

Le réchauffement climatique et ses conséquences sur le pergélisol

Albert Pissart

Professeur émérite à l'Université de Liège

ABSTRACT

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 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.

Climatic warming will be greater in Arctic than anywhere else in the world and will occur primarily in the winter. Three consequences of warming on permafrost are considered. First, ground ice in the permafrost will melt, resulting in damage to existing infrastructure. This will occur first near the permafrost southern limit as winters warm and later throughout the Arctic as summer temperatures increase. Such melting cannot be halted or easily controlled by human intervention. Second, the active layer is likely to increase in thickness, resulting in the thaw of organic matter which is currently frozen within the top of the permafrost. The subsequent decomposition of this organic material will produce large amounts of CO₂ which will amplify global warming. Third, large deposits of methane hydrates have accumulated in permafrost and beneath the ocean floor. The hazard associated with future outgassing due to global warming is considerable because methane is itself an important greenhouse gas. However, hazard potential is difficult to evaluate because the distribution of methane within permafrost is still poorly understood. It appears that this hazard is real, but not immediate.

Introduction

A) LE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE

Depuis la publication de l'IPCC 2001 qui mentionnait que les données du 20ème 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). Etabli par les meilleurs spécialistes des régions arctiques, il constitue une excellente synthèse de ce que l'on connaît aujourd'hui sur le réchauffement de l'Arctique et sur ses conséquences. Il faut évidemment se reporter aussi au nouveau rapport de l'IPCC 2007 pour prendre en compte les données les plus récentes à ce sujet.

Bien qu'il reste des incertitudes, les modèles et les observations montrent : 1) que l'Arctique subit et subira le réchauffement le plus important de toute la Terre, 2) que le réchauffement est et sera très inégal et qu'il est abusif de vouloir considérer l'Arctique comme un ensemble uniforme, 3) que le réchauffement se produit et se produira surtout pendant l'hiver, 4) que les précipitations hivernales (neige) varieront selon les endroits mais seront, en beaucoup d'endroits, plus élevées que maintenant.

Ces caractères du réchauffement auront la plus grande influence sur l'évolution du pergélisol que nous allons considérer maintenant.

B) LE PERGELISOL

Le pergélisol couvre environ 1/5 des terres émergées (**figure 1**). 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. Par ce dernier terme, on désigne la couche superficielle qui gèle et qui dégèle chaque année (**figure 2**). On distingue du Nord au Sud, les zones de pergélisol continu, de pergélisol discontinu et de pergélisol sporadique. 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, la nature du sol... jouent aussi des rôles importants (Pissart, 1987). Le pergélisol existe sur la côte est du Canada jusqu'à la latitude de 50° N, soit la latitude du Nord de la France. L'épaisseur du pergélisol peut être considérable, elle dépasse plus de 1 000 m en plusieurs endroits de Sibérie.

Figure 1. Carte de la distribution du pergélisol de l'hémisphère nord d'après la carte de J. Brown *et al.* (1997).

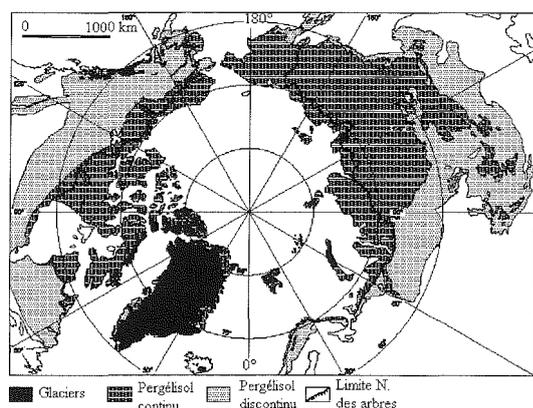
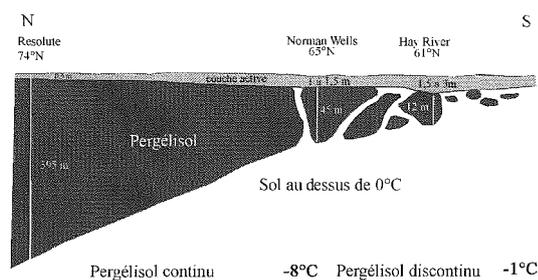


Figure 2. Coupe N-S au travers du Canada montrant l'épaississement du pergélisol vers le Nord et l'amincissement de la couche active dans la même direction. Pour la couche active, les indications de cette figure ne sont que des moyennes car l'épaisseur de cette couche varie énormément selon les conditions locales et notamment la teneur en eau du sol. La figure montre aussi ce que l'on entend par pergélisol continu et discontinu. A la limite sud du pergélisol discontinu, les îlots de pergélisol deviennent rares et l'on parle pour cette zone de pergélisol sporadique. La température moyenne de l'air de -8°C correspond approximativement avec la limite du pergélisol continu (d'après R. Brown, 1970).



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. En conséquence lorsque cette glace fond, le sol s'affaisse.

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'infiltrent dans ces fissures et ne tardent pas à y geler. Comme les fissures s'ouvrent à la même place d'années en années, 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 l'Arctique.

3) La glace de ségrégation (dont les pipkrakes sont une forme connue par tous) est très fréquente dans la partie supérieure du pergélisol : elle soulève les formations qui la surmontent sans ordinairement donner naissance à une morphologie particulière. Des morphologies spéciales n'existent que dans la zone du pergélisol discontinu où elle forme des buttes dénommées palses et lithalses (Pissart, 1994). Il s'agit de buttes qui peuvent atteindre jusqu'à 10 m d'élévation.

4) La glace d'injection est responsable des pingos, buttes périglaciaires qui atteignent parfois près de 50 m d'élévation dans le delta du Mackenzie. Ils sont dus à l'injection d'eau sous la butte de glace à la suite de l'augmentation de volume en profondeur d'eau qui se transforme en glace. Cette eau soulève le pingo et gèle à son tour. La glace qui résulte de ce phénomène, s'appelle glace d'injection bien que ce soit de l'eau qui ait été injectée.

5) Des glaces enfouies très diverses existent aussi dans les régions à pergélisol. Il s'agit de glaces diverses, provenant de l'enfouissement de neiges, de glaces de glacier, de rivière, de lac... qui ont été recouvertes par des sédiments.

Ces diverses glaces du sol fondront si la température du sol s'élève au-dessus de 0 °C. Les zones où existent ces glaces 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.

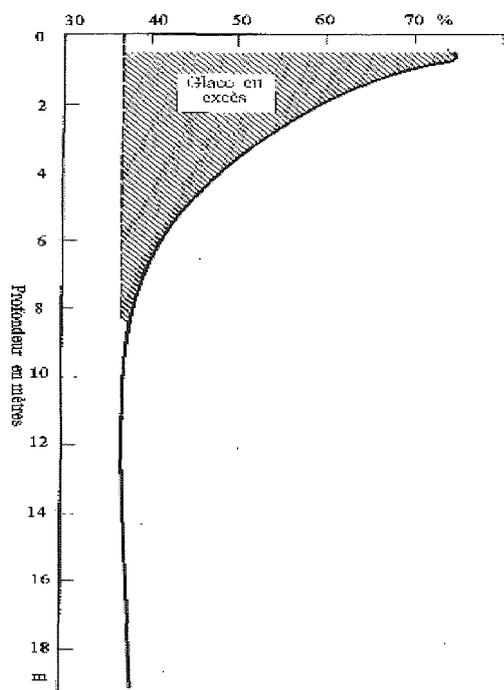
2. LE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE ET LA FUSION DE LA GLACE DU PERGELISOL

LA FRAGILITE DU PERGELISOL

Comme la plus grande quantité de glace du sol se trouve au sommet du pergélisol (**figure 3**), 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 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.

Figure 3. 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 montre que les phénomènes thermokarstiques apparaissent dès le réchauffement du sommet du pergélisol.

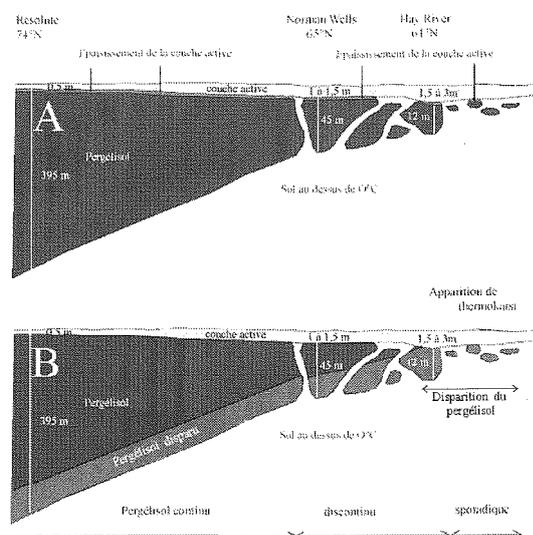


Le réchauffement climatique actuel est observé principalement pendant l'hiver comme nous l'avons mentionné précédemment. Il en résulte qu'une fonte générale de la glace du sommet du pergélisol n'est pas en cours actuellement. Si le réchauffement se produisait l'été, la couche active s'épaississant, des phénomènes thermokarstiques apparaîtraient partout (**figure 4A**). Comme le réchauffement est essentiellement hivernal, la température du pergélisol s'élève mais sans affecter pratiquement l'épaisseur de la couche active. A long terme, ce réchauffement hivernal engendrera une diminution de l'épaisseur du pergélisol par disparition de sa partie inférieure (**figure 4B**). 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.

Figure 4. 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.



LES MESURES DE PREVENTION POUR LIMITER LES PHENOMENES 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 construites sur pilotis pour empêcher que la chaleur des constructions ne se transmette au sol sous-jacent. L'hiver, la circulation de l'air froid sous les bâtiments maintient le sol gelé. Par ailleurs, l'ombre des bâtiments eux-mêmes protège en été le sol de toute insolation directe.

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 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. A 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 RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE VA-T-IL PROVOQUER LE DEGAGEMENT DE GRANDES QUANTITES DE CO₂ PROVENANT DES SOLS ARCTIQUES?

Depuis le retrait des calottes glaciaires, les sols arctiques constituent un puits pour le CO₂ 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 (1 Gt = 10⁹ t), soit à peu près l'équivalent du carbone contenu dans l'atmosphère, sont actuellement stockés dans les sols arctiques.

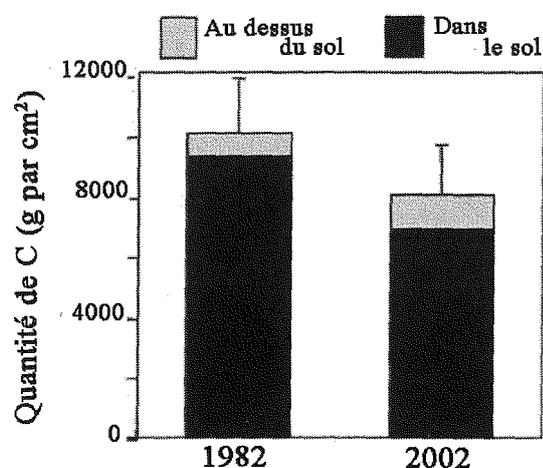
Dans quelle mesure le réchauffement climatique va-t-il, en amplifiant l'action des microorganismes, libérer sous forme de CO₂ ce carbone contenu dans les sols? La réponse n'est pas évidente car une action antagoniste se développera simultanément: le volume de la

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, Chapitre 7, pp. 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 m² 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 5**, que du CO₂ provenant du sol a été dégagé dans l'atmosphère.

Figure 5. 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 CO₂ a été dégagé (Mack *et al.*, 2004).



Un consensus entre les scientifiques n'existe pas sur cette question importante. Certains scientifiques pensent toutefois que le CO₂ provenant des sols arctiques à la suite du réchauffement climatique pourrait être aussi important que le dégagement de CO₂ provenant des combustibles fossiles.

4. LIBERATION POSSIBLE DE METHANE CONTENU DANS LES HYDRATES A LA SUITE DU RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE ?

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

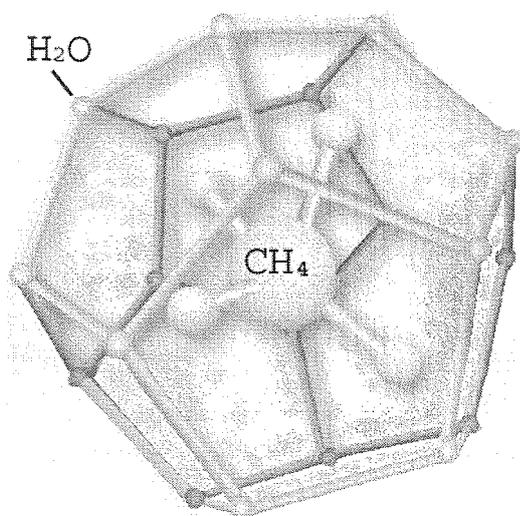
Le méthane est un gaz à effet de serre puissant. Il est plus actif que le CO₂ avec un potentiel de réchauffement 21 fois supérieur sur 100 ans (en tenant compte des effets indirects comme la vapeur dans la stratosphère, ... IPCC, 1996). Actuellement, il intervient pour 17 % dans l'effet de serre (communication 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 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 2007, il y a 210 000 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 5 000 Gt (1 Gt = 10⁹ t) accumulés dans les réserves connues de charbon, de pétrole, et de gaz naturel et 10 000 Gt de carbone dans les hydrates. Bien que toujours reproduite dans les publications, cette estimation de Kvenvolden (1988) a été contestée et considérablement réduite dans une publication récente qui estime que la quantité de carbone des hydrates est comprise entre 500 et 2 500 Gt (Milkov, 2004). Buffet and Archer (2004) pour leur part, estiment que sous les océans, 3 000 Gt de carbone existent dans les hydrates et 2 000 Gt sous forme de gaz. Il est clair qu'aujourd'hui n'existent que des estimations peu précises des quantités totales, mais il ne fait pas de doute que la quantité de méthane accumulée dans les hydrates est extrêmement importante.

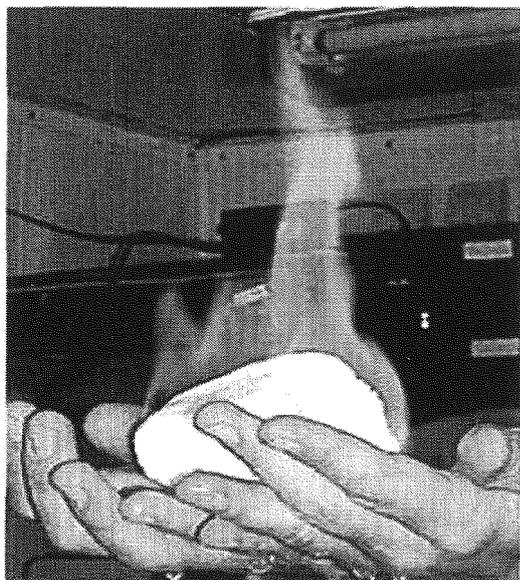
Les hydrates de gaz, qui sont des clathrates, sont constitués de cages de glace dans lesquelles est emprisonné un gaz (**figure 6**).

Figure 6. Structure des hydrates de méthane. Les molécules de méthane (CH₄) sont enfermées dans des cages formées par une structure de molécules d'eau (H₂O), sans qu'aucun lien chimique n'existe entre les molécules des deux corps.



Dans les hydrates de méthane, il n'y a aucun lien chimique entre H₂O et CH₄. La fusion de la cage de glace libère le méthane emprisonné qui s'y trouve en grande quantité (**figure 7**) puisque le volume du gaz libéré occupe (à 0 °C et 160 mm de Hg) environ 170 fois le volume des hydrates dont il provient.

Figure 7. Les hydrates de méthane sont appelés familièrement la glace qui brûle. Sur cette photo, un bloc de méthane à la température ordinaire et à la pression atmosphérique se décompose en libérant du méthane et de l'eau qui apparaît sur les mains tenant l'hydrate. Le méthane est, sur cette photo, en feu.

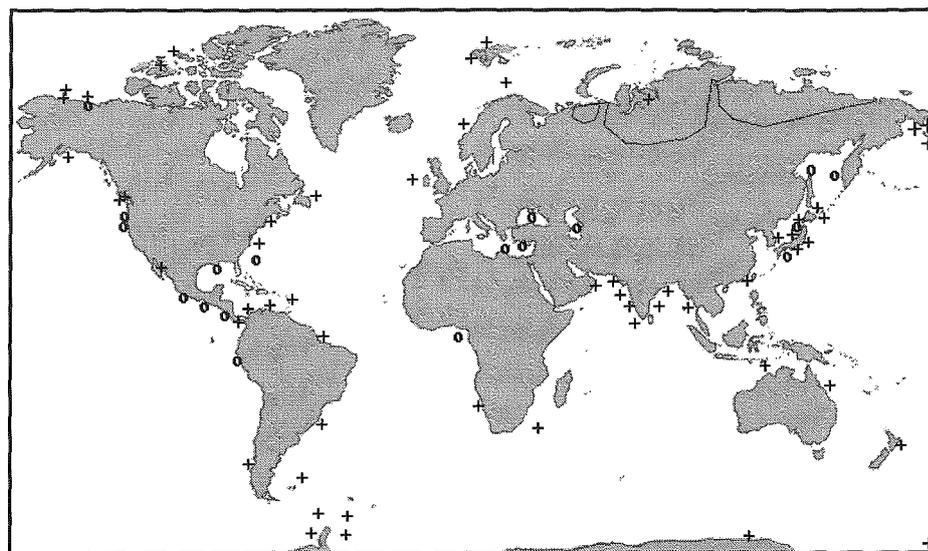


Le méthane des hydrates a pour origine le plus souvent la décomposition des matières organiques accumulées dans les sédiments (il existe quelquefois, mais rarement, du méthane d'origine profonde, thermogénique qui résulte de la décomposition par la chaleur du kérogène ou du pétrole). Le méthane libéré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

La **figure 8** localise les endroits où dans le monde des hydrates ont été reconnus. Sur les continents, ils ne sont présents que lorsque existe un pergélisol. Aussi, pour rester dans le domaine du périglaciaire, nous ne parlerons plus maintenant que des hydrates existant sur les continents en mentionnant seulement que ce sont les mêmes conditions de température et de pression qui expliquent la présence des hydrates sous la mer.

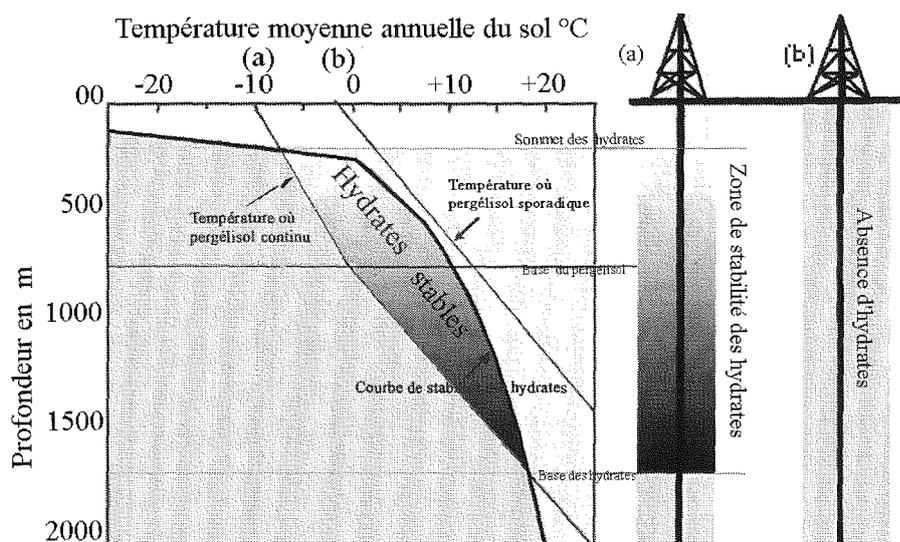
Figure 8. Carte donnant la localisation des endroits où des hydrates de méthane ont été reconnus dans le monde. Les sigles **o** indiquent les endroits où des échantillons d'hydrates ont été extraits dans des sondages tandis que les sigles **+** indiquent les endroits où la présence d'hydrates est déduite 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). De nombreux autres gisements ont été découverts depuis la réalisation de cette carte.



Pour comprendre la répartition de ces hydrates, il faut considérer les conditions de stabilité de ces matériaux, conditions qui sont déterminées par la température et la pression. La **figure 9** 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.

Figure 9. Zone de stabilité des hydrates de méthane dans les régions où existe un pergélisol. La courbe de stabilité des hydrates contrôlée par la température et la pression, est dessinée par un trait gras. En (a) sur la figure, la température moyenne annuelle en surface est de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 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 également 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 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 (d'après Hyndman et Dallimore, 2001, **figure 3** modifiée).



Si on considère la situation où la température moyenne annuelle est en surface de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (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 sont de plus en plus présents. Cette zone comprend l'épaisseur du pergélisol à partir d'une profondeur de plus de 100 m (environ 150 m d'après Kvenvolden, 2003), mais aussi une zone sous le pergélisol. L'épaisseur totale des sédiments où les hydrates de méthane sont stables, atteint ici plus de 1 600 m.

Si la température moyenne à la surface est un peu inférieure à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, la même **figure 9** 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.

EXPLOITATION PROCHAINE DES HYDRATES DE METHANE

L'utilisation du méthane comme combustible est intéressante car, par rapport au charbon et au pétrole, il produit moins de CO_2 . D'autre part, le gaz brûle proprement et entraîne peu de problèmes de pollution (Bill, 2003).

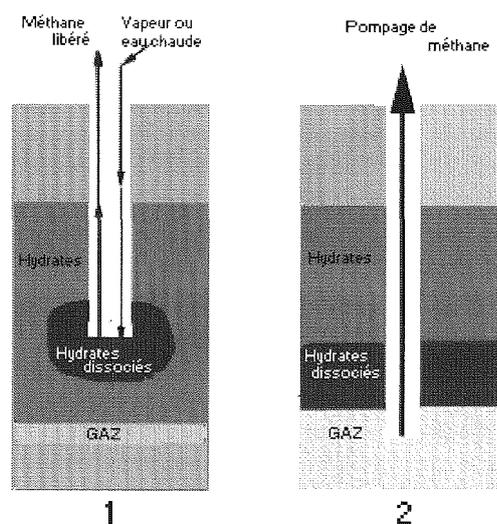
Des sommes très considérables sont investies par des compagnies privées et aussi des états pour étudier les possibilités d'exploitation du méthane contenu dans les hydrates. Les recherches sont avancées au point que l'exploitation commerciale commencera entre 5 et 10 ans. Et l'intérêt

pour les hydrates n'arrête pas d'augmenter (Chatti *et al.*, 2005). Des essais d'exploitation des hydrates du pergélisol ont été réalisés en 2002 à Mallik sur la côte nord du Canada près de la frontière avec l'Alaska. Ils ont montré les possibilités d'exploiter le méthane des hydrates par deux méthodes (**figure 10**). 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 GNOC), the GeoForschungsZentrum Potsdam, Germany (GFZ), the Geological Survey of Canada (GSC), the United States Geological Survey (USGS), the United States Department of the Energy (USDOE), the India Ministry of Petroleum and the Natural Gas (MOPNG) and the Chevron-BP-Burlington JOIDt venture group). A la suite de ces essais, les points de vue ont changé et Art Johnson (Hydrate Energy International) à la 4ème Conférence internationale sur les hydrates, (9 à 11 mai 2005 à Victoria, BC Canada), a opposé les vues anciennes aux perspectives qui se présentent actuellement (voir sur internet sa présentation PowerPoint). 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 DEGAZAGES DES HYDRATES DE METHANE CONNUS DANS LE PASSE

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'évènement le plus récent est survenu à la limite Paléocène/Eocène, il y a 55,5 millions d'années. Les isotopes du carbone de carbonates marins et du carbone organique terrestre montrent en effet à cette époque une abondance anormale de ^{12}C par rapport au ^{13}C . Cette excursion négative du $\delta^{13}\text{C}$ dont l'importance est de plus de 2,5 ‰ ne peut être expliquée que par la libération de grandes quantités de carbone organique qui se trouvait dans des hydrates (Dickens, 2003). Le changement climatique a été global et rapide (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.

Figure 10. 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 excursions semblables de 8^{13}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).

Des dégagements se sont aussi produits pendant le Quaternaire mais leur importance n'a pas été comparable aux événements géologiques anciens que nous venons d'évoquer. Certains auteurs (Nisbet, 2002) ont voulu attribuer les déglaciations au relâchement du méthane, mais les analyses de la composition ancienne de l'atmosphère à partir des bulles de gaz contenues dans les calottes glaciaires ne confirment pas cette hypothèse. 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 du méthane a été relâché aux latitudes élevées de l'hémisphère Nord et l'hypothèse que la déstabilisation des hydrates ait contrôlé les variations atmosphériques de méthane a été proposée (Kennett *et al.*, 2003).

Actuellement, on est toutefois incapable dans tous les événements que nous venons d'invoquer de préciser la part du dégazage des hydrates de méthane provenant des zones à pergélisol.

LES DANGERS DE DEGAZAGE DES HYDRATES DE METHANE A LA SUITE DU RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE ACTUEL

Certains risques sont liés aux hydrates reposant sur le fond océanique mais nous examinerons seulement ici ceux provenant des hydrates accumulés dans et sous le pergélisol.

Pour ces hydrates, il faut rappeler que la courbe de stabilité des hydrates de méthane ne contenant que du méthane que nous avons présentée sur la **figure 9** indique que des hydrates ne peuvent exister qu'à une profondeur de l'ordre de 200 m lorsque la température moyenne annuelle est de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ et à la profondeur de 130 m environ lorsque la température est de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Etant 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 considérables qui pourrait s'être échappé par des fractures au travers de la zone de stabilité des hydrates. Peu de renseignements existent sur ces nappes de gaz car il est de pratique courante dans les sondages de forer aussi vite que possible au travers du pergélisol sans réaliser la moindre étude. Le dégagement de gaz pendant les forages est par ailleurs empêché par l'usage de boues de sondages très denses. Yakushev 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 m³ par jour. La majorité des zones d'où provenaient les gaz se trouvaient à des profondeurs variant entre 50 et 120 m c'est-à-dire au-dessus de la zone de stabilité des hydrates de méthane. D'autres exemples de dégagements de gaz en dehors de la zone de stabilité des hydrates sont donnés par les mêmes auteurs dans des placers d'or de la Kolyma, dans des régions de Chukotka où le pergélisol est épais de 150 à 350 m, ainsi que dans la région de l'Amour où des venues de gaz sont apparues à des profondeurs de 20 à 300 m. Indépendamment du méthane provenant des hydrates, la fonte du pergélisol superficiel libérera donc du méthane non seulement à partir du développement de lacs thermokarstiques (Walter *et al.*, 2004 ; Christensen *et al.*, 2004) mais aussi à partir de nappes de méthane 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. Ils arrivent, sur la base des observations faites dans une région de 20 km² du champ de gaz Bovanenko, à une valeur de 100 .10⁹ m³, quantité qui pourrait selon eux augmenter la température des régions polaires nordiques de 1 à 1,5 °C. Les observations à partir desquelles cette estimation a été réalisée sont toutefois très limitées et celle-ci doit être considérée avec circonspection.

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 pour les hydrates sous la mer, en cas de changement de la circulation océanique. Un tel changement de la circulation thermohaline, prévu par les modèles était attendu pour beaucoup plus tard de telle sorte que les observations de Bryden *et al.* (2005) annonçant une réduction de cette circulation dans l'Atlantique Nord ont surpris beaucoup de spécialistes. Ces observations devraient cependant être confirmées avant d'annoncer un danger proche. Il n'empêche un risque réel existe mais probablement à long ou à très long terme.

Toutefois, notre ignorance quant à la distribution des hydrates et du méthane reste grande spécialement dans les zones à pergélisol et des surprises sont toujours possibles !

5. CONCLUSION GENERALE

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.

Références bibliographiques

- 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) - Economie perspective of methane from hydrate. (p. 349-360) In: *Natural gaz hydrate in Oceanic and permafrost Environment*. Max M.D. (ed), Kluwer Academic Publishers, 415 p.
- Brook E.J., 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, R.J.E. (1970) - *Permafrost in Canada*. Toronto, University Toronto press, 234 p.
- Bryden H.L., Longworth H.R. and Cunningham S.A. (2005) - Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25° N. *Nature*, 438, 655-657.
- Buffet B. and Archer D. (2004) - Global inventory of methane clathrate: sensitivity to changes in the deep ocean. *Barth 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., Åkernan J., Mastepanov M., Malmer N., Friborg T., Crill P., Svensson B.H. (2004) - Thawing subarctic permafrost: Effects on vegetation and methane emissions, *Geophysical Research Letters*, 31, 4, L04501.
- Dickens G.R. (2003) - Rethinking the global carbon cycle with a large, dynamic and microbially mediated gas hydrate capacitor. *Barth and Planetary Science Letters*, 213, 3-4, 169-183.
- French H.M. (1996) - *The periglacial environment*. Second edition., Longman, 341 p.
- Hyndman. D. et Dallimore S.R. (2001) - Natural gas hydrate studies in Canada. *Canadian Society of Exploration Geophysicists, GSEG Recorder*, May 2001, 26, 11-20.
- 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.
- Lerche I. and Noeth S. (2003). Hydrate composition from seismic data. An inverse procedure. *The oil and gas review*, 2, 101–103.
- Mack M.C., Schuur E.A.G., Brett-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.
- Marojowicz 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.
- Milkov A.V. (2004) – Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there. *Barth-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.
- Pissart A. (1987). *Géomorphologie Périglaciaire*. Texte des leçons de la Chaire Francqui belge 1987. Edition du laboratoire de Géomorphologie et Géologie du Quaternaire de l'Université de Liège, 135 p.
- Pissart A. (1994) A 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*, 7–12, 279–308
- Pissart A. (2005) Pergélisol et réchauffement climatique : la glace du sol, le CO₂ de sols arctiques et les hydrates de méthane. *Bulletin de la classe des Sciences, Académie royale de Belgique*, 6ème série, Tome XVI, 289–321.
- Pissart A. (2006) – Les hydrates de méthane : réserve énorme d'énergie et danger climatique potentiel. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 48, 7–17.
- Walter K, Chapin, T. Zirnov S., Draluk D. and Chanton J. (2004) – Global warming feedbacks of methane bubbling along expanding North Siberian lake margins. *American water Resource Association, Alaska section Conference*, Fairbanks, 6–8 April 2004.
- 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.