

## Pergélisol et réchauffement climatique : la glace du sol, le CO<sub>2</sub> des sols arctiques et les hydrates de méthane

Albert Pissart

### Résumé

L'Arctique est la région où le réchauffement climatique est et sera le plus important de toute la terre. Ce réchauffement se produit et se produira principalement pendant l'hiver. Trois conséquences de ce réchauffement sont considérées : 1) La fusion de la glace du sol qui sera extrêmement dommageable pour les infrastructures. Elle se produira d'abord à la bordure méridionale du pergélisol à la suite du réchauffement de l'hiver et partout dans l'Arctique si les températures d'été s'élèvent. L'homme ne pourra pas empêcher la fusion de cette glace souterraine. 2) Il est possible que le réchauffement des sols entraîne la décomposition de l'humus accumulé en grande quantité depuis des millénaires dans les sols arctiques. Cela augmenterait considérablement l'effet de serre. 3) Un dégagement de méthane accumulé dans les hydrates se trouvant dans le pergélisol et sous les fonds marins pourrait se produire. Le danger est évident à long terme mais, dans l'état des connaissances, il est malaisé d'estimer les risques à court terme. Le méthane provenant des hydrates sera exploité de manière commerciale avant une décennie.

---

### Citer ce document / Cite this document :

Pissart Albert. Pergélisol et réchauffement climatique : la glace du sol, le CO<sub>2</sub> des sols arctiques et les hydrates de méthane. In: Bulletin de la Classe des sciences, tome 16, n°7-12, 2005. pp. 289-321;

doi : <https://doi.org/10.3406/barb.2005.28494>

[https://www.persee.fr/doc/barb\\_0001-4141\\_2005\\_num\\_16\\_7\\_28494](https://www.persee.fr/doc/barb_0001-4141_2005_num_16_7_28494)

---

Fichier pdf généré le 05/06/2020

## DISCOURS

# Pergélisol et réchauffement climatique : la glace du sol, le CO<sub>2</sub> des sols arctiques et les hydrates de méthane

par Albert Pissart

Président de l'Académie et directeur de la Classe

### Résumé

L'Arctique est la région où le réchauffement climatique est et sera le plus important de toute la terre. Ce réchauffement se produit et se produira principalement pendant l'hiver. Trois conséquences de ce réchauffement sont considérées: 1) La fusion de la glace du sol qui sera extrêmement dommageable pour les infrastructures. Elle se produira d'abord à la bordure méridionale du pergélisol à la suite du réchauffement de l'hiver et partout dans l'Arctique si les températures d'été s'élèvent. L'homme ne pourra pas empêcher la fusion de cette glace souterraine. 2) Il est possible que le réchauffement des sols entraîne la décomposition de l'humus accumulé en grande quantité depuis des millénaires dans les sols arctiques. Cela augmenterait considérablement l'effet de serre. 3) Un dégagement de méthane accumulé dans les hydrates se trouvant dans le pergélisol et sous les fonds marins pourrait se produire. Le danger est évident à long terme mais, dans l'état des connaissances, il est malaisé d'estimer les risques à court terme. Le méthane provenant des hydrates sera exploité de manière commerciale avant une décennie.

### 1. Introduction : le réchauffement de l'Arctique

#### OBSERVATIONS

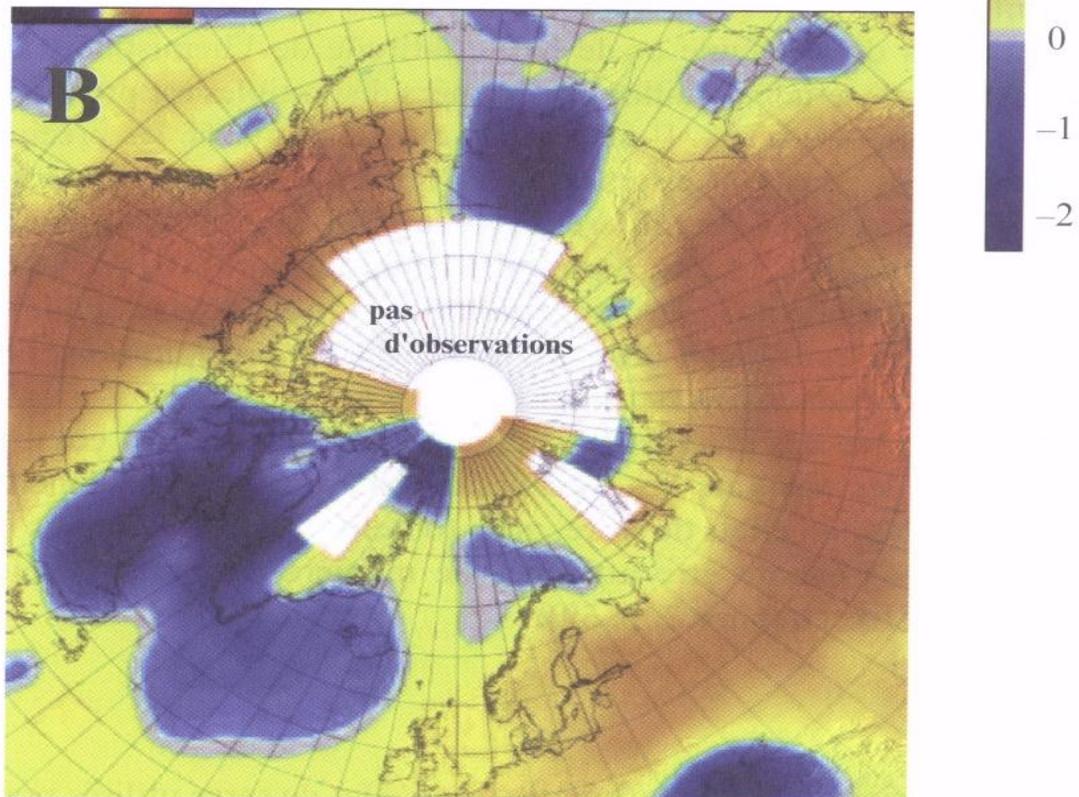
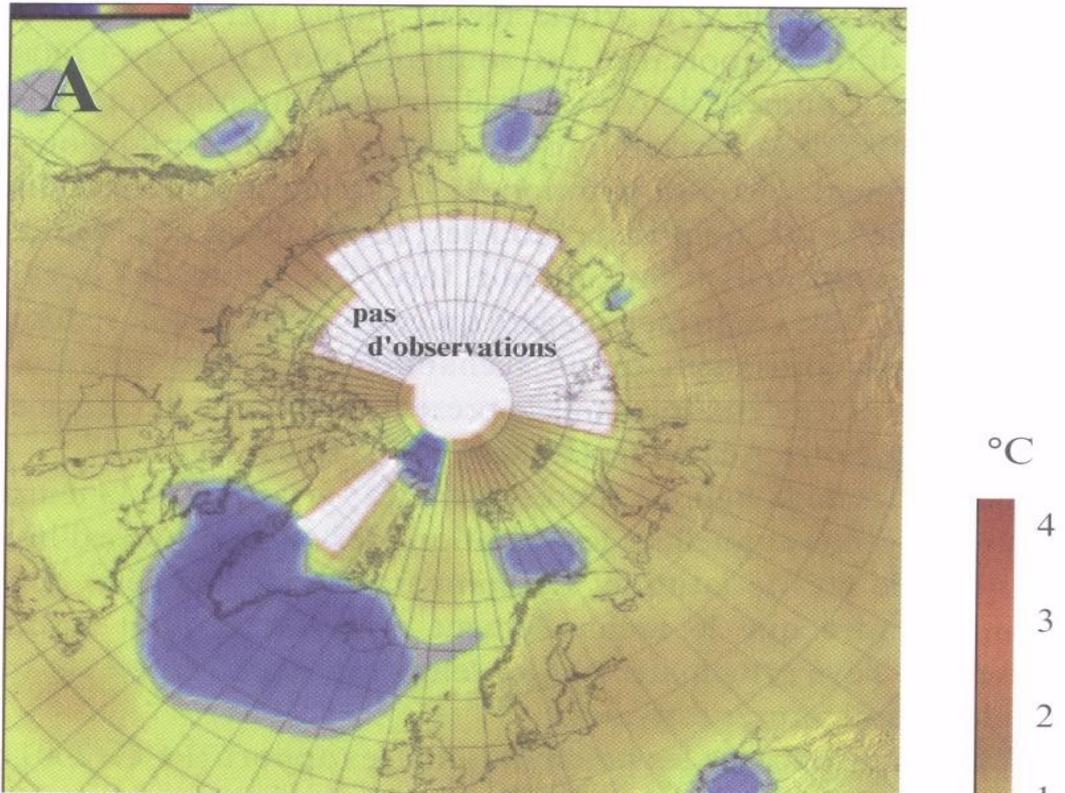
Depuis la publication de l'IPCC 2001 (Intergovernmental Panel on Climate Change) qui mentionnait que les données du 20<sup>e</sup> siècle montraient une tendance au réchauffement de l'Arctique s'élevant

jusqu'à 5°C sur des étendues considérables (résultats qui paraissent maintenant fortement exagérés), un nouveau rapport qui concerne les latitudes supérieures à 60 °N a été publié et est accessible sur internet sous le titre de ACIA report (Arctic Climate Impact Assessment, voir dans nos références Arctic Council, 2005). Établi par les meilleurs spécialistes des régions arctiques, il constitue la plus récente synthèse de ce que l'on connaît aujourd'hui sur le réchauffement de l'Arctique et sur ses conséquences. Nous y ferons fréquemment référence.

Comme ailleurs dans le monde, la température générale de l'Arctique a augmenté entre 1900 et 1940, diminué entre 1940 et 1965, puis augmenté par la suite. Les chiffres donnant la vitesse du réchauffement sont de ce fait très différents selon les années considérées. D'après le rapport ACIA que nous avons mentionné, le réchauffement des terres de l'Arctique s'est élevé de 1900 à 2002 à 0.09 °C par décennie, soit au total de environ 1°C pour le dernier siècle. Comme les données antérieures à 1950 ne sont pas nombreuses et guère fiables, les résultats sont douteux pour cette période. Cette valeur de 0.09°C par décennie pour les latitudes supérieures à 60°N est plus grande que celle acceptée pour tout l'hémisphère Nord pour lequel on admet 0.06°C par décennie. Pour la période 1966 à 2003, le réchauffement calculé par la méthode des moindres carrés donne une vitesse de réchauffement de 0.38 °C par décennie, valeur qui est confirmée par les observations satellitaires des 20 dernières années. Il n'est guère douteux d'autre part, que la dernière décennie a été la plus chaude depuis le début des mesures des températures. Les valeurs dont nous venons de parler sont des valeurs **moyennes** pour les observations terrestres aux latitudes supérieures à 60° N. Elles ne font apparaître ni les grandes différences qui existent d'un endroit à l'autre ni par exemple, que certaines stations enregistrent un refroidissement. La figure 1 montre bien cette variabilité et aussi l'existence

Fig. 1. – Cartes réalisées par Chapman and Walsh (2003) en utilisant les données de l'Unité de recherche climatique de l'Université de «East Anglia» et publiées dans le rapport ACIA (2005) p. 909. Ces cartes montrent les changements de température de surface entre 1954 et 2003. Les variations des températures moyennes annuelles sont présentées en A et les variations des températures d'hiver en B. Les dates entre lesquelles les comparaisons sont réalisées ont une grande influence étant donné les fluctuations interannuelles des températures. Ces cartes montrent entre autres le refroidissement d'une partie de l'Atlantique N au sud de l'Islande et du Groenland. Aucune explication n'est donnée concernant l'acquisition des données sur les océans. La comparaison des deux cartes fait clairement apparaître que le réchauffement observé se produit avant tout pendant l'hiver.

Variations de la température moyenne annuelle entre 1954 et 2003



Variations de la température d'hiver (déc.-fév.) entre 1954 et 2003

de refroidissements dont le principal est localisé au sud du Groenland et de l'Islande. Un article récent publié par Bryden *et al.* (2005) et dont l'importance est soulignée par Quadfasel (2005) dans le même numéro de *Nature*, indique une diminution très probable de 30% de la dérive Nord-Atlantique, ce qui expliquerait ce refroidissement. Cette diminution de la circulation thermohaline a été prévue par de nombreux modèles; toutefois on ne l'attendait pas maintenant mais beaucoup plus tard. Cet article que la carte (figure 1) semble confirmer suggère qu'en Europe on doit redouter plus un refroidissement qu'un réchauffement. Cette question a déjà été évoquée deux fois dans le présent bulletin de la Classe des Sciences de notre Académie (Pissart, 1998; Souchez, 2004).

Les cartes de la figure 1 représentent les variations de la température moyenne annuelle et les variations de la température d'hiver au nord de 60° de latitude. La comparaison de ces deux documents montre que le réchauffement qui s'est produit jusqu'à présent, a élevé principalement les températures hivernales et très peu les températures estivales.

En ce qui concerne les précipitations, le rapport IPCC (2001) a affirmé qu'il était très probable que les précipitations aient augmenté de 0.5 à 1% par décennie au cours du 20<sup>e</sup> siècle sur les continents de moyenne et de haute latitude de l'hémisphère N. Une nouvelle étude détaillée des données disponibles est présentée dans le rapport ACIA. Il mentionne que depuis 1966 les précipitations moyennes ont augmenté de l'ordre de 2% par décennie, mais avec de grandes différences selon les régions (comme le montre la figure 2.11 non reproduite ici du rapport ACIA). Dans la Russie occidentale, les précipitations annuelles ont diminué surtout pendant l'hiver, alors qu'en Alaska les précipitations ont augmenté pendant toutes les saisons.

L'ensemble des changements climatiques observés est compatible avec les résultats des modèles considérant les changements globaux dus aux effets de serre, mais toutefois ces changements ne peuvent pas encore être attribués de manière définitive à cette cause (ACIA, chapitre 2, p. 39).

## MODÈLES

Les scénarios d'augmentation des gaz à effet de serre utilisés pour les modèles ACIA sont les scénarios A2 et B2 utilisés dans le

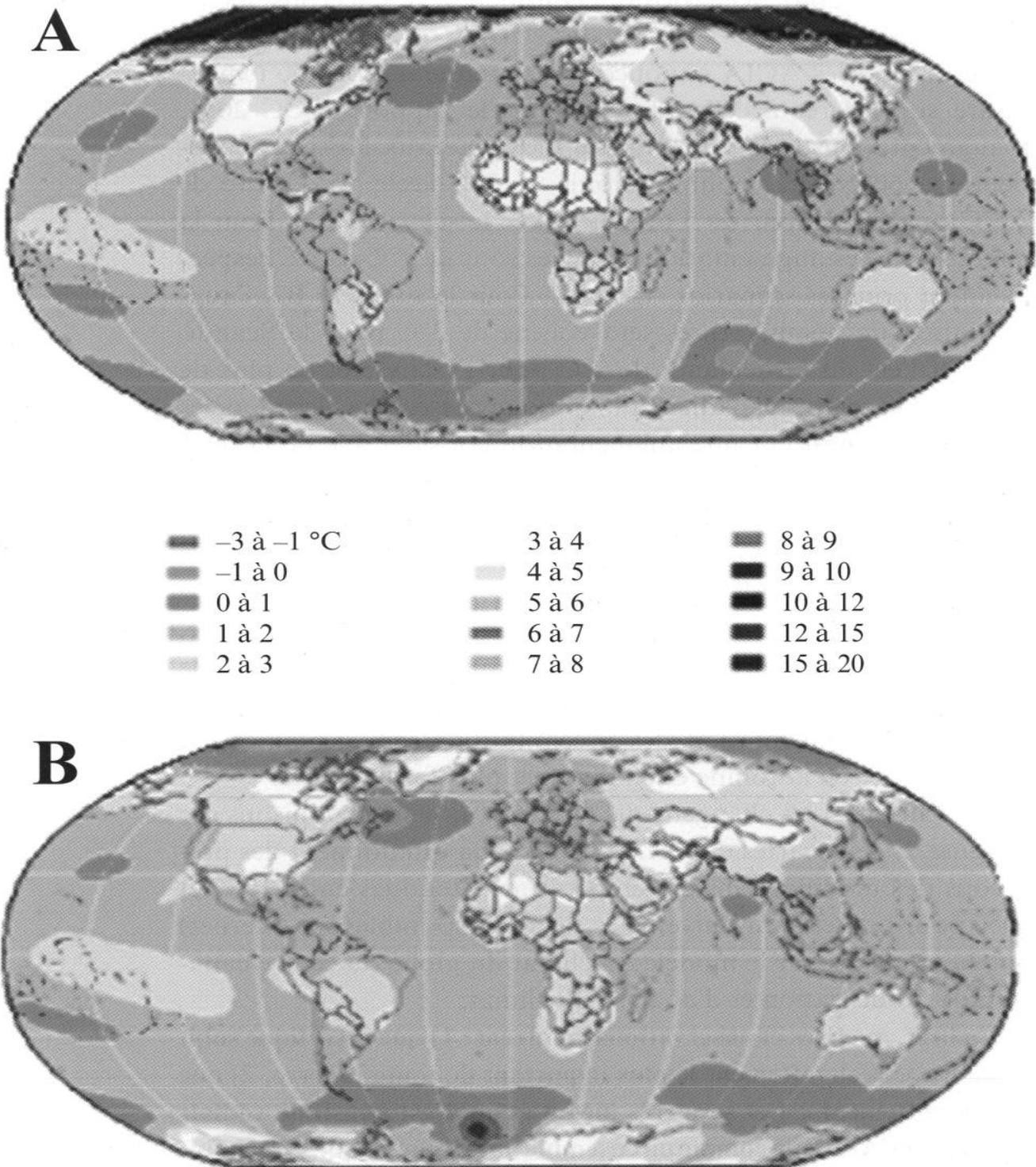


Fig. 2. – Cartes de l’Atlas du Canada décrivant les changements de températures prévus entre 1985 et 2050 attendus pour l’hiver (A) et l’été (B). Ces cartes, résultant du modèle du climat du globe du centre canadien de modélisation et d’analyse du climat (scénario IS92a; mailles de 3.75° de lat. et de long.), montrent toute l’importance du réchauffement sur l’Océan glacial Arctique et que le réchauffement attendu se produira pendant l’hiver. (Ces cartes sont tirées de l’Atlas du Canada <http://atlas.gc.ca/> © 2005. Données reproduites en vertu d’une licence de Sa Majesté la Reine du chef du Canada, avec la permission de Ressources naturelles Canada.)

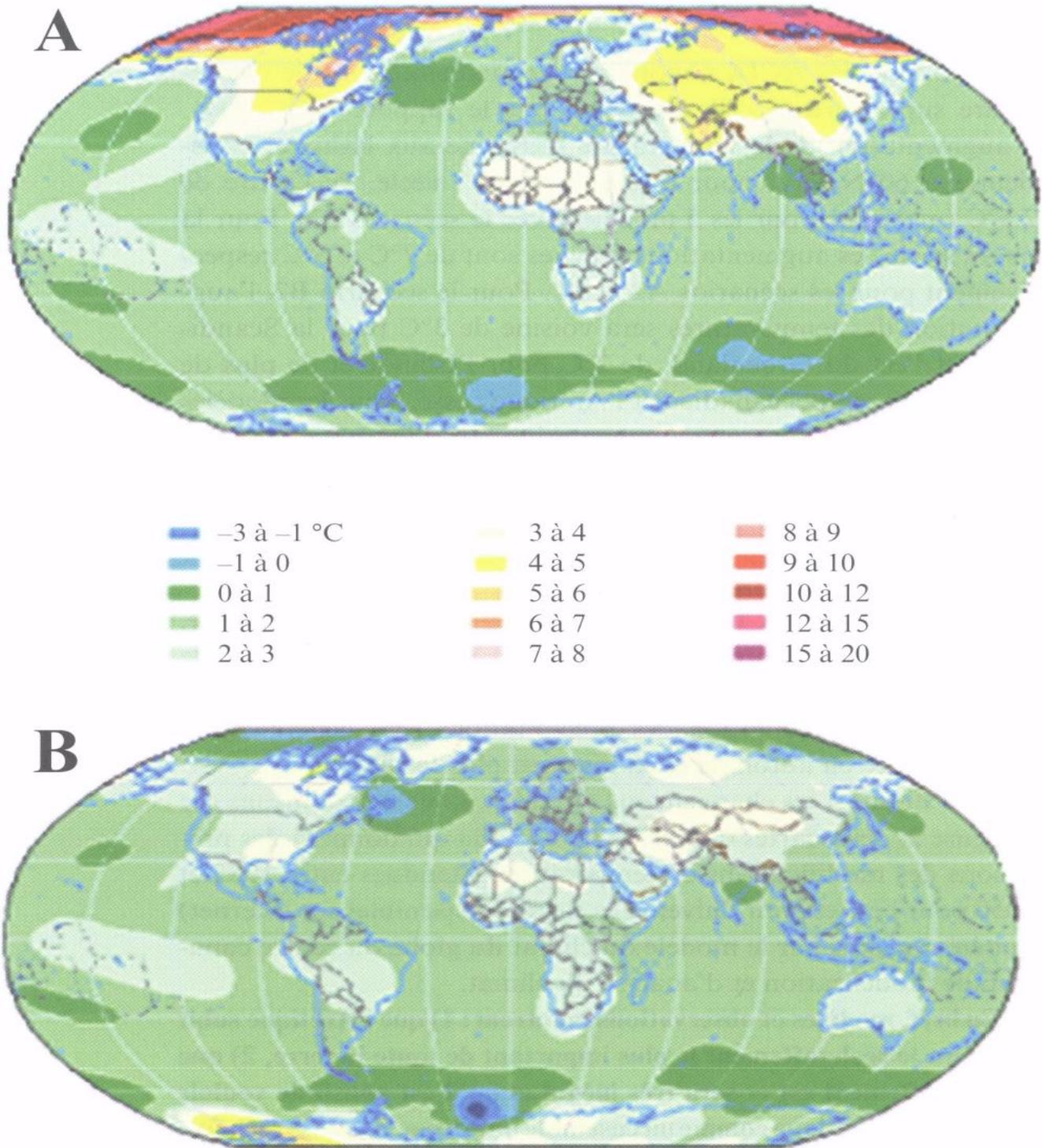


Fig. 2. Cartes de l'Atlas du Canada décrivant les changements de températures prévus entre 1985 et 2050 attendus pour l'hiver (A) et l'été (B). Ces cartes, résultant du modèle du climat du globe du centre canadien de modélisation et d'analyse du climat (scénario IS92a : mailles de 3.75° de lat. et de long.), montrent toute l'importance du réchauffement sur l'Océan glacial Arctique et que le réchauffement attendu se produira pendant l'hiver. (Ces cartes sont tirées de l'Atlas du Canada <http://atlas.gc.ca/> © 2005. Données reproduites en vertu d'une licence de Sa Majesté la Reine du chef du Canada, avec la permission de Ressources naturelles Canada.)

## **2. Le réchauffement climatique et la fusion de la glace du pergélisol**

Le pergélisol couvre environ 1/5 des terres émergées (figure 3). La définition exacte du pergélisol (en anglais, permafrost) est «un sol ou une roche qui se maintient à une température égale ou inférieure à 0°C pendant au moins deux ans». C'est donc une définition purement thermique; il n'est pas nécessaire que le sol soit gelé, c'est-à-dire contienne de la glace, pour que le terme soit applicable. Toutefois de la glace est très fréquente dans le pergélisol. Elle est accumulée avant tout près de la surface, soit dans les 4 à 5 m sous la couche active qui est la couche superficielle qui gèle et qui dégèle chaque année (figure 4). On distingue, du nord au sud, les zones de pergélisol continu, de pergélisol discontinu et de pergélisol sporadique (voir figure 5). La limite du pergélisol continu correspond à une température moyenne de l'air de -8°C. A des températures supérieures, un pergélisol n'existe pas partout car de nombreux autres facteurs influencent la température du sol. La couverture de neige, excellent isolant thermique, est le facteur principal; en outre la couverture végétale, l'exposition... jouent aussi des rôles importants. Le pergélisol existe sur la côte

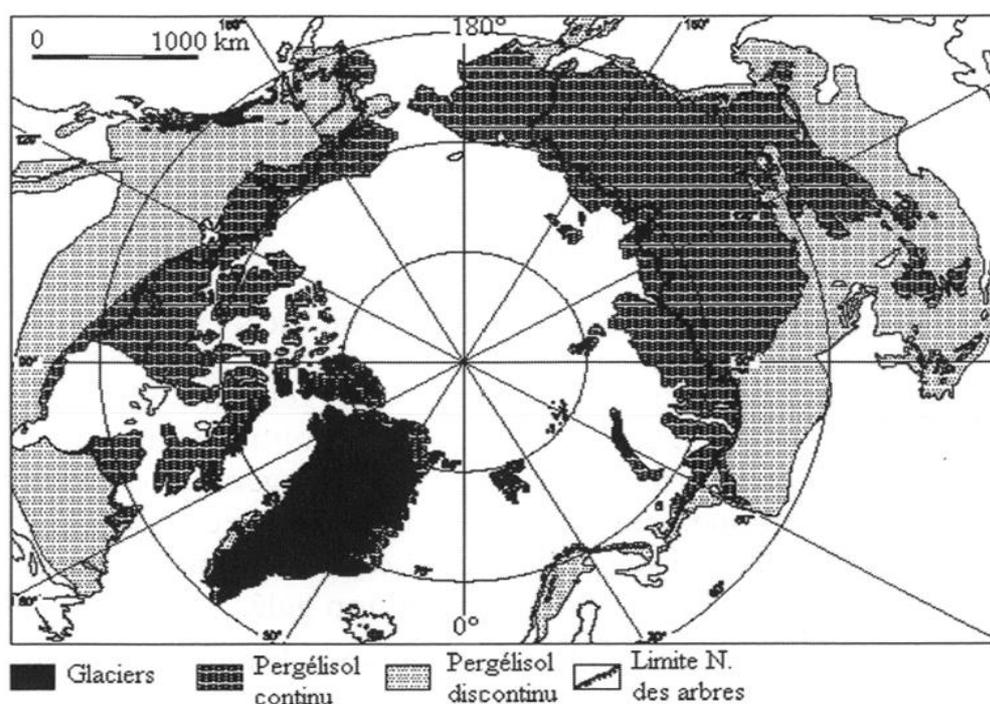


Fig 3. – Carte de la distribution du pergélisol de l'hémisphère nord d'après la carte de Brown *et al.* (1997).

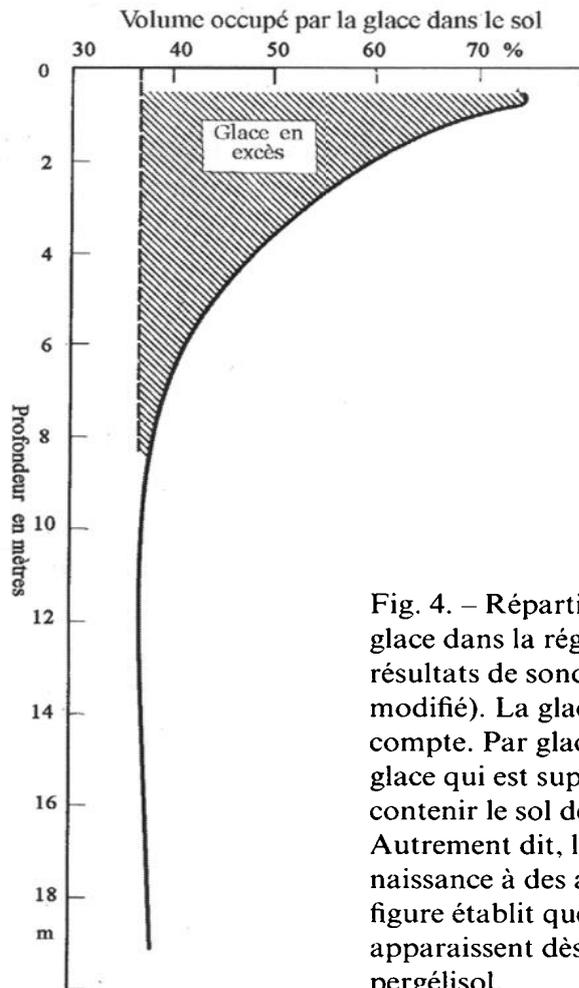


Fig. 4. – Répartition en profondeur du volume de glace dans la région de Barrow (Alaska) d'après les résultats de sondages (Washburn, 1979, p. 43, modifié). La glace de fente de gel n'est pas prise en compte. Par glace en excès, on entend la quantité de glace qui est supérieure au volume d'eau que peut contenir le sol dégelé dans des conditions naturelles. Autrement dit, la fonte de la glace en excès donne naissance à des affaissements thermokarstiques. Cette figure établit que les phénomènes thermokarstiques apparaissent dès le réchauffement du sommet du pergélisol.

est du Canada jusqu'à la latitude de 50°N, soit la latitude de la Belgique. L'épaisseur du pergélisol peut être considérable; elle dépasse plus de 1000 m en plusieurs endroits de Sibérie.

#### LES TYPES DE GLACE DU SOL ET LEUR DISTRIBUTION

Différents types de glace existent dans le pergélisol. Les glaces les plus importantes par leur fréquence et leur volume sont mentionnées ci-dessous (concernant des détails sur leur genèse voir Pissart, 1994). Il s'agit uniquement ici de glace du sol en excès, c'est-à-dire de glace accumulée dans le pergélisol et dont le volume dépasse la quantité d'eau que peut contenir un sol non gelé.

- 1) Les masses de glace les plus épaisses sont les glaces massives. Ces glaces, parfois de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, existent en Sibérie occidentale, en Alaska et dans l'ouest de l'Arctique canadien. Leur origine est toujours discutée. Deux

hypothèses principales sont en présence: il s'agit soit de glace enfouie (par exemple de la glace de glacier), soit de glace de ségrégation apparue dans le sol par des processus cryostatiques. Ces glaces ont été observées souvent à des profondeurs dépassant 30 m et parfois même à des profondeurs de 100 ou 200 m (French, 1996, p. 99).

- 2) L'origine de la glace de fente de gel est par contre bien connue. Elle se présente sous forme de coins de glace situés immédiatement sous la couche active (la couche qui gèle et dégèle chaque année). Elle résulte de l'apparition de fissures de rétraction thermique qui s'ouvrent brutalement à la surface du sol et dans le pergélisol lors de l'abaissement brutal des températures en hiver. Au printemps, des eaux s'infiltrant dans ces fissures et ne tardent pas à y geler. Comme les fissures s'ouvrent à la même place d'année en année, ces coins de glace peuvent dépasser 3 à 4 mètres de largeur. La présence de la glace de fente de gel apparaît à la surface sous la forme de polygones de toundra (polygones de fentes de gel) extrêmement fréquents dans le Haut Arctique.
- 3) La glace de ségrégation n'apparaît en surface par une morphologie spéciale que dans la zone du pergélisol discontinu où elle forme des paises et des lithales (Pissart, 1994). Il s'agit de buttes qui peuvent atteindre jusqu'à 10 m d'élévation. Ailleurs, dans la zone du pergélisol continu, cette glace formée par migration de l'eau vers la zone de gel enrichit considérablement en glace le sommet du pergélisol, spécialement au contact de la couche active.

Ces diverses glaces du sol fondront si la température du sol s'élève au-dessus de 0°C. Les zones où existe de la glace dans le sol présentent donc des risques d'affaissements. En fait, toute la zone occupée par le pergélisol est dangereuse mais le risque est variable. Les régions où il y a le moins de glace dans le sol sont les zones montagneuses et les boucliers de roches anciennes où les roches meubles sont rares.

#### LA FRAGILITÉ DU PERGÉLISOL

Comme la plus grande quantité de glace du sol se trouve au sommet du pergélisol c'est-à-dire immédiatement sous la couche active, le moindre accroissement de l'épaisseur de cette couche, comme il s'en produit pendant un été très chaud, provoque la

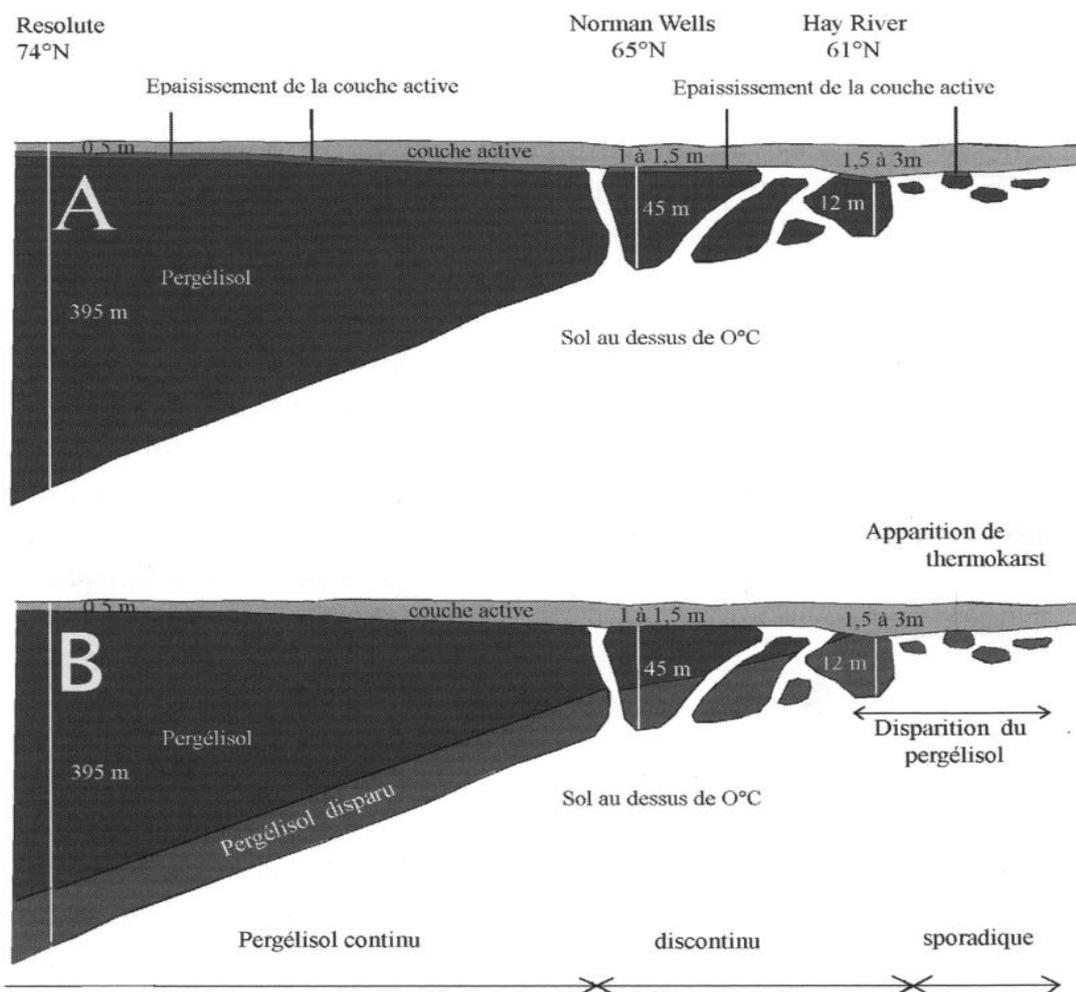


Fig. 5. – A. Si la température des étés augmente, la couche active, devenant plus épaisse, va entraîner partout où existe un pergélisol la fonte de la glace localisée au sommet de celui-ci.

B. Si la température des hivers augmente, le pergélisol se réchauffera aussi mais pas nécessairement en épaississant la couche active. L'augmentation de la température arrivera à la partie inférieure du pergélisol seulement après un temps plus ou moins long selon l'épaisseur de celui-ci. Cette évolution entraînera la disparition totale du pergélisol près de sa limite méridionale en y provoquant des phénomènes thermokarstiques. Ailleurs, il diminuera seulement l'épaisseur du pergélisol.

fusion de la glace localisée au sommet du pergélisol. Indépendamment de tout réchauffement climatique, des variations dans la couverture neigeuse, des modifications de la couverture végétale, une érosion de la couche active... peuvent entraîner la fusion de la glace du sol. Un accroissement faible de la couche active peut engendrer, si la glace ne contient que peu de matières minérales, des affaissements thermokarstiques très importants.

Le réchauffement climatique actuel est observé principalement pendant l'hiver, comme nous l'avons mentionné précédemment. Il en résulte qu'une fonte générale de la glace du sommet du pergélisol n'est pas en cours actuellement. Si le réchauffement se produisait l'été, la couche active s'épaississant, des phénomènes thermokarstiques apparaîtraient partout (figure 5A). Comme le réchauffement est essentiellement hivernal, la température du pergélisol s'élève mais sans affecter pratiquement l'épaisseur de la couche active. À long terme, ce réchauffement hivernal engendrera une diminution de l'épaisseur du pergélisol par disparition de sa partie inférieure (figure 5B). Ce phénomène n'entraînera évidemment pas l'apparition de phénomènes thermokarstiques dans la zone du pergélisol continu (sauf si de la glace existe en profondeur), mais bien dans la zone du pergélisol sporadique et discontinu où le pergélisol va disparaître totalement. Le réchauffement actuel qui se produit en hiver va donc engendrer rapidement des phénomènes thermokarstiques désastreux principalement à la limite sud du pergélisol.

La vue que nous donnons ci-dessus est évidemment très simplifiée car elle ne prend pas en compte les variations climatiques qui se produiront d'un endroit à l'autre, ni l'influence des autres mois de l'année, ni les variations de la couverture neigeuse et de la végétation qui résulteront du réchauffement climatique.

#### LES MESURES DE PRÉVENTION POUR LIMITER LES PHÉNOMÈNES THERMOKARSTIQUES

Le seul moyen pour empêcher les phénomènes thermokarstiques de se produire est de conserver le pergélisol.

Aussi, partout où existe un pergélisol, les constructions modernes sont établies sur pilotis pour empêcher que la chaleur des bâtiments ne se transmette au sol sous-jacent. L'hiver, la circulation de l'air froid sous les bâtiments maintient le sol gelé. En outre, l'ombre des bâtiments eux-mêmes protège en été le sol de toute insolation directe.

Par ailleurs, lorsque de la glace existe dans le sol, les routes, les voies de chemin de fer et pistes d'aviation sont construites sur des remblais de matériaux grossiers (sables et graviers) qui ne permettent pas la formation de glace de ségrégation. Au sein de ces remblais s'élève le contact pergélisol/couche active qui s'éloigne ainsi de la glace enfouie en profondeur. Un épaississement ultérieur de

la couche active n'atteindra pas de ce fait la glace du sol et donc limitera les phénomènes thermokarstiques.

Un dispositif pour conserver la couche active a été mis au point pour stabiliser le pipeline de l'Alaska qui a été ouvert en 1977. Ce pipeline transporte du pétrole à une température moyenne de 60°C. Enterrer ce pipeline dans le pergélisol était donc impensable; aussi, là où le sol est toujours gelé, la conduite repose sur des pilotis. Pour assurer leur stabilité, ceux-ci sont équipés de thermosiphons qui ont pour but de refroidir le sol. Ces appareils consistent en des piles creuses à l'intérieur desquelles se trouve de l'ammoniaque. À la température du pergélisol, l'ammoniaque se vaporise et s'élève au sommet du pilier, où, dans un radiateur à ailettes facilitant les échanges thermiques, le froid hivernal le liquéfie. L'ammoniaque liquide très froid redescend alors dans le pilotis au niveau du pergélisol. La circulation de l'ammoniaque refroidit ainsi le pergélisol à proximité des piliers. Environ 124.000 thermosiphons équipent le pipeline de l'Alaska; les mêmes appareils sont maintenant utilisés pour protéger des maisons, des barrages ou d'autres installations humaines.

Un autre danger menace les constructions sur pilotis, à savoir le soulèvement de ceux-ci par le gel. Les pilotis sont normalement ancrés profondément dans le pergélisol pour que l'adhérence au sol toujours gelé soit supérieure à celle qui se produit dans la couche active au moment où celle-ci est reprise par le gel. Comme la couche active augmente de volume au moment du gel (non seulement parce que l'eau augmente de volume en se transformant en glace mais aussi parce que l'eau migre dans le sol vers le front de gel pour former des lentilles de glace de ségrégation), le pilier saisi par le gel dans la couche active va se soulever avec le sol superficiel s'il n'est pas solidement ancré dans le pergélisol. Quand le réchauffement climatique d'été augmentera, il diminuera la longueur de la partie ancrée dans le pergélisol. Et lorsque l'ancrage ne sera plus suffisant, les pilotis pourront être soulevés par le gel en endommageant les constructions qui les surmontent. Les constructions résisteront d'autant plus longtemps au réchauffement que les piliers qui les soutiennent sont ancrés profondément dans le pergélisol.

## CONCLUSION

**Le réchauffement climatique va provoquer des affaissements thermokarstiques qui mettront en danger les infrastructures de l'Arctique. La fonte de la glace du sol est inéluctable si, comme on le prévoit, le réchauffement s'amplifie. Les affaissements thermokarstiques se produiront simultanément dans toute la zone où la température d'été augmentera. Jusqu'à présent, le réchauffement se produit presque uniquement pendant l'hiver, ce qui limite la menace thermokarstique immédiate à la bordure sud du pergélisol.**

Il est impossible de prévoir en détail quand et où les phénomènes se produiront car outre la température, les précipitations neigeuses (l'augmentation de la couverture neigeuse entraîne le réchauffement du sol) et les modifications de la couverture végétale (l'accroissement de la couverture végétale refroidit le sol) ont un effet important sur la température du sol. Par ailleurs, l'épaississement de la couche active et l'abaissement de la table du pergélisol (contact couche active/pergélisol) vont entraîner l'instabilité des pilotis qui seront soulevés par le gel quand ils ne seront plus suffisamment ancrés dans le pergélisol.

### **3. Le réchauffement climatique va-t-il provoquer le dégagement de grandes quantités de CO<sub>2</sub> provenant des sols arctiques?**

Depuis le retrait des calottes glaciaires, les sols arctiques constituent un puits pour le CO<sub>2</sub> atmosphérique. Bien que la végétation des régions polaires soit peu importante, le carbone fixé par la photosynthèse par les plantes de la toundra ne se décompose que partiellement. Les basses températures et les très longs hivers pendant lesquels les sols sont gelés réduisent en effet beaucoup la décomposition de la matière organique. Cette dernière s'est accumulée ainsi d'une manière continue depuis la déglaciation. Souvent les cryoturbations qui, sous l'effet du gel, mélangent la matière organique avec le sol minéral font disparaître en profondeur une partie de cette matière. Kvenvolden (1988) estime que 700 gigatonnes de carbone (1Gt=10<sup>9</sup> t), soit à peu près l'équivalent du carbone contenu dans l'atmosphère, sont actuellement stockées dans les sols arctiques.

Dans quelle mesure, le réchauffement climatique va-t-il, en amplifiant l'action des microorganismes, libérer sous forme de

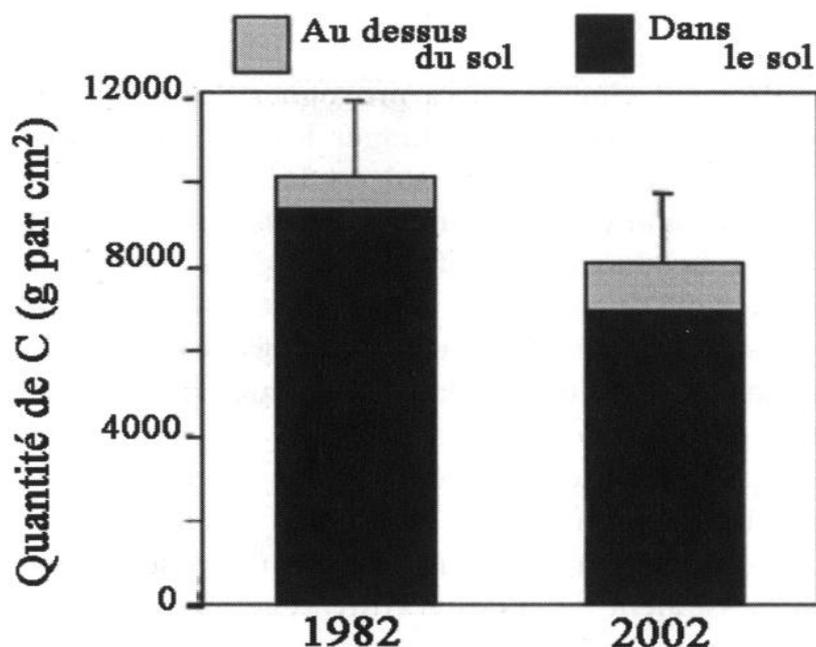


Fig. 6. – Résultats d’une expérience réalisée dans la «Toolik field station» en Alaska consistant en l’apport pendant 20 ans d’azote et de phosphore en plusieurs sites de la toundra. En 1982, a débuté l’expérience qui s’est terminée en 2002. La quantité moyenne de carbone stockée au-dessus du sol a augmenté en relation avec la plus grande fertilité du sol tandis que le contenu en matière organique contenue dans le sol a diminué. Au total, la quantité de carbone dans les sites de l’expérience a diminué, ce qui signifie que du  $\text{CO}_2$  a été dégagé (Mack *et al.*, 2004).

$\text{CO}_2$ , ce carbone contenu dans les sols? La réponse n’est pas évidente car une action antagoniste se développera simultanément : le volume de la couverture végétale et la fixation de matière organique va en effet augmenter comme l’indique le déplacement vers le nord de la limite forêt/toundra. De très nombreuses publications abordent cette question, mais les réponses données sont divergentes (ACIA, 2005. Chapter 7 : 244-235).

Pour illustrer ce débat, nous nous limiterons ici à donner les résultats d’une expérience qui a été poursuivie pendant 20 ans dans la toundra du nord de l’Alaska, dans la « Toolik field station » au nord de la Chaîne de Brooks (Mack *et al.*, 2004). L’expérience a consisté à apporter de 1982 à 2002, 10 g d’azote et 5 g de phosphore par  $\text{m}^2$  dans plusieurs sites de la toundra. Il est postulé que cette fertilisation a eu un effet comparable à celui d’un réchauffement climatique : les plantes qui recouvrent le sol sont en effet plus développées au bout des 20 ans, mais les microorganismes

ont été aussi plus actifs et ont diminué la quantité de carbone contenu dans le sol.

Le résultat global de cette expérience est, comme le montre la figure 6, que du CO<sub>2</sub> provenant du sol a été dégagé dans l'atmosphère.

Un consensus entre les scientifiques n'existe pas sur cette question importante. Certains scientifiques pensent toutefois que le CO<sub>2</sub> provenant des sols arctiques à la suite du réchauffement climatique pourrait être aussi important que le dégagement de CO<sub>2</sub> provenant des combustibles fossiles.

#### **4. Libération possible de méthane contenu dans les hydrates à la suite du réchauffement climatique?**

LES HYDRATES DE MÉTHANE: IMPORTANCE, NATURE, ORIGINE, LOCALISATION

Le méthane est un gaz à effet de serre puissant. Il est plus actif que le CO<sub>2</sub> avec un potentiel de réchauffement 21 fois supérieur sur 100 ans (en tenant compte des effets indirects comme la vapeur dans la stratosphère, ... IPCC, 1996). Actuellement, il intervient pour 17% dans l'effet de serre (communication orale de A. Berger).

L'existence d'hydrates de méthane naturels est une découverte assez récente. Dans les années 1930, on a observé que des hydrates obturaient les pipelines transportant des gaz. En 1969, les propriétés des hydrates de gaz ont été découvertes en URSS et, dans les années 70, l'existence d'hydrates a été supposée en Sibérie et en Alaska sous le pergélisol et aussi sous la mer. Un premier échantillon a été obtenu en 1974 dans la Mer Noire, puis en 1982 au large des côtes du Mexique et du Guatemala. C'est en 1983 que l'on comprend que le réflecteur sismique BSR dont nous parlerons plus loin, correspond avec la limite inférieure de la zone des hydrates (Kvenvolden and Barnard, 1983). C'est seulement alors qu'on commence à prendre conscience qu'il s'agit d'une ressource d'énergie potentielle. D'après l'American Geological Institute, le nombre annuel de publications se rapportant aux hydrates était pratiquement nul avant 1980, et n'atteignait pas la centaine avant 1997. En décembre 2005, il y a 125.000 sites sur internet répondant à une recherche «methane-hydrate». C'est que l'intérêt actuellement pour les hydrates de gaz est considérable pour deux

raisons à savoir, 1) c'est une source d'énergie potentielle prodigieuse et 2) le dégagement du méthane contenu dans les hydrates pourrait entraîner un réchauffement global catastrophique.

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 5000 Gt (1 Gt =  $10^9$  t) accumulées 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 2500 Gt (Milkov, 2004). Buffet and Archer (2004) pour leur part, estiment que sous les océans, 3000 Gt de carbone existent dans les hydrates et 2000 Gt sous forme de gaz.

Les hydrates de gaz qui sont des clathrates, sont constitués de cages de glace dans les quelles est emprisonné un gaz. Dans les hydrates de méthane, il n'y a aucun lien chimique entre  $H_2O$  et  $CH_4$ . La fusion de la cage de glace libère le méthane emprisonné qui s'y trouve en grande quantité puisque le volume du gaz libéré occupe (à  $0^\circ C$  et 760 mm de Hg) environ 170 fois le volume des hydrates dont il provient.

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 and Hannigan, 2000; Hyndman and Dallimore, 2001). Comme le carbone sédimentaire est seulement abondant à proximité des continents, c'est uniquement en bordure de ceux-ci que des hydrates ont été observés sous la mer.

La figure 7 localise les endroits où des hydrates ont été reconnus. Sur les continents, comme nous l'expliquons ci-dessous, ils ne sont présents que lorsque existe un pergélisol. Sous les fonds marins,

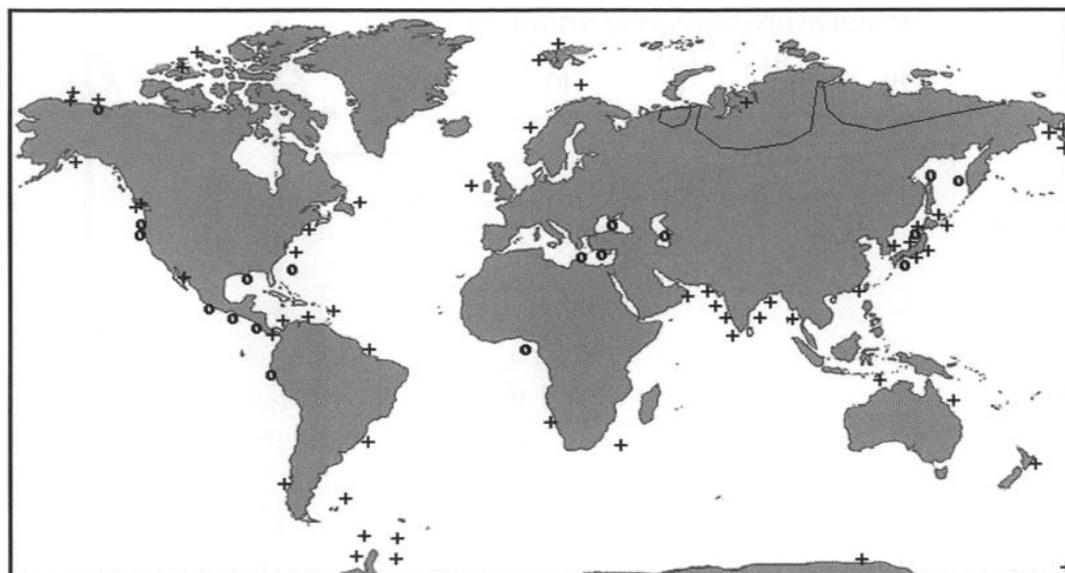


Fig. 7. – Carte donnant la localisation des endroits où des hydrates de méthane ont été reconnus dans le monde. Les sigles **o** indiquent les endroits où des échantillons d’hydrates ont été extraits dans des sondages tandis que les sigles **+** indiquent les endroits où la présence d’hydrates est déduite des 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).

les hydrates ont été repérés 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 sont présents.

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 8 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  $-10^{\circ}\text{C}$  (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, progressivement plus foncé en profondeur apparaît la zone où des hydrates de méthane peuvent exister. Cette zone comprend l’épais-

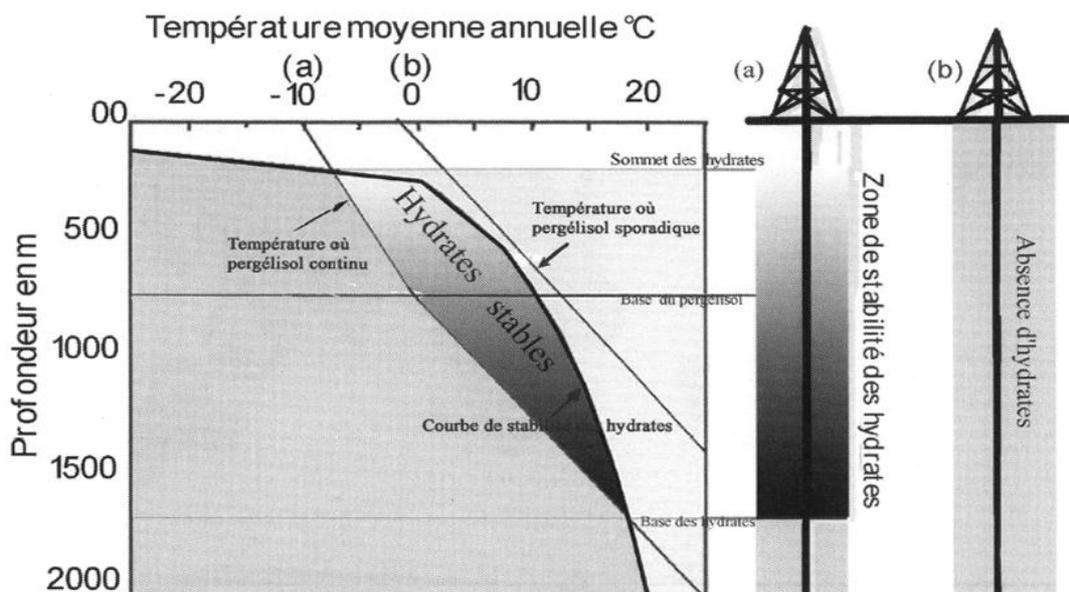


Fig. 8. – Zone de stabilité des hydrates de méthane dans les régions où existe un pergélisol (d'après Hyndman et Dallimore, 2001, fig.3 modifiée).

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  $-10^{\circ}\text{C}$ , 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  $-2^{\circ}\text{C}$  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 n'existent que dans les régions où existe un pergélisol.

seur 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 ici plus de 1600 m.

Si la température moyenne à la surface est un peu inférieure à  $0^{\circ}\text{C}$ , la même figure 8 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.

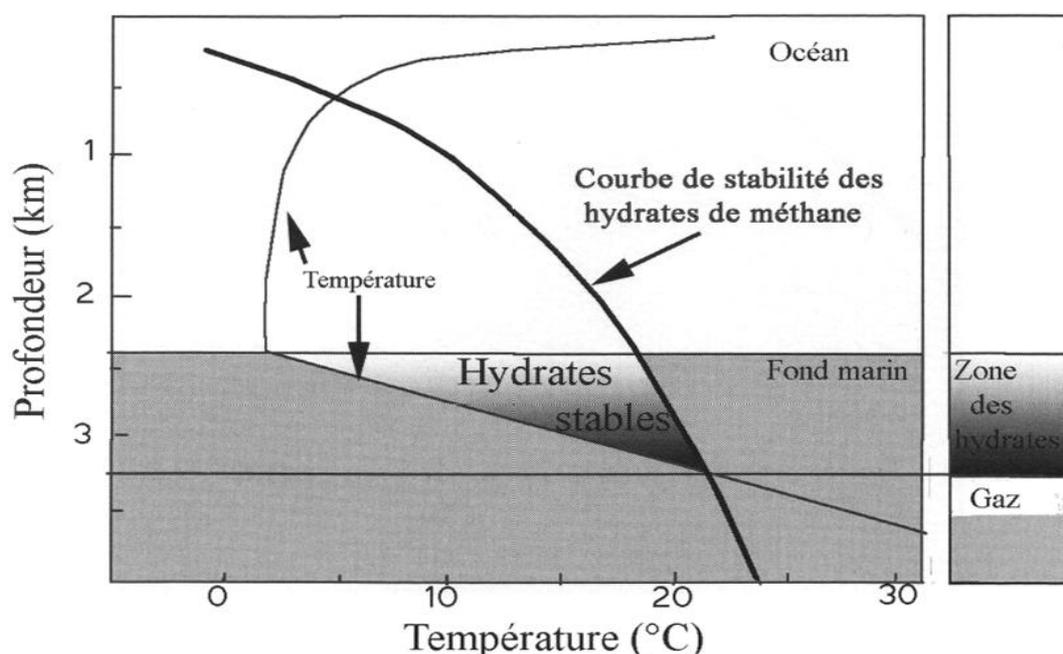


Fig. 9. – Zone de stabilité des hydrates de méthane, sous les fonds marins. La présence d'hydrates est contrôlée par la température et la pression. La figure présente à titre d'exemple la situation en un endroit où le fond marin est à 2.4 km de profondeur avec une température à +2°C. A droite, apparaissent 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).

Sous les océans, les conditions de stabilité des hydrates de méthane sont indiquées sur la figure 9. 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, ici de l'ordre de 2°C, la zone de stabilité des hydrates de méthane s'étend depuis le fond de l'océan à 2500 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 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 »

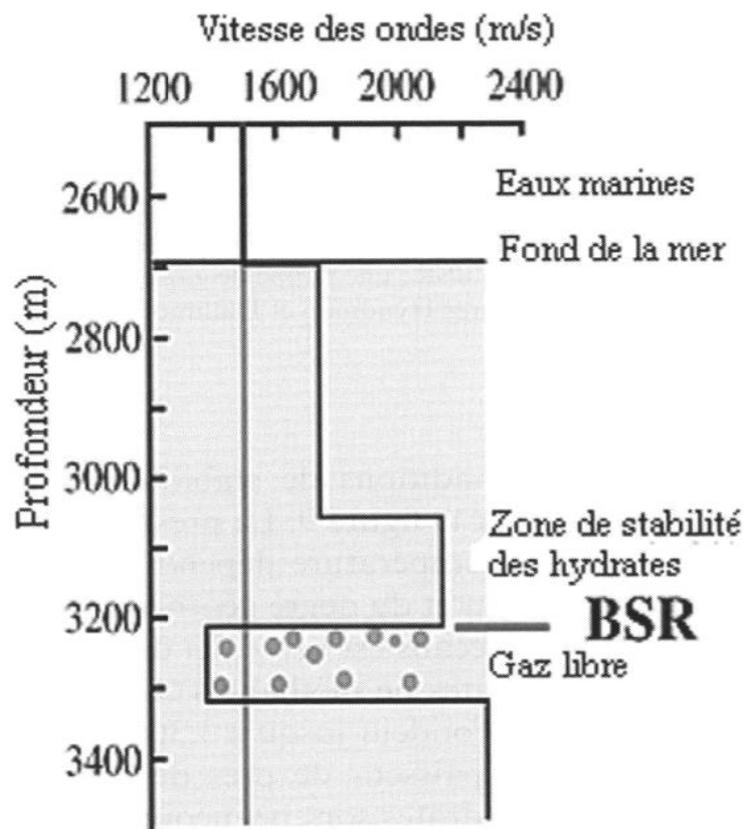
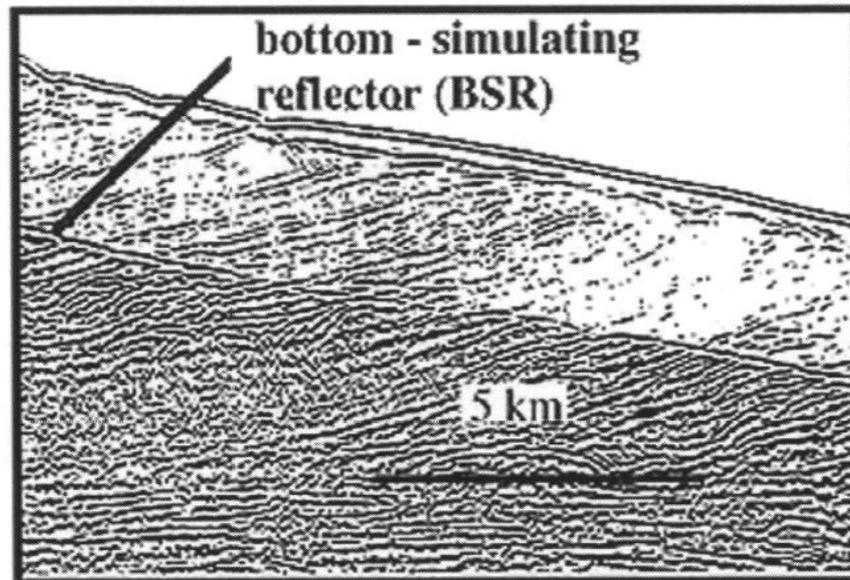


Fig. 10. – Le réflecteur sismique BSR indique la présence d’hydrates de gaz dans les fonds marins comme le montre l’enregistrement des « Black Ridges » présenté dans la figure du dessus. Les réflexions faibles au-dessus de la limite BSR correspondent à des contenus variés d’hydrates de gaz dans les pores. 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»).

(BSR) et en français «réflecteur de simulation du fond» (RSF). C'est seulement en 1983 que les géophysiciens ont compris qu'à ce signal parallèle à la surface du fond de l'océan correspondait (figure 10) 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 and 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 influences expliquent qu'il est impossible de donner une limite de profondeur précise à partir de laquelle des hydrates peuvent être observés dans le pergélisol.

#### EXPLOITATION PROCHAINE DES HYDRATES DE MÉTHANE

L'utilisation du méthane comme combustible est intéressante car, par rapport au charbon et au pétrole, il produit moins de CO<sub>2</sub>. 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 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).

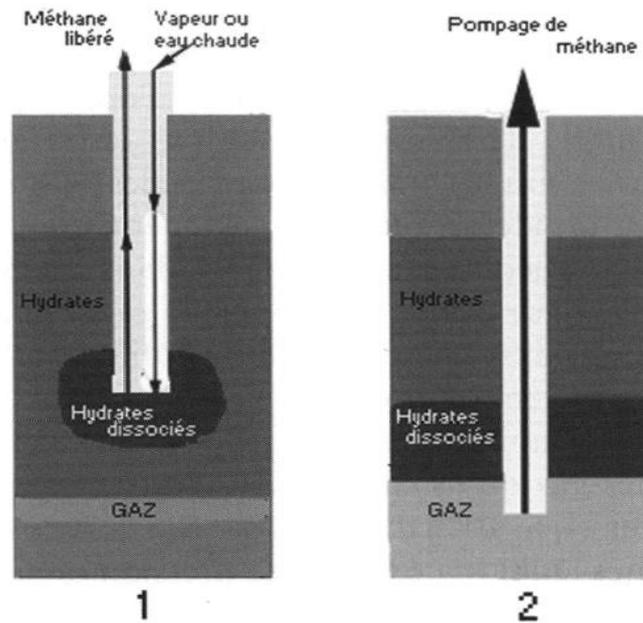


Fig. 11. – Deux méthodes d’exploitation du méthane contenu dans les hydrates ont été testées dans les sondages de Mallik sur la côte nord du Canada près de la frontière de l’Alaska. 1. A gauche, injection de vapeur ou d’eau chaude dans la zone où les hydrates sont abondants. 2. A droite, pompage du gaz 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.

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 11), la première consiste à envoyer de la vapeur ou de l’eau chaude dans la zone où se trouvent 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 Geo Forschungs Zentrum 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, les points de vue ont changé et Art Johnson (Hydrate Energy International) à la 4<sup>e</sup> Conférence internationale sur les hydrates, (9 au 11 mai 2005 à Victoria, BC Canada), a opposé les vues anciennes aux perspectives qui se présentent actuellement (voir sur internet sa présentation Power Point). 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 indiquent sur internet (MH21 Research Consortium for Methane Hydrate Ressources in Japan) 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 1000 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 (voir plus loin).

#### 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 dégazages des hydrates. Les modifications climatiques que ces dégazages ont produites ont été si importantes que de nombreuses espèces ont alors disparu. L'événement le plus récent est survenu à la limite Paléocène/Éocène, 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  $^{12}\text{C}$  par rapport au  $^{13}\text{C}$ . 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: il lui a fallu 1000 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. Jahren *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 1137 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 de méthane 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 contenues dans les calottes glaciaires ne confirment pas cette hypothèse. Des analyses des isotopes de foraminifères benthiques et planctoniques (Prokopenko and 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 and 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 de dégagements 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 de 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, pourraient être attribués 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.

#### 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, courbe que nous avons présentée sur la figure 8, indique que des hydrates ne peuvent exister qu'à une profondeur de l'ordre de 200 m lorsque la température moyenne annuelle est de  $-10^{\circ}\text{C}$  et à la profondeur de 130 m environ lorsque la température est de  $-20^{\circ}\text{C}$ .

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 atteigne 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 consi-

dérables 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, lors des 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 and 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 enregistrées dans le pergélisol avec des débits variant de 50 à 14.000 m<sup>3</sup> 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 and 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. Sur base des observations faites dans une région de 20 km<sup>2</sup> du champ de gaz Bovanenko, ils arrivent à une valeur de  $100 \times 10^9$  m<sup>3</sup>, 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 maximums 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 que nous avons déjà mentionné (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 12, le réchauffement des eaux marines induira, 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 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 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 2400 à 3200 km<sup>3</sup> de sédiments et a affecté une surface de 95.000 km<sup>2</sup> (Haflidason *et al.*, 2005). Il se serait produit à différents moments mais le principal événement serait survenu entre 7250 +/- 250 <sup>14</sup>C ans BP et 8100 +/- 250 ans <sup>14</sup>C 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).

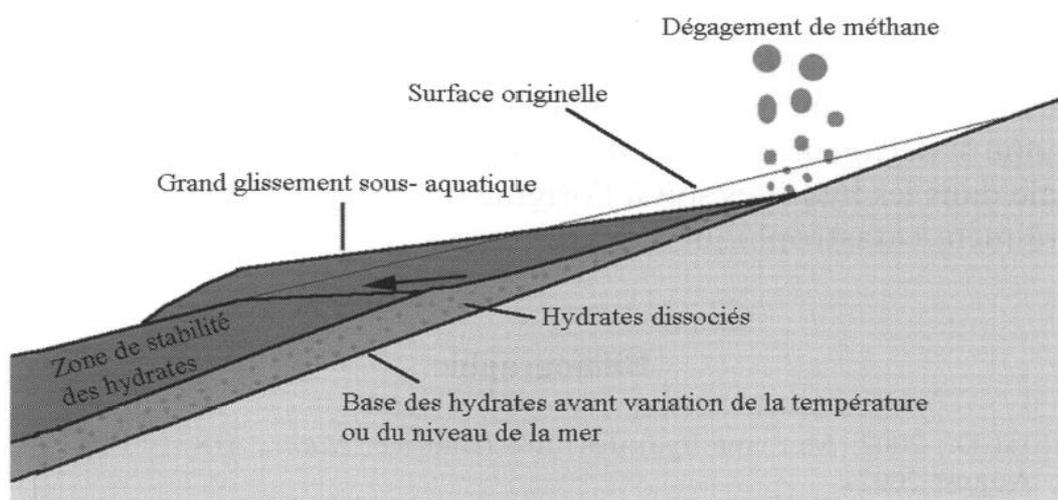


Fig. 12. – Le réchauffement du fond marin et/ou l'abaissement du niveau marin entraînent la dissociation des hydrates à la partie inférieure de leur zone de stabilité. Cela engendre un dégagement local de méthane à la limite supérieure de la zone de stabilité et peut provoquer des glissements de terrain sous-marins en raison de la disparition des hydrates qui cimentent les formations et de l'apparition de gaz dans les sédiments inférieurs qui provoque leur liquéfaction.

## 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 prévu par les modèles était attendu pour beaucoup plus tard de telle sorte que les observations de Bryden *et al.* (2005) ont surpris beaucoup de spécialistes. Ces observations devraient cependant être confirmées avant d'annoncer un danger proche. Il n'empêche qu'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 !**

## 5. Conclusion générale

Les conséquences du réchauffement climatique sont toujours mal connues. Il est certain que la fonte de la glace du sol créera de graves problèmes pour les constructions et les infrastructures des

régions où existe un pergélisol. Le dégagement du carbone stocké dans les sols arctiques pourrait accroître considérablement l'effet de serre dû aux activités humaines. Enfin, il est possible qu'à long terme le dégagement du méthane accumulé en quantité phénoménale dans les hydrates soit à l'origine d'un réchauffement mondial vraiment catastrophique.

### Bibliographie

- ADAM D., 2002. Methane hydrates: fire from ice. *Nature* **418**: 913-914 (29 August 2002).
- ARCTIC COUNCIL (15 leading contributing authors), 2005. *Arctic Climate Impact Assessment (ACIA scientific report)*. Cambridge University Press. 1042 p. (disponible sur internet: <http://www.acia.uaf.edu/pages/scientific.html>).
- BILL J. K., 2003. Economic perspective of methane from hydrate. (p. 349-360) In: *Natural gas hydrate in Oceanic and permafrost Environment*. Max M. D. (ed), Kluwer Academic Publishers, 415 p.
- BROOK E. J., HARDER S., SEVERINGHAUS J. AND 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.
- BROWN J., FERRIANS JR O.J., HEGINBOTTOM J. A., AND MELNIKOV E. S., 1997. *Circum-arctic map of permafrost and ground-ice conditions*. Circum-Pacific map series 45, US Geological Survey, 1/10.000.000.
- BRYDEN H. L., H. R. LONGWORTH AND 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. AND BERNDT C., 2002. Geological controls on the Storgga gas-hydrate system of the mid-Norwegian continental margin. *Earth and Planetary Science Letters*, **209**, (3-4): 291-307.
- BUFFET B. AND 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. AND 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. AND 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.

- DICKENS G.R., 2003. Rethinking the global carbon cycle with a large, dynamic and microbially mediated gas hydrate capacitor. *Earth and Planetary Science Letters*, **213** (3-4): 169-183.
- FRENCH H. M., 1996. *The periglacial environment*. Second edition. Longman, 341 p.
- HAFLLIDASON H., LIEN R., SEJRUP H. P., FORSBERG C. F. AND 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., AND SPERO H.J. 2004. 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. AND 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. AND 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. ET DALLIMORE S.R., 2001. Natural gas hydrate studies in Canada. *Canadian Society of Exploration Geophysicists*, GSEG Recorder, May 2001, **26**: 11-20.
- IPCC 1996. *Second Assessment Report. The Science of Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge.
- JAHREN A. H., CONRAD X.C. P., ARENS N. C., MORA G. AND LITHGOW-BERTELLONI C, 2005. A plate tectonic mechanism for methane hydrate release along subduction zones. *Earth and Planetary Sciences Letters*, August 2005, **236** (3-4), 691-704.
- KENNETT J., CANNARIATO K. J., HENDY I. L. AND 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 gas hydrate: background and history of discovery. Chapter 2 (p.9-16) In: *Natural gas hydrate in Oceanic and permafrost Environment*. Max M. D. (ed.) Kluwer Academic Publishers, 415 p.
- KVENVOLDEN K. A. AND BARNARD L. A., 1983. Hydrate of natural gas in continental margins. Dans: Watkins J. S. and Drake C. L. (eds). *Studies on continental margins geology*: American Association of petroleum geologists, Memoir **34**, 631-640.
- KVENVOLDEN K.A. AND LORENSEN T. D., 2000. *Aglobal inventory of natural gas hydrate occurrence*. U.S.G.S. Science for a changing world. Internet.
- QUADFASSEL D., 2005. Oceanography: the Atlantic heat conveyor slows. *Nature*, **438**: 565-566 (1 December 2005).
- LERCHE I. AND 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. AND 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.
- MACK M. C., SCHUUR E. A. G., BRET-HARTE M. S., SHAVER G. R. AND CHAPIN III F. S., 2004. Ecosystem carbon storage in arctic tundra reduced by long-term nutrient fertilization. *Nature*, **431**, 440-443 (23 September 2004).
- MAJOROWICZ J. A. AND HANNIGAN P. K., 2000. Stability Z-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. AND 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. AND THOMAS E., 2003. Balancing the deglacial global carbon budget: the hydrate factor. *Quaternary Science Reviews*, **22**: 1729-1736.
- MILKOV A. 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).
- PISSART, A., 1994. À propos des conséquences du réchauffement climatique dans les régions où existe un pergélisol. *Bulletin de la Classe des sciences de l'Académie royale de Belgique*, 6<sup>e</sup> série, t. V, 7-12: 279-308.
- PISSART, A., 1998. Les traces de buttes périglaciaires des Hautes Fagnes et le climat du dernier Dryas (13000 et 11450 ans avant aujourd'hui). *Bulletin de la Classe des sciences de l'Académie royale de Belgique*, 6<sup>e</sup> série, t. IX, 7-12: 403-437.
- PROKOPENKO A. A., AND 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., PINKSTON J. AND 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. AND BERG K., 2004. 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*, 6<sup>e</sup> série, t. XV, 1-6: 23-31.

- SVENSEN H., PLANKE S., SORENSSEN A. M., JAMTVEIT B., MYKLEBUST R., EIDEN, T. R. AND 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).
- WALTER K., CHAPIN T. ZIMOV S., DRALUK D., AND CHANTON J., 2004. Global warming feedbacks of methane bubbling along expanding North Siberian lake margins. *American water Ressource Association, Alaska section Conference*, Fairbanks , 6-8 April 2004 (internet).
- WASHBURN A. L., 1979 . *Geocryology. A survey of periglacial processes and environments*. EDWARD ARNOLD , 406 p.
- WHELAN J., EGLINTON L., CATHLES III L., LOSH S. AND 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. AND 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. AND CHUVILIN E.M. 2000. Natural gas and gas hydrates accumulations within permafrost in Russia. *Cold Regions Science and Technology*, **31** (3): 189-197.