

OS HIDRATOS DE METANO: FONTE ENERGÉTICA DO FUTURO OU FONTE DE RISCO AMBIENTAL?*

DENISE DE BRUM FERREIRA¹

Resumo – Os hidratos de metano constituem uma fonte interessante de energia cujas reservas oceânicas recenseadas em 2001 foram estimadas em duas vezes as reservas conhecidas de gás natural, petróleo e carvão reunidas. Encontram-se nos sedimentos marinhos das margens continentais, e a fraca profundidade, no *permafrost*. Tendo em conta a necessidade crescente da sociedade em energia e o preço cada vez mais elevado do petróleo, a exploração desta nova fonte de energia é tentadora, mas também arriscada, acarretando problemas ambientais difíceis de resolver. A desestabilização e rejeição na atmosfera do metano imobilizado nos hidratos são vistas como uma ameaça tanto para a estabilidade dos taludes continentais como para o futuro do clima do planeta.

Palavras-chave: Hidratos de metano, recursos energéticos, gases com efeito de estufa, aquecimento global, movimentos de massa, margem continental, *permafrost*.

Abstract – METHANE HYDRATES: ENERGY RESOURCE OR SOURCE OF ENVIRONMENTAL HAZARD? Methane hydrates are a very interesting source of energy. Worldwide estimated resources of methane hydrates in oceans in 2001 are twice the amount of carbon contained in all fossil fuels on Earth. They occur in marine sediments along the continental margins and in polar continental environment, in permafrost. Both the increasing energy needs of the society and the high prices of petroleum challenge the research on gas hydrates recovery and on the possibility of using in the near future this huge resource of energy. The major environmental issues related to the exploitation of gas hydrates are rapid climate warming through emissions of methane from marine sediments and permafrost into the atmosphere and extensive mass failure in the sediments of the continental slopes.

Key words: Methane hydrates, energy resources, greenhouse gas, global warming, landslides, continental margin, permafrost.

* Recebido: 24/07/2007. Aceite: 3/08/2007.

¹ Professora Associada com Agregação da Universidade de Lisboa e Investigadora no Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa. E-mail: dbf@fl.ul.pt

Résumé – HYDRATES DE METHANE: SOURCE POTENTIELLE D'ENERGIE OU SOURCE DE RISQUE AMBIENTAL? Les hydrates de méthane sont une source d'énergie très intéressante. La quantité de carbone contenue dans les réserves mondiales d'hydrates de méthane océaniques a été estimée en 2001 au double de celle qui compose tous les combustibles fossiles de la planète. Ils se logent dans les sédiments marins des plateformes continentales et dans le permafrost des régions polaires continentales. Les besoins croissants en énergie des sociétés humaines et les prix en hausse du pétrole défient la recherche sur les modes d'extraction des hydrates et sur la possibilité de les inclure, dans un futur proche, dans l'assiette énergétique mondiale. Les risques majeurs associés à l'exploitation des hydrates concernent surtout une accélération du réchauffement de la planète due à un échappement incontrôlable vers l'atmosphère du méthane contenu dans les sédiments marins et dans le permafrost, et l'occurrence de collapsés généralisés des sédiments des talus continentaux.

Mots-clés: Hydrates de méthane, ressources énergétiques, gaz à effet de serre, réchauffement global, mouvements de masse, marge continental, permafrost.

I. INTRODUÇÃO

A partir dos anos 1970, o aumento da investigação dos fundos oceânicos permitiu descobrir muitos traços surpreendentes do nosso planeta. São exemplos as fontes hidrotermais quentes dos riftes, a mais de 3 000m de profundidade, acolhendo, num ambiente físico e químico extremamente adverso, uma rica e estranha biomassa que retira a sua energia não da fotossíntese mas da oxidação dos fluidos sulfurosos e amoniacaais (quimiossíntese). É também a descoberta da existência bastante generalizada de veios de hidratos de gases nos taludes continentais que constituem uma colossal fonte potencial de energia. Estima-se, ainda com muitas incertezas, que as reservas oceânicas de hidratos de metano são duas vezes mais importantes (em carbono equivalente) que a totalidade dos jazigos conhecidos de gás natural, petróleo e carvão (Kvenvolden e Lorenson, 2001; Milkov, 2004). O futuro incerto do petróleo como fonte de energia acessível (esgotamento futuro de muitos grandes reservatórios, problemas do Médio Oriente sem solução à vista, tendência ascendente sustentada dos preços) explica que os hidratos de metano são cada vez mais vistos como uma apetecível fonte alternativa de gás natural a explorar. Todavia, constrangimentos geotécnicos e ambientais severos desincentivaram até agora a indústria do gás de avançar na extracção a grande escala do gás metano a partir dos hidratos, sobretudo os do reservatório oceânico. De facto, dois factores negativos estão associados à desestabilização natural ou provocada dos hidratos de metano: a subsidência e o colapso dos sedimentos dos taludes continentais, e o risco de libertação do metano para a atmosfera. É um gás com efeito de estufa vinte vezes mais potente que o dióxido de carbono, capaz de iniciar um processo que poderia levar a produzir um aumento brutal do aquecimento climático em curso. Como o volume de metano contido nos hidratos do reservatório oceânico seria 3 000 vezes superior ao volume contido actualmente na atmosfera terrestre (Kvenvolden, 1999; Dickens, 2003), os hidratos de metano oceânicos, ainda não considerados nos modelos de evolução do efeito de estufa, não constituiriam uma bomba-relógio para o clima futuro do Planeta? (Haq, 1998; Kvenvolden, 1993 e 1999).

II. OS HIDRATOS DE METANO: UMA RESERVA ENERGÉTICA ALTERNATIVA?

Os hidratos de metano são sólidos que, à vista, parecem um gelo sujo mas que têm a estranha particularidade de incendiar-se quando entram em contacto com o ar na proximidade de uma chama. Esses hidratos são formados de água gelada que aprisiona nos vazios da sua estrutura cristalina moléculas de gás, essencialmente de metano. Os cristais de gelo podem armazenar uma grande quantidade de gás. Um metro cúbico de hidratos saturados em gás pode libertar com a fusão do gelo, em condições atmosféricas normais, até 164m^3 de metano (Kvenvolden, 1993).

Muitas lendas canadianas que referenciavam icebergues em fogo ou ainda relatos de pescadores no golfo do Alasca que, nas redes, encontravam com o peixe blocos de gelo efervescentes à maneira de comprimidos gigantes de *Alka Seltzer* terão a sua explicação na presença, à superfície do oceano, de hidratos de metano em decomposição (Lubick, 2002). Do mesmo modo, suspeita-se que a má fama do Triângulo das Bermudas, sítio de naufrágios repetidos e de desaparecimentos enigmáticos de navios, se possa explicar pela libertação brutal do metano dos abundantes hidratos que existem nos sedimentos dos fundos submarinos, desestabilizados, por exemplo, no momento dos abalos sísmicos (Gruy, 1998). É também bem conhecido do sector da exploração petrolífera o risco de explosão e de afundamento das plataformas *off-shore* quando as perfurações no fundo oceânico encontram sedimentos ricos em hidratos de metano.

A produção de hidratos é controlada pela acção conjunta de diferentes factores como a temperatura, a pressão, a porosidade dos sedimentos, a salinidade da água do oceano... (Kvenvolden, 1993). Formam-se unicamente em determinadas condições de temperatura e de pressão que são necessárias para assegurar a sua estrutura sólida. Estas condições particulares encontram-se em duas situações bem definidas nos dois primeiros milhares de metros de profundidade: 1) nos sedimentos do *permafrost* das latitudes polares e nas plataformas continentais do Ártico pouco profundas mas onde a temperatura é muita baixa; 2) nos sedimentos submarinos dos taludes continentais até centenas de metros abaixo do fundo oceânico em sítios onde a pressão é suficientemente elevada e a temperatura baixa, o que acontece em média entre os 300 e 500m de profundidade ($> 50\text{bars}$), quando a temperatura desce abaixo de 6°C (Haq, 1998). A base dos hidratos, identificada através da reflexão sísmica por uma descontinuidade, marca o limite inferior da zona da sua estabilidade estrutural, que assegura a sua fase sólida, e encontra-se geralmente a 100-200m de profundidade. Abaixo desta profundidade, o metano é gasoso porque, apesar de uma forte pressão, o fluxo de calor geotérmico impede a formação dos hidratos. Fora da chamada zona de estabilidade relativamente estreita, os hidratos de metano não têm condições para existir. Como os hidratos são menos densos que a água, estes sobem em direcção à superfície, borbulhando e libertando o metano. Todavia a maior parte deste é oxidada em CO_2 na água, onde fica dissolvido.

O metano tem duas origens possíveis. A mais frequente é a decomposição bacteriana em condições anaeróbias da matéria orgânica dos sedimentos. O metano pode resultar também da decomposição térmica da matéria orgânica nos sedimentos situados a grande profundidade ($> 1\ 000\text{m}$). A margem continental é um lugar privilegiado para a acumulação dos hidratos de metano porque são os lugares de deposição e decomposição de grandes quantidades de matéria orgânica. Os hidratos ocorrem em nódulos, em camadas finas, cristais reticulados difusos, às vezes em veios espessos mas rara-

mente contínuos, cimentando os sedimentos da plataforma e do talude continental das margens activas ou passivas. As superfícies de progradação, os prismas de acreção sedimentar, as espessas acumulações prodeltaicas e de depósitos em *glacis* são meios sedimentares porosos ricos em biomassa em decomposição e em bactérias propícias à formação de hidratos.

Em terra, os hidratos de gás existem no *permafrost* em toda a região Ártica. Sabemos ainda muito pouco sobre o que acontece no Antártico. Os maiores reservatórios de gás da Sibéria ocidental (Messoiakha) estão localizados em ambiente de *permafrost*; outros já foram inventariados no vale do Yukon (Alasca) e no delta do Makenzie (Canada) (Collett, 2001; Paull e Dillon, 2001).

Não é fácil estimar a importância de um reservatório de hidratos de metano tão difuso no oceano. A avaliação da quantidade global de carbono oscilou de 1 000 a 20 000 gigatoneladas (Gt) nos últimos 25 anos, com um valor modal mais citado actualmente de cerca de 10 000Gt (Dickens, 2004). Basta lembrar que a atmosfera contém cerca de 700Gt de carbono para ver que mesmo um valor baixo da estimativa da quantidade de hidratos faz do gás metano imobilizado no oceano um importante componente do ciclo global do carbono. O *permafrost* no cômputo geral, pela área relativamente pequena que ocupa à superfície do Globo (< 20%; Archer, 2007), tem uma importância residual ao lado do gigantesco reservatório oceânico.

O *US Geological Survey* publicou um mapa da repartição mundial dos hidratos a partir dos estudos dos anos 1990 (Kvenvolden e Lorenson, 2001). Figuram no mapa vinte sítios onde foram encontrados hidratos de metano e outros 79 para os quais a presença de hidratos é considerada provável segundo os resultados dos estudos geológicos, geofísicos e geoquímicos. Reflecte sobretudo o adiantamento da investigação americana neste domínio considerado estratégico para os EUA (*Hydrate Research and Development Act, 105th Congress*, 1998). Grandes volumes de hidratos foram encontrados no Alasca (no *permafrost* e *off-shore*) em toda a margem continental dos estados de Washington, Oregon e da Califórnia. No Atlântico, foram identificados em grande quantidade em toda a margem continental sudeste dos EUA e aflorando nos sedimentos do fundo do Golfo do México. Apesar de recente, o mapa já está desactualizado. Os programas de sondagens mecânicas e investigações geofísicas multiplicam-se em todo o mundo. Hidratos foram identificados na plataforma continental do Oceano Ártico prolongando os jazigos do *permafrost* da Sibéria ocidental, na plataforma continental da Península Antártica, ao largo das ilhas Shetland do Sul, no Mar da China, na margem continental da Península Indiana e no Golfo de Bengala, nos deltas submarinos do Níger e do Congo (Paull e Dillon, 2001). Programas internacionais de prospecção mecânica (IODP: <http://www.oceandrilling.org>) e investigações geofísicas em curso financiadas pela Comunidade Europeia identificaram sítios prováveis de presença dos hidratos no Mar Negro, no Mediterrâneo oriental, no Golfo de Cádiz, nas superfícies de progradação sedimentar do Guadalquivir (<http://tierra.rediris.es/TASYO/homepage.htm>). Avançam também pesquisas de índole tecnológica para a recuperação em segurança do gás dos hidratos (Projecto *Hydratech*: <http://www.hydratech.bham.ac.uk>).

Deste recurso colossal presente em todos os oceanos, só será de esperar a recuperação de uma pequena parte. Numerosos estudos desde os anos 1990 discutem o potencial dos hidratos como fonte energética explorável e economicamente rentável (Kvenvolden, 1999; Collett, 2001). Para outros, a extracção do gás dos hidratos oceânicos não passaria de um sonho longínquo ou mesmo impossível (Laherrere, 2006). Os hidratos encontram-se extremamente dispersos nos sedimentos em veios difusos deci-

métricos ou, na melhor das hipóteses, métricos. A concentração em metano gelado ocupa muitas vezes menos de 5% do volume dos sedimentos sobre uma espessura de várias centenas de metros. Só com um volume superior a 20%, seriam susceptíveis de exploração (Milkov, 2004). Estas características tornam muito dispendiosa a descoberta de sítios de exploração potencial (mesmo com a ajuda da detecção remota). As condições técnicas de extracção e de transporte do gás, de controlo difícil, são muito pouco competitivas. Mas existe já uma panóplia de técnicas propostas que estão a ser testadas *in situ* ou no laboratório. Em certos sítios de maior concentração dos hidratos, projectos internacionais multimilionários, financiados pela indústria do petróleo, multiplicam as campanhas de reconhecimento dos jazigos e os ensaios de extracção (*DOE Gulf of Mexico Joint Industry Project; MH21 Research Consortium for Methane Hydrate Resources in Japan; Mallick-Mackenzie Delta no Mar de Beaufort no Canadá...*). Algumas investigações mais concludentes permitem pensar num aproveitamento pontual dos hidratos nos próximos anos sobretudo nas regiões polares. Os métodos menos dispendiosos de extracção do gás metano dos hidratos parecem ser a depressurização e a injeção de água quente para provocar a dissociação.

No sítio de Messoyakha (Sibéria), onde existe um reservatório de gás livre sob acumulações de centenas de metros de hidratos em veios no *permafrost* a 700m de profundidade, ou ainda no jazigo de Urengoy (Golfo do Obs) que abastece a Europa em gás natural desde 1984, a depressurização é obtida naturalmente. Nestes sítios polares de *permafrost*, é possível utilizar os meios convencionais de extracção por furo. A extracção do gás livre sob espessas camadas de hidratos provoca uma queda de pressão no reservatório. A base da zona de hidratos subjacente torna-se então instável e fornece gás e água líquida, recarregando assim progressivamente em metano o reservatório em exploração. O que retarda o momento crítico da falta de pressão a partir da qual a extracção do gás se tornará impossível.

O mesmo dispositivo estrutural foi identificado na margem continental do Oceano Árctico russo. Apronta-se a ser explorado em condições climáticas extremamente adversas e a partir de plataformas *off-shore*, um gigantesco reservatório de gás de metano no Mar de Barents descoberto em 1988, em parte constituído por gás livre ($3,2$ a $3,7 \times 10^{13} \text{m}^3$), em parte por hidratos ($31 \times 10^6 \text{m}^3$). É o reservatório submarino de Shtokman situado a 500km de Murmansk e 350m de profundidade. As reservas exploráveis de gás seriam duas vezes maiores que as conhecidas no Canadá ou ainda das reservas da Noruega e do Iraque reunidas; reservas que seriam suficientes para abastecer a Europa em energia durante sete anos. O início da distribuição do gás, por *pipe-line* em grande parte submarino no Mar de Barents e através do Mar Báltico até à Alemanha, estaria prevista (segundo a *Gazprom*) para 2013. Para muitos é uma previsão excessivamente optimista visto que as condições técnicas de construção das plataformas *off-shore* num ambiente climático tão adverso e de parte do gasoduto submarino não estão ainda resolvidas.

O Japão e a China, extremamente carentes em energia, têm projectos para explorar o gás dos hidratos dos taludes continentais das suas ZEE. No talude continental do Mar de China meridional acabam de ser descobertas após dez anos de pesquisa veios de hidratos entre 15 e 35m de potência com alta concentração em metano destinados a serem explorados num futuro próximo. O Japão pensa passar à fase de exploração dos seus jazigos de hidratos de metano do prisma de acreção sedimentar de Nankai, junto à ilha de Kyushu até 2012.

A corrida à exploração dos hidratos começou e forçou a revisão jurídica da ZEE para além das 200 milhas marítimas. Gerou também reivindicações do Canadá ainda

não aceites sobre as centenas de ilhas do mar de Beaufort contíguas aos seus territórios setentrionais, cada vez mais acessíveis com a alteração do clima em curso. As hesitações são ainda muitas na exploração visto que a desestabilização dos taludes continentais, explosões por brusca desgasificação dos hidratos nos sítios de extracção e a libertação de fluxos de metano na atmosfera são riscos a esperar. Além disso, o aquecimento actual do clima levantou a hipótese da possibilidade de desestabilização dos hidratos dos fundos oceânicos com consequência catastrófica sobre a aceleração do efeito de estufa.

III. OS HIDRATOS DE METANO E O AQUECIMENTO CLIMÁTICO

O interesse científico renovado pelos hidratos de metano é seguramente o seu possível papel nas mudanças de clima. A ligação existente entre os hidratos de metano e o clima é bastante evidente. Condições particulares de pressão e de temperatura são necessárias para estabilizar os hidratos, o que implica que qualquer mudança ambiental no oceano tem repercussões importantes na zona de estabilidade dos hidratos. No caso de um aquecimento do oceano e/ou de uma mudança de pressão hidrostática (aumento ou diminuição do nível do oceano), os hidratos podem desestabilizar e entrar em dissociação, libertando o gás metano anteriormente aprisionado no gelo.

Uma dissociação dos hidratos é fisicamente possível com o aquecimento climático em curso. Como se disse, um metro cúbico de hidratos saturados em metano produz cerca de 164m^3 de gás à pressão atmosférica normal. Avaliou-se em cerca de $3,6\text{Gt}$ a quantidade global de metano contida actualmente na atmosfera. Bastaria a introdução na atmosfera de uma pequena parte do reservatório de hidratos existente no globo (essencialmente oceânico) avaliado em $10\,000\text{Gt}$ de metano para duplicar o *input* antrópico de carbono verificado no último século (Dickens, 2004). O metano é, como foi referido, um potente gás com efeito de estufa, vinte vezes mais potente que o dióxido de carbono. Não é portanto de admirar que, desde há alguns anos, seja recorrentemente emitida a hipótese alarmante da aceleração do efeito de estufa por desgasificação dos hidratos imobilizados nos taludes continentais e do risco de aquecimento incontrolado do clima.

O aquecimento actual do clima tem como consequência um aumento da temperatura do oceano nas camadas superiores, e por via da circulação termohalina o calor é transportado progressivamente em profundidade onde se encontram os hidratos. Um hidrato de metano que se encontra a 600m de profundidade nos sedimentos do talude continental é estável com uma temperatura de $5\text{-}6^\circ\text{C}$. Bastaria um aumento da temperatura da água de menos de um grau para provocar a sua dissociação (Dickens, 2004).

O aquecimento de 3°C nos últimos quarenta anos nas regiões polares põe em causa pela primeira vez desde o fim da última glaciação a estabilidade do *permafrost* e o metano nele sequestrado. Na Sibéria ocidental, trata-se de uma superfície em acelerada evolução de mais de um milhão de quilómetros quadrados (superfície equivalente à da França e da Alemanha reunidas) onde existiria, em turfeiras, um quarto de todo o metano terrestre do globo (Pearce, 2005).

O debate acerca do papel do metano imobilizado nos dois reservatórios sobre a aceleração do aquecimento no século XXI está aberto. Estudos paleoclimáticos encaram a possibilidade da libertação de metano ter acontecido no passado com implicações importantes para as mudanças do clima da Terra.

A história do clima durante as últimas glaciações do Quaternário, essencialmente reconstituída a partir da análise da razão isotópica $\delta^{16}\text{O}/\delta^{18}\text{O}$ do ar contido no gelo do *inlandsis* da Gronelândia revelou saltos térmicos importantes e abruptos do clima que ocorreram em poucas dezenas de anos. São os episódios de Dansgaard-Oeschger que começam com um aquecimento abrupto (avaliado em 5 a 10°C na Gronelândia) durante algumas décadas, seguido de um arrefecimento gradual durante várias centenas de anos, e que acabam por uma queda acentuada e também brutal da temperatura (Dansgaard *et al.*, 1993). Estas mudanças abruptas do clima sucederam-se várias vezes ao longo da última glaciação e no início do Holocénico (Adams *et al.*, 1999; Rahmstorf, 2002). Os episódios mais estudados de arrefecimento brutal foram os últimos, o do Dryas Recente, que ocorreu há cerca de 12 000 anos BP, e o de 8 200 BP, já em período de aquecimento pós-glaciário.

Várias hipóteses foram avançadas para explicar esta instabilidade térmica. As mais convincentes fazem intervir a sensibilidade do sistema oceano-atmosfera-criosfera a uma perturbação interna. Uma das causas possíveis amplamente citada para explicar o abrupto arrefecimento do clima foi a perturbação da circulação termohalina do Atlântico. O seu arbrandamento, ou mesmo a sua paragem, sublinhada pelo aquecimento das massas de água intermédias e profundas do oceano durante as fases de fusão do gelo marinho (Clark *et al.*, 2002), teria como consequência uma alteração das circulações oceânica e atmosférica levando a um arrefecimento abrupto do clima, sobretudo na Europa e na América do Norte (Broecker *et al.*, 1990).

O aquecimento repentino posterior e que inicia cada novo ciclo de Dansgaard-Oeschger no Quaternário encontra-se ainda mal explicado. Alguns investigadores admitem a hipótese do aquecimento brusco ser uma resposta a um período de instabilidade dos hidratos de metano no oceano. Segundo um cenário proposto por Paull *et al.* (1991), a descida acentuada do nível do oceano, avaliada em 120m abaixo do actual no Máximo Glaciário, implicando uma redução da pressão hidrostática da água junto aos taludes continentais, teria levado a uma dissociação dos hidratos na base da zona de estabilidade. Como a descida do nível do oceano é um acontecimento planetário, uma quantidade maciça de metano teria sido libertada para a atmosfera, sobretudo nas baixas latitudes, visto que o oceano polar tinha temperaturas muito baixas impedindo a dissociação dos hidratos mais setentrionais. Uma vez iniciada a recessão do gelo, bastaria um pequeno aumento de temperatura nas altas latitudes para aumentar ainda mais a quantidade de metano rejeitada na atmosfera e assim reforçar o efeito de estufa conducente a um aquecimento. A contribuição continental de libertação de metano poderia então entrar em jogo com a fusão do *permafrost* e a rejeição de metano, amplificando brutalmente o aquecimento. É esta cadeia de retroacções positivas que Paull *et al.* (1991) evocam para explicar a terminação abrupta dos episódios frios do Dryas recente e do evento de 8 200 BP. A ideia foi retomada, ampliada a outros episódios, e generalizada por Kennett *et al.* (2003) na hipótese da “espingarda a hidratos” (*Clathrate Gun Hypothesis*) num livro publicado pela *American Geophysical Union*. Os hidratos formar-se-iam nos períodos glaciários e a desgasificação ocorreria nos interglaciários. O estudo detalhado do talude continental californiano confirmaria a hipótese avançada. A hipótese foi evocada por Kennett *et al.* (2003) para explicar não só os repentinos aquecimentos do clima na instalação de episódios Dansgaard-Oeschger, e no Holocénico em período de deglaciação, mas de outros mais antigos na história da Terra.

Numerosos estudos paleoclimáticos utilizando a análise isotópica dos foraminíferos carbonatados ($\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ e razão Mg/Ca) dos sedimentos encontraram a prova

da rejeição de grandes quantidades de metano oriundos dos hidratos oceânicos em vários momentos do passado geológico da Terra. A cada vez que o nível do oceano baixou, ou que a temperatura da água do oceano intermédio e profundo aumentou, suspeita-se que houve desgasificação maciça dos hidratos. Na passagem do Paleocénico para o Eocénico, há 55 milhões de anos, a Terra era 6 a 10°C mais quente que actualmente e o teor em CO₂ da atmosfera oscilou entre duas e dez vezes mais em relação ao valor pré-industrial (Bice *et al.*, 2006). A temperatura média da superfície oceânica elevou-se de 4 a 8°C no intervalo de algumas centenas de anos enquanto o oceano profundo aquecia 5°C (Thomas *et al.*, 2002). Foi identificada uma extinção maciça e brusca de microfósseis marinhos concomitante de um aumento da acidez da água oceânica e levou a seguir quase 100 000 anos a recuperar o valor inicial. Zachos *et al.* (2005) associam esta acidificação a uma emissão de quase 4 500Gt de carbono na atmosfera proveniente, segundo estes autores, de uma libertação maciça de metano dos hidratos oceânicos responsável por um aquecimento catastrófico do clima. Acontecimentos semelhantes foram descritos, na passagem do Pérmico para o Triásico (250Ma). Zachos *et al.* (2001) defendem que os aquecimentos mais bruscos do clima do globo desde o Paleocénico foram associados a uma dissociação maciça dos hidratos de metano do reservatório oceânico.

A hipótese emitida por Kennett *et al.* (2003), e apoiada em parte nestas interpretações paleoclimáticas, recebeu muitas críticas (Dickens, 2003; Archer, 2007). A literatura mostra que este risco de aquecimento brutal devido à libertação maciça de metano dos hidratos assenta numa base muito frágil. Em períodos tão remotos da história da Terra, a forte concentração de metano na atmosfera pode ter muitas outras explicações (vulcanismo muito activo, ajustamento das placas tectónicas...). As temperaturas do oceano profundo na passagem do Paleocénico para o Eocénico eram muito diferentes das actuais: 5 a 6°C mais altas (Trinпати e Elderfield, 2005). A haver dissociação dos hidratos, a questão é a de saber qual é a quantidade de metano oxidada em CO₂ e diluída na água antes de chegar à superfície e a outra que escapa directamente para a atmosfera. Os cenários evocados sobre o papel do metano nas mudanças de clima no passado geológico da Terra seriam portanto considerados especulativos (Dickens, 2003).

Uma ideia subjacente à hipótese da “espingarda a hidratos” de Kennett *et al.* (2003) é que, se a taxa de aquecimento actual se tornar superior à observada nos interglaciares, o risco de desgasificação dos hidratos aumenta exponencialmente e com ele o efeito de estufa e a temperatura do Globo. O oceano não se encontra saturado em metano e a sua oxidação em dióxido de carbono é rápida, o que deixa antever um aprisionamento importante de carbono na água caso os hidratos fossem dissociados. O oceano funcionaria como um sumidouro de carbono e na atmosfera o tempo de vida do metano é limitada (dez anos). As bruscas concentrações de metano na atmosfera provenientes dos hidratos oceânicos e do *permafrost* não são consideradas o cenário mais provável derivado do aquecimento do clima no século XXI (Archer, 2007).

Pelas razões apontadas, mas sem negar a importância do papel do metano do reservatório oceânico dos hidratos na evolução do efeito de estufa no passado, este não teria o efeito calamitoso receado sobre o clima futuro. A pesquisa efectuada na literatura científica mostrou que são raros os estudos que integraram o potencial impacto dos hidratos de metano nos modelos de evolução futura do clima. O de Harvey e Huang (1995) conclui que, mesmo no pior cenário de desestabilização dos hidratos, o impacto do metano libertado sobre o aquecimento futuro é tão pequeno que o sinal seria infe-

rior ao grau de incerteza ligado ao aquecimento provocado pelo uso dos combustíveis fósseis tradicionais. Não é considerado assim um problema imediato na alteração de clima em curso mas segundo Kvenvolden (1999), para respeitar o princípio de precaução, seria mais recomendável não perturbar a estabilidade dos hidratos continuando, como fazemos, ao aumentar o efeito de estufa antrópico e a temperatura do oceano.

IV. OS HIDRATOS DE METANO E A INSTABILIDADE DOS TALUDES CONTINENTAIS

O aparecimento de zonas de instabilidade nos sedimentos dos taludes continentais, inclinados, contendo hidratos, são um risco inevitável associado tanto à sua exploração como às mudanças ambientais da água no caso de um aquecimento do clima, ou ainda aos abalos sísmicos. A conexão das camadas sedimentares ricas em hidratos e os grandes deslizamentos submarinos foi identificada em muitos sítios; alguns têm dimensão suficiente para gerar *megatsunamis*. A ligação é tão estreita que a identificação dos grandes deslizamentos nos taludes constitui um primeiro diagnóstico da presença potencial de hidratos (Kvenvolden, 1999).

Um dos maiores movimentos de massa submarinos conhecido é o de Storegga, que afectou o talude continental da Noruega, o qual contém espessos veios de hidratos. As suas dimensões são gigantescas: volume, 5 600km³; espessura, 450m; comprimento da cicatriz, 290km; distância percorrida pelos sedimentos, 800km. Abalos sísmicos e gaseificação dos hidratos são apontados como as causas mais próximas do colapso do talude continental em três momentos principais, entre 30 000 BP e 50 000 BP para o primeiro e entre 6 000 e 8 000 BP para os dois últimos, em período de deglaciação (Bugge *et al.*, 1987; Brown *et al.*, 2006). O *megatsunami* que o episódio 8 000 BP provocou no Mar da Noruega encontra-se bem documentado, tendo deixado vestígios sedimentológicos de uma onda gigantesca de mais de 20m nas costas das ilhas Shetland e da Escócia (Bondevik *et al.*, 2003). Outros foram encontrados na Gronelândia (Wagner *et al.*, 2006).

Os deslizamentos estudados e citados nos trabalhos de Henriet e Mienert (1998) e de Archer (2007) mostram uma grande dispersão geográfica. O que prova que a fragilização da estabilidade dos sedimentos submarinos pelos hidratos é geral. Os maiores afectam a margem continental da América do Norte ao largo da costa da Carolina, da Califórnia (Bacia de Santa Bárbara), de Oregon, da Colúmbia Britânica, do Alasca e Mar de Beaufort. Outros ainda foram identificados na margem continental oeste da Índia (Hanumantha *et al.*, 2002). Foram realizados estudos detalhados de estabilidade na margem atlântica europeia, sobretudo ao largo da Noruega, no Mediterrâneo e no Mar Negro (Projecto europeu *COSTA*: <http://www.ig.uit.no/costa/main.htm>). Como não está excluído que o aquecimento actual do oceano possa produzir localmente o desmoronamento dos taludes contendo hidratos, estes projectos interessaram-se particularmente pelas margens continentais polares em aquecimento acelerado, ao largo da Noruega, no Mar de Barents e no Mar de Beaufort. O facto dos jazigos de gás serem objecto de exploração nestas margens aumenta o risco de desestabilização, tal como os riscos de acidente nas estruturas de produção *off-shore*. Por enquanto, mais que o efeito do aquecimento do clima no perigo de deslizamento dos taludes, são sobretudo os riscos tecnológicos que constituem um constrangimento adicional severo, ainda não resolvido, associado ao uso dos hidratos como futura fonte energética.

V. CONCLUSÃO

As expectativas são grandes quanto à possibilidade de aproveitar as importantes reservas de hidratos de metano em período de carência energética. A caracterização desse recurso é ainda deficiente e o reservatório oceânico talvez esteja sobreavaliado. Optimista parece ser a estimativa da parte que será possível explorar. As propriedades instáveis dos hidratos, as dificuldades tecnológicas da recuperação do gás e de transporte em segurança acarretam custos enormes que diminuem o potencial dos hidratos como futura fonte de energia da época posterior ao petróleo. Não será nunca uma energia barata.

No que se refere às consequências ambientais, a dissociação dos hidratos oceânicos pode ter tido a sua importância nas mudanças do clima da Terra, mas em condições muito diferentes das actuais. Apesar de constituir um potente gás com efeito de estufa, é admitido que o seu papel na evolução do aquecimento em curso será diminuto. Regionalmente, nas latitudes polares árticas, o desaparecimento do *permafrost* tem um impacto mais imediato sobre o aquecimento do clima. O maior risco provém da desestabilização dos taludes continentais, devido à dissociação local dos hidratos. O aumento de temperatura da água e do nível do oceano potenciam naturalmente a instabilidade dos sedimentos que contêm os hidratos, na altura em que as actividades de exploração *off-shore* se forem multiplicando. A identificação e caracterização dos jazigos, a avaliação das reservas, a inovação nas tecnologias de extracção, as consequências na estabilidade das margens continentais e, ainda, a avaliação do metano nas alterações climáticas são os grandes temas actuais da investigação associada aos hidratos de metano.

BIBLIOGRAFIA

- Adams J, Maslin M, Thomas E (1999) Sudden climate transitions during the Quaternary. *Progress in Physical Geography*, 23: 1-36.
- Archer D (2007) Methane hydrate stability and anthropogenic climate change. *Biogeosciences Discussions*, 4: 993-1057. (<http://www.biogeosciences-discuss.net/4/993/2007/>).
- Bice K L, Birgel D, Meyers P A, Dahl K A, Hinrichs K U, Norris D R (2006) A multiple proxy and model study of Cretaceous upper ocean temperatures and atmospheric CO₂ concentrations. *Paleoceanography*, 21 PA2002. doi:10.1029/2005PA001203.
- Bondevik S, Mangerud J, Dawson S, Dawson A, Lohne O (2003) Record-breaking height for 8 000 years old tsunami in the North Atlantic. *EOS Transactions*, American Geophysical Union, 84: 289-300.
- Broecker W S, Bond G, Klas M, Bonani G, Weaver A J (1990) A salt oscillator in the North Atlantic? The concept. *Paleoceanography*, 5: 469-477.
- Brown H E, Holbrook W S, Hornbach M J, Nealon, J (2006) Slide structure and role of gas hydrate at the northern boundary of the Storrega slide, offshore Norway. *Marine Geology*, 229: 179-186.
- Bugge T, Befring S, Belderson R H, Eidvin T, Jansen E, Kenyon N H, Holtedahl H, Sejrup H P (1987) A giant three-stage submarine slide off Norway. *Geo-Marine Letters*, 7(4): 191-198.
- Clark P U, Pisias N G, Stocker T, Weaver A J (2002) The role of the thermohaline circulation in abrupt climate change. *Nature*, 415: 863-869.

- Collett T (2001) *Natural Hydrates – Vast Resource, Uncertain Future*. US Geological Survey Fact Sheet FS-021-01.
- Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B, Gundestrup N S, Hammer C U, Hvidberg C S, Steffensen J P, Veinbjørndottir A E, Jouzel J, Bond G (1993) Evidence for general instability of the past climate from 250-kyr ice core record. *Nature*, 364: 218-220.
- Dickens G R (2004) Methane hydrate and abrupt climate change. *Geotimes*. http://www.geotimes.org/nov04/feature_climate.html
- Dickens G R (2003) Rethinking the global carbon cycle with a lag dynamic biologically mediated gas hydrate capacitor. *Earth and Planetary Science Letters*, 213 (3): 169-183.
- Dickens G R, Castillo M M, Walker J C (1997) A blast of gas in the latest Paleocene: simulating first order effects of massive dissociation of oceanic methane hydrate. *Geology*, 25: 258-262.
- Gruy H J (1998) Natural gas hydrates and the mystery of the Bermuda Triangle. *Petroleum Engineer International*, 71: 71-79.
- Hanumantha Y R, Subrahmanyam C, Rastogi A, Deka B (2002) Slope failures along the western continental margin of India: a consequence of gas-hydrate dissociation, rapid sedimentation rate and seismic activity. *Geo-Marine Letters*, 22: 162-169.
- Haq B U (1998) Gas hydrates: greenhouse nightmare? Energy panacea or pipe dream? *GAS Today*, Geological Society of America, 8: 1-6.
- Harvey L D, Huang Z (1995) Evaluation of the potential impact of methane clathrate destabilization on future global warming. *Journal of Geophysical Research*, 1000: 2905-2926.
- Henriet J P, Mienert J (1998) *Gas Hydrates. Relevance to World margin stability and climate change*. Geological Society Special Publication, 137, London.
- Kennett J P, Cannariato K G, Hendy I L, Behl R J (2003) *Methane Hydrates in Quaternary Climate Change: The Clathrate Gun Hypothesis*. American Geophysical Union, Special Publication Vol. 54.
- Kvenvolden K A (1999) Potential effects of gas hydrate on human welfare. *Proceedings of the National Academy of Science, USA*, 96: 3420-3426.
- Kvenvolden K A (1993) Gas hydrates as a potential energy resources. A review of their methane content. In Howell D G (ed.) *The Future of Energy Gases*. U.S. Geological Survey Professional Paper n° 1570, U.S. Government Printing Office, Washington DC: 555-561.
- Kvenvolden K A, Lorenson T D (2001) *A global inventory of natural gas hydrate occurrence*. USGS Special Maps. <http://walrus.wr.usgs.gov/globalhydrate/browse.pdf>
- Laherrere J (2006) *Oil and gas. What future?* Groningen Annual Energy Convention. <http://www.hubbertpeak.com/laherrere/groningen.pdf>
- Lubick N (2002) British Columbia methane hydrates. *Geotimes*. http://www.geotimes.org/dec02/NN_hydrates.html
- Maslin M, Owen M, Day S, Long D (2004) Linking continental slope failures and climate change: testing the clathrates gun hypothesis. *Geology*, 32: 53-56.
- Milkov A V (2004) Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there? *Earth-Science Reviews*, 66: 183-197.
- Paull C K, Usler W, Dillon W P (1991) Is the extent of glaciation limited by marine gas hydrates? *Geophysical Research Letters*, 18: 432-434.
- Paull C K, Dillon W P (2001, ed.) *Natural gas hydrates: occurrence, distribution and detection*. Geophysical Monograph Series, Volume 124, American Geophysical Union, Washington, DC.

- Pearce F (2005) Climate warning as Siberia melts. *New Scientist*, 2512: 12.
- Rahmstorf S (2002) Ocean circulation during the past 120 000 years. *Nature*, 419: 207-214.
- Roberts N (1998) *The Holocene. An environmental history*, 2.^a ed., Blackwell Publishers, Oxford.
- Thomas D J, Zachos J C (2002) Warming the fuel for the fire: evidence for the thermal dissociation of methane hydrate during the Paleocene-Eocene thermal maximum. *Geology*, 30-12: 1067-1070.
- Trinпати A H, Elderfield H (2005) Deep-sea temperature and circulation changes at the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. *Science*, 308: 1894-1898.
- Wagner B, Bennike O, Klug M, Cremer H (2006) First indication of Storegga tsunami deposits from East Greenland. *Journal of Quaternary Science*, 22: 321-325.
- Zachos J C, Pagani M, Sloan L, Thomas E, Billups K (2001) Trends, Rhythms and Aberrations in the Global Climate 65Ma to Present. *Science*, 292: 686-693.
- Zachos J C, Röhl U, Schellenberg S A, Sluijs A, Hodell D A, Kelly D C, Thomas E, Nicolo M, Raffi I, Lourens L J, McCarren H, Kroon D (2005) Rapid acidification of the ocean during the Paleocene. Eocene Thermal Maximum. *Science*, 308: 1611-1615.