER N., FRIBORG T., CRILL P. & SVENSSON B.H., 2004. Thawing sub-arctic permafrost: Effects on vegetation and methane emissions, *Geophysical Research Letters*, 31 (4) : LO4501.
- DE GABRIEL-THORON T., BEAUFORT L., BASSINOT F. & HENRY P., 2004. Evidence for large methane releases to the atmosphere from deep-sea gas-hydrate dissociation during the last glacial episode. *PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA)*, June 22, 101 (25) : 9187-9192.
- HAFLIDASON H., LIEN R., SEJRUP H.P., FORSBERG C.F. & BRYN P., 2005. The dating and morphometry of the Storegga slide. *Marine and petroleum Geology*, 22 (1-2) : 123-136.
- HILL T.M., KENNET J. P., & SPERO H.J., 2004. High-resolution records of methane hydrate dissociation: ODP Site 893, Santa Barbara Basin, *Earth and Planetary Science Letters*, 223 (1-2) : 127-140.
- HINRICHS, K.U., HMELO L.R. & SYLVA S.P., 2003. Molecular fossil record of elevated methane levels in Late Pleistocene coastal waters. *Science*, 299 : 1214-1217.
- HORNBACH M.J., SAFFER D.M. & HOLBROOK W.S., 2004. Critically pressured free-gas reservoirs below gas-hydrate provinces. *Nature*, 427 : 142-144 (8 January 2004).
- HOVLAND M., SVENSEN H., FORSBERG C.F., JOHANSEN H., FICHLER C., FOSSA J.H., JONSSON R. & RUESLATTEN H., 2005. Complex pockmarks with carbonate-ridges off mid-Norway : products of sediment degassing. *Marine Geology*, 218 (1-4) : 191-206.
- HYNDMAN R.D. & DALLIMORE S.R., 2001. Natural gas hydrate studies in Canada. *Canadian Society of Exploration Geophysicists*, GSEG Recorder , May 2001, 26 : 11-20.
- JAHREN A. H., CONRAD X.C.P., ARENS N.C., MORA G. & LITHGOW-BERTELLONI C., 2005. A plate tectonic mechanism for methane hydrate release along subduction zones. *Earth and Planetary Science Letters*, August 2005, 236 (3-4), 691-704.
- KENNETT J., CANNARIATO K.J., HENDY I.L. & BEHL R.J., 2003. *Methane hydrates in Quaternary climate change : the clathrate gun hypothesis*. American Geophysical Union, Washington D. C., 216 p.
- KVENVOLDEN K.A., 1988. Methane hydrate. A major reservoir of carbon in the shallow geosphere ? *Chemical Geology*, 71 : 41-51.
- KVENVOLDEN K.A., 2003. Natural gaz hydrate : background and history of discovery. Chapter 2 (p.9-16) In : *Natural gaz hydrate in Oceanic and permafrost Environment*. Max M. D. (ed.) Kluwer Academic

- Publishers, 415 p.
- KVENVOLDEN K.A. & LORENSEN T.D., 2000. *A global inventory of natural gas hydrate occurrence*. U.S.G.S. Science for a changing world. Internet.
- LERCHE I. & NOETH S., 2003. Hydrate composition from seismic data. An inverse procedure. *The oil and gas review*, 2, 101-103.
- LERCHE I., 2002. Gas Hydrates : A short summary of some modern concerns. *Canadian Society of Exploration Geophysicists, CSEG Recorder*, October 2002, 27 : 8-12.
- LIU X. & FLEMINGS P.B. 2006. Passing gas through the hydrate stability zone at southern Hydrate Ridge, offshore Oregon. *Earth and Planetary Science Letters*, 15 January 2006, 241 (1-2) : 211-226.
- MAJOROWICZ J.A. & HANNIGAN P.K., 2000. Stability zone of natural gas hydrates in a permafrost-bearing region of the Beaufort-Mackenzie Basin : study of a feasible Energy Source 1. *Natural resources research*, 9 (1) : 3-26.
- MASLIN M., OWEN M., DAY S. & LONG D., 2004. Linking continental-slope failures and climate change : testing the clathrate gun hypothesis. *Geology*, 32 (1) : 53-56 (January 2004).
- MASLIN M.A. & THOMAS E., 2003. Balancing the deglacial global carbon budget : the hydrate factor. *Quaternary Science Reviews*, 22 : 1729-1736.
- MAX M.D. (édit), 2003. *Natural gas hydrate in oceanic and permafrost environments*. Kluwer Academic Publishers, 415 p.
- MILKOVA V., 2004. Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments : how much is really out there. *Earth-Science Reviews*, 66 (3-4) : 183-197.
- NISBET E.G., 2002. Have sudden large releases of methane from geological reservoirs occurred since the Last Glacial Maximum and could such releases occur again. *Phil. Trans.R. Soc. London*, A, 360 : 581-607.
- PECHER I.A., 2002. Oceanography : Gas hydrates on the brink. *Nature*, 420 : 622-623 (12 December 2002).
- PROKOPENKO A.A., & WILLIAMS D.F., 2004. Deglacial methane emission signals in the carbon isotopic record of Lake Baikal. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 218 (1-2) : 135-147.
- REHDER G., KIRKBY S.H., DURHAM W. B., STERN L.A., PELTZER E.T., PINKSTOM J. & BREWER P.G., 2004. Dissolution rates of pure methane hydrate and carbon dioxide hydrate in unsaturated seawater at 1000 m depth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68 (2) : 285-292.
- SLOAN E.D. JR., 2003. Fundamental principles and applications of natural gas hydrates. *Nature*, 426 : 353-363 (20 November 2003).
- SOLHEIM A., BRYN P., SEJRUP H.P., MIENERT J. & BERG K., 2005. **Ormen Lange: an integrated study for the safe development of a deep-water gas field within the Storegga Slide Complex, NE Atlantic continental margin ; executive summary**. *Marine and petroleum geology*, 22, (1-2) : 1-9.
- SOUCHEZ R., 2004. Les variations rapides du climat enregistrées dans les glaces. *Bulletin de la Classe des sciences de l'Académie royale de Belgique*, 15 (1-6) : 23-31.
- SVENSEN H., PLANKE S., SORENSEN A.M., JAMTVEIT B., MYKLEBUST R., EIDEN, T.R. & REY S.S., 2004. **Release of methane from a volcanic basin as a mechanism for initial Eocene global warming**. *Nature*, 429 : 542-545 (3 June 2004).
- VASIL'EV V.G., MAKOGON, YU F., TREBIN F.A., TROFIMUK A.A. & CHERSKIY, N.V., 1970. The property of natural gases to occur in the earth crust in a solid state and to form gas hydrates deposits. *Otkrytiya v SSSR 1968-1969*, 15-17.
- WALTER K., CHAPIN T., ZIMOV S., DRALUK D. & CHANTON J., 2004. Global warming feedbacks of methane bubbling along expanding North Siberian lake margins. *American water Resource Association, Alaska section Conference*, Fairbanks , 6-8 April 2004 (internet).
- WHELAN J., EGLINTON L., CATHLES III L., LOSH S. & ROBERTS H., 2005. Surface and subsurface manifestations of gas movement through a N-S transect of the Gulf of Mexico, *Marine and Petroleum Geology*, 22 (4) : 479-497.
- WOOD W.T., GETTRUST J.F., CHAPMAN N.R., SPENCE G.D. & HYNDMAN R.D., 2002. Decreased stability of methane hydrates in marine sediments owing to phase-boundary roughness. *Nature*, 420 : 656-660 (12 December 2002).
- YAKUSHEV V.S. & CHUVILIN E.M. 2000. Natural gas and gas hydrates accumulations within permafrost in Russia. *Cold Regions Science and Technology*, 31 (3) : 189-197.

Adresse de l'auteur :

Albert PISSART
 Université de Liège
 Rue Lavaux, 29
 B-4130 Esneux,
 a.pissart@ulg.ac.be