SUMMARY

S.R. Dallimore, T.S. Collett, and T. Uchida

In February and March of 1998, a 1150 m deep gas hydrate research well, JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38, was completed at the northeastern edge of the Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. This project brought together researchers from North America and Japan to undertake the first investigation of a natural gas hydrate occurrence beneath permafrost that included extensive dedicated coring and associated engineering and scientific studies. Natural gas hydrate occurrences are known to represent a significant hydrocarbon reservoir in many arctic basins; however, prior to Mallik 2L-38, almost no field research had been undertaken to evaluate their in situ properties. While gas hydrate may represent a significant energy source for the future, it also poses a potential safety hazard to conventional oil and gas drilling in arctic areas. More recently, concern has been expressed that gas hydrate may constitute a significant source of additional greenhouse gas, which, if released to the atmosphere, may exacerbate future global climate warming.

This volume presents the scientific results from the Mallik 2L-38 well program. It is intended to provide a multidisciplinary overview of the nature and occurrence of gas hydrate in the well, as well as assess regional issues related to gas hydrate occurrence in the Mackenzie Delta area. The first four papers provide an operations overview of the Mallik 2L-38 research-well project and introduce the regional geology, gas hydrate setting, and ground-thermal conditions of the Mackenzie Delta region. The core-studies sections of the volume comprise 19 papers that provide a comprehensive review of the core data collected in the Mallik well. The first four core-study-related papers deal with sedimentological and paleontological studies and, for the first time, review the biostratigraphy of cores from the late Tertiary sediments from the outer Mackenzie Delta. The next 15 core-study-related papers provide a wide-ranging review of the physical properties, geochemistry, and detailed characteristics of gas-hydrate-bearing sediments. Five downhole-geophysical papers are presented in a separate section. Finally, the implications of the Mallik gas hydrate occurrence are summarized in three papers: one of which reviews the characteristics of the gas hydrate accumulations in the Mallik area, one discusses the production potential of the Mallik reservoir, and one presents a modelling assessment of the stability of the gas hydrate occurrences at Mallik with respect to possible future climate warming.

This summary provides a general overview of scientific accomplishments from the Mallik 2L-38 well with emphasis on the new information presented on the in situ gas hydrate occurrences.

SOMMAIRE

S.R. Dallimore, T.S. Collett, and T. Uchida

En février et mars 1998, un puits de recherche sur les hydrates de gaz de 1 150 m de profondeur, le puits JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38, a été achevé à la bordure nord-est du delta du Mackenzie, dans les Territoires du Nord-Ouest, au Canada. Ce projet a rassemblé des chercheurs d'Amérique du Nord et du Japon dans le but d'entreprendre les premières recherches sur un indice d'hydrates de gaz naturels sous le pergélisol, recherches comportant de vastes travaux spécialisés de carottage et des études techniques et scientifiques associées. Il est bien connu que les indices d'hydrates de gaz naturels constituent un important réservoir d'hydrocarbures dans de nombreux bassins arctiques; toutefois, avant le projet Mallik 2L-38, presque aucune recherche de terrain n'avait été entreprise dans le but d'évaluer leurs propriétés en place. Bien que les hydrates de gaz puissent représenter une importante source d'énergie pour l'avenir, ils présentent également des risques pour le forage de pétrole et de gaz classiques dans les régions arctiques. Plus récemment, on a soulevé la possibilité que les hydrates de gaz puissent constituer une importante source de gaz à effet de serre supplémentaires, lesquels, s'ils se diffusaient dans l'atmosphère, pourraient aggraver le réchauffement climatique futur de la planète.

Ce volume présente les résultats scientifiques du programme de sondage Mallik 2L-38. Ses auteurs ont voulu fournir un aperçu multidisciplinaire de la nature et de l'existence d'hydrates de gaz dans le puits, ainsi qu'évaluer les questions régionales liées à la présence d'hydrates de gaz dans la région du delta du Mackenzie. Les quatre premiers articles présentent un survol des opérations du projet de puits de recherche Mallik 2L-38 et décrivent la géologie régionale, le contexte des hydrates de gaz et les conditions thermiques des sols de la région du delta du Mackenzie. Les sections du volume consacrées à l'étude des carottes comprennent 19 articles qui présentent un résumé complet des données de carottage recueillies au puits Mallik. Les quatre premiers articles consacrés à l'étude des carottes traitent d'études sédimentologiques et paléontologiques et, ce qui constitue une première, passent en revue la biostratigraphie des carottes prélevées dans les sédiments du Tertiaire tardif de la partie externe du delta du Mackenzie. Les 15 articles suivants consacrés à l'étude des carottes fournissent un aperçu élargi des propriétés physiques, de la géochimie et des caractéristiques détaillées des sédiments renfermant des hydrates de gaz. Cinq articles sur la géophysique en sondage sont inclus dans une section distincte. Enfin, les conséquences de l'indice d'hydrates de gaz de Mallik sont résumées dans trois articles qui présentent les caractéristiques des accumulations d'hydrates de gaz dans la région de Mallik, le potentiel productif du réservoir de Mallik et une évaluation modélisée de la stabilité des indices d'hydrates de gaz à Mallik au regard du réchauffement climatique futur possible.

Le présent sommaire fournit un aperçu général des réalisations scientifiques liées au puits Mallik 2L-38, l'accent étant mis sur les nouvelles informations portant sur les indices en place d'hydrates de gaz.

Outline of the Mallik 2L-38 Research Program

Two fundamental objectives were established for the Mallik 2L-38 research-well program. The Japan National Oil Corporation (JNOC), the Japan Petroleum Exploration Company (JAPEX), and other participating organizations from Japan sought to undertake a variety of verification studies in preparation for exploration drilling (in 1999) of gas hydrate deposits in the Nankai Trough, offshore of Japan's eastern coast. These included the evaluation of technologies related to gas hydrate drilling, geophysics, casing, and production at an onshore site with known gas hydrate occurrences. In addition, a long-standing interest in gas hydrate occurrences in permafrost settings led the Geological Survey of Canada (GSC) and the United States Geological Survey (USGS) to propose a comprehensive science program to quantify the geological, geophysical, geochemical, and engineering properties of an arctic gas hydrate occurrence. Following a long review process, a site for the gas hydrate research well was selected near Imperial Oil Mallik L-38, an existing industry exploration well drilled in 1972.

The Mallik 2L-38 well was completed in 39 days using a conventional arctic exploration drill rig. Surface logistics were established by a winter ice road that was constructed along channels of the Mackenzie River. Initially, a surface hole was drilled to a depth of 687 m, and eight coring runs were successfully conducted within the permafrost interval (0–640 m) (all depths were measured from Kelly bushing [8.31 m above sea level]). Subsequently, a 219 mm surface casing was installed and the main hole was advanced to the target depth of 1150 m. Sixteen coring runs were completed below the permafrost interval. A KCL/polymer drilling mud (with a lecithin additive and cooled to ~2°C) effectively stabilized the gas hydrate interval, allowing excellent core recovery and maintaining a near-gauge hole. Four coring systems were utilized, including a pressure-temperature coring device developed by JNOC collaborators, a wireline core system, and two conventional drill-string-deployed core systems. Between 886 and 952.6 m, approximately 37 m of high-quality core were collected to study an interbedded gas hydrate succession which was estimated to extend from 897 to 1110 m. Pore-space gas hydrate and several forms of visible gas hydrate were observed in a variety of sediments. An extensive suite of conventional open-hole well logs were completed, including the platform express array, dipole shear sonic log, formation micro imager, and the array induction tool. A multicomponent vertical seismic profile survey (VSP) was conducted at zero offset, and at a 401 m offset shooting position. In addition to the borehole/core studies, a deep sounding electromagnetic survey was also conducted along an 8 km transect, and regional seismic data were reprocessed to facilitate mapping of the subsurface geology, permafrost, and gas hydrate occurrences in the vicinity of the Mallik 2L-38 site.

Aperçu du programme de recherche Mallik 2L-38

Deux objectifs ont été établis pour le programme du puits de recherche Mallik 2L-38. La Japan National Oil Corporation (JNOC), la Japan Petroleum Exploration Company (JAPEX) et d'autres organismes participants du Japon ont voulu entreprendre diverses études de vérification dans le but de préparer des sondages exploratoires (en 1999) dans des gisements d'hydrates de gaz de la fosse de Nankaï, au large de la côte est du Japon. Parmi les sujets étudiés figurent l'évaluation des technologies liées au forage des hydrates de gaz, à la géophysique, au tubage et à la production à un site sur terre présentant des indices connus d'hydrates de gaz. En outre, un intérêt de longue date portant sur les indices d'hydrates de gaz dans des milieux pergélisolés a amené la Commission géologique du Canada (CGC) et la United States Geological Survey (USGS) à proposer un programme scientifique approfondi afin de quantifier les propriétés géologiques, géophysiques, géochimiques et techniques d'un indice d'hydrates de gaz dans l'Arctique. À l'issue d'un long processus d'examen, un site pour le puits de recherche sur les hydrates de gaz a été sélectionné à proximité du puits Imperial Oil Mallik L-38, puits d'exploration du secteur privé foré en 1972.

Le puits Mallik 2L-38 a été achevé en 39 jours en utilisant une installation de forage traditionnelle pour exploration dans l'Arctique. Les ouvrages de surface ont été installés au moyen d'une route sur glace hivernale construite le long des chenaux du fleuve Mackenzie. Au départ, un trou de surface a été foré jusqu'à une profondeur de 687 m et huit passages de carottage ont été réalisés avec succès au sein de l'intervalle à pergélisol (0–640 m) (toutes les profondeurs sont mesurées à partir du carré d'entraînement de la tige carrée). Un tubage de surface de 219 mm a ensuite été installé et le trou principal a été prolongé jusqu'à la profondeur ciblée de 1 150 m. Seize passages de carottage ont été réalisés sous l'intervalle à pergélisol. Une boue de forage à KCL/polymère (avec un additif à la lécithine et refroidie à environ 2 °C) a stabilisé efficacement l'intervalle à hydrates de gaz, permettant une excellente récupération des carottes et le quasi-maintien du calibrage du trou. Quatre systèmes de carottage ont été utilisés, notamment un dispositif de carottage pression-température développé par les collaborateurs de la JNOC, un système de carottage au câble et deux systèmes de carottage traditionnel déployés par train de tiges. À une profondeur entre 886 et 952,6 m, environ 37 m de carottes de haute qualité ont été prélevés afin de caractériser une succession interstratifiée à hydrates de gaz qui, selon les estimations, s'étendrait de 897 à 1 110 m. Des hydrates de gaz interstitiels et plusieurs formes d'hydrates de gaz visibles ont été observés dans divers sédiments. Une vaste série de diagraphies de puits en découvert traditionnelles a été réalisée, notamment des diagraphies au moyen de la plate-forme Express, des diagraphies soniques de cisaillement dipolaire et des diagraphies par micro-imageur de formation et par outil à induction en réseau. Un profilage sismique vertical à composantes multiples a été effectué à la position zéro et à une position déportée de 410 m. Outre les études des trous de sonde et des carottes, un levé électromagnétique à sondage en profondeur a été effectué le long d'un transect de 8 km et des données sismiques régionales ont été traitées de nouveau afin de faciliter la cartographie de la géologie de subsurface, du pergélisol et des indices d'hydrates de gaz à proximité du puits Mallik 2L-38.

Core studies — geology and biostratigraphy

Sedimentological and biostratigraphic studies were carried out on core and cuttings samples to interpret the age and environments of deposition of the Mallik 2L-38 sediments, and to assess the sediment/gas hydrate relationships. Three distinct sediment facies are described by Jenner et al., for the lower cored interval. The sedimentary succession from 952 to 926.5 m is dominated by a weakly bioturbated clayey silt facies (Cs) with interbeds of low-rank fissile coal and silty sand. Between 926.5 and 908.5 m, a sand-and-gravel facies (Sg) consists of fining-upwards successions of basal, matrix-supported gravel to pebbly sand and fine-grained sand. The uppermost sand and silt facies (Ss), occurring between 908.5 and 886.2 m, is composed of a fining-upward succession of basal fine- to medium-grained sand and interbedded gravel grading into fine-grained sand. A gradational increase in silt content occurs at the top of this sequence. Gas hydrate observed at the drill site immediately after core recovery, and in the sedimentology laboratory 5–7 days later in self-preserved form, occurred primarily in the sands and gravels of facies Ss and Sg. A 1.5 m thick, dolomite-cemented sandstone at the base of facies Sg and the widespread occurrence of authigenic pyrite are interpreted to be indicative of an active geochemical environment and may be related in part to the formation of gas hydrate.

Using the sequence stratigraphic nomenclature developed by others for the Mackenzie Delta–Beaufort Sea area, three sequences were anticipated prior to drilling of the Mallik 2L-38 well. An abrupt change in the geophysical well logs and the drilling properties observed at approximately 350 m depth is interpreted as the contact between the Plio-Pleistocene Iperk Sequence and the Late Oligocene to Middle Miocene Mackenzie Bay Sequence. The depth of the contact between the Mackenzie Bay and the underlying Oligocene Kugmallit Sequence was less well constrained, but was anticipated somewhere between 850 and 950 m, based on regional seismostratigraphic correlations and well-log interpretations. Based on sedimentology, Jenner et al. provisionally considered the base of facies Sg at 926.5 m to represent this sequence boundary. Unfortunately, confirmation of the boundary on the basis of biostratigraphic studies of core and cuttings from Mallik 2L-38 proved to be somewhat problematic, primarily because of concerns over the presence of reworked age-stratigraphic indicator taxa. Foraminiferal studies by McNeil and dinoflagellate studies by Kurita and Uchida revealed only modest occurrences of marine taxa, and those that were present were concluded to be largely reworked and therefore not indicative of the age or environments of deposition of the sediments. However, palynological studies by White revealed a broad continental palynological succession, which, if interpreted to be in situ, would indicate that the lower section of the Mallik 2L-38 well (below 897 m) may be Eocene. If correct, this would imply that the lower sediments are actually much older than regional correlations imply.

Études des carottes — géologie et biostratigraphie

Des études sédimentologiques et biostratigraphiques ont été effectuées sur des échantillons de carottes et de débris de forage afin d'interpréter l'âge et les milieux de dépôt des sédiments du puits Mallik 2L-38 et d'évaluer les liens entre les sédiments et les hydrates de gaz. Trois faciès sédimentaires distincts ont été décrits par Jenner et al. dans l'intervalle carotté inférieur. La séquence sédimentaire de 952 à 926,5 m est dominée par un faciès de silt argileux faiblement bioturbé (Cs) interstratifié de charbon fissile de rang bas et de sable silteux. Entre 926,5 et 908,5 m, un faciès de sable et de gravier (Sg) est composé de séquences à granulométrie décroissante vers le haut qui vont d'un gravier de base à texture non jointive à du sable caillouteux et à du sable fin. Le faciès supérieur de sable et de silt (Ss), entre 908,5 et 886,2 m, comprend une succession à granulométrie décroissante vers le haut composée de sable de base à grain fin à moyen et de gravier interstratifié passant à du sable fin. On note une augmentation progressive de la teneur en silt au sommet de cette séquence. Les hydrates de gaz observés sur le site de forage immédiatement après le prélèvement des carottes et dans le laboratoire de sédimentologie de cinq à sept jours plus tard dans une forme autoconservée, se rencontrent surtout dans les sables et graviers des faciès Ss et Sg. La présence d'un grès à ciment dolomitique de 1,5 m d'épaisseur à la base du faciès Sg et la présence généralisée de pyrite authigène sont interprétées comme indiquant un milieu géochimique actif et sont peut-être associées en partie à la formation d'hydrates de gaz.

D'après la nomenclature stratigraphique des séquences élaborée par d'autres chercheurs dans la région du delta du Mackenzie et de la mer de Beaufort, on s'attendait à observer trois séquences avant le forage du puits Mallik 2L-38. Un changement abrupt dans les diagraphies géophysiques et les propriétés de forage observé à environ 350 m de profondeur est interprété comme représentant le contact entre la Séquence d'Iperk du Plio-pléistocène et la Séquence de Mackenzie Bay de l'Oligocène tardif au Miocène moyen. Le contact entre la Séquence de Mackenzie Bay et la séquence oligocène sous-jacente de Kugmallit est moins bien circonscrit; sur la base de corrélations sismostratigraphiques régionales et d'interprétations diagraphiques, on s'attendait à ce qu'il soit situé entre 850 et 950 m. En se fondant sur la sédimentologie, Jenner et al. admettent provisoirement que la base du faciès Sg à 926,5 m représente la limite de cette séquence. Malheureusement, la confirmation de la limite sur la base des études biostratigraphiques des carottes et des débris de forage du puits Mallik 2L-38 s'est révélée quelque peu problématique, essentiellement en raison de la présence de taxons marqueurs chronostratigraphiques remaniés. Des études sur les foraminifères par McNeil et sur les dinoflagellés par Kurita et Uchida n'ont révélé qu'une présence peu abondante de taxons marins; on estime que ceux qui sont présents ont été largement remaniés et ne sont donc pas révélateurs de l'âge ou des milieux de dépôt des sédiments. Toutefois, des études palynologiques par White ont mis en évidence une large succession continentale; si celle-ci était interprétée comme étant en place, cela indiquerait que la partie inférieure du puits Mallik 2L-38 (au-dessous de 897 m) remonterait à l'Éocène. S'il en était ainsi, cela signifierait que les sédiments inférieurs sont en fait beaucoup plus anciens que ne laissent entendre les corrélations régionales.

Core studies — physical properties

The physical properties of sediments, such as grain size, porosity, and permeability, are known to exert primary controls on the accumulation and stability of gas hydrate. The accuracy of laboratory determinations of these properties and their applicability to field situations are dependent on the amount of disturbance resulting from the coring and the degree of alteration of the sediment properties by processes such as stress relief or gas hydrate dissociation. At the Mallik 2L-38 well, core samples containing gas hydrate were observed to be chilled below freezing because of the endothermic cooling caused by gas hydrate dissociation. Since cores were stored at negative temperatures, and the volume of pore ice was slightly less than the volume of dissociated gas hydrate, no substantive disruption of the sediment fabric was noted in most samples.

Winters et al. present the results of physical property testing conducted mainly in the field, with an emphasis on controlling parameters of water content, pore-water salinity, grain size, and grain density. These data were used to estimate sediment porosity and bulk density. In general, a good correlation is observed between core-measured values and well-log-derived values. Gas hydrate occurs primarily in sandy sediments with a porosity of 32–45% and in gravel with a lower porosity of 23–29%. The non-gas-hydrate- bearing, or low-gas-hydrate-content silts, generally had similar or slightly lower porosities than the sands. The dolomite-cemented sandstone (subfacies Sst) had a porosity less than 5%. These general relationships are confirmed by Katsube et al. who review detailed petrophysical laboratory investigations of porosity, pore-size characteristics, and permeability. The sands were found to have a rather simple framework-supported texture with unimodal pores. The texture model presented for the silts consists of a framework of silt and sands grains with clay matrix filling the intergranular pores and resulting in a complex bimodal pore-size distribution. Thus, while the effective porosity of the sands may be similar to the silts, the average pore size for the silts is many orders of magnitude less. Low permeability measurements indicate limited interconnection of the pores in the silts. Consistent with the sedimentological observations, the silts in facies Ss appear to have somewhat different petrophysical properties than facies Cs. While the pore-structure models suggest a similar framework- supported texture with a clay matrix, the measured pore-size distributions and permeabilities vary. The silts of facies Ss, which directly overlie the shallow gas hydrate occurrence between 897 and 926 m, have very low permeabilities from 2×10^{-19} to 2×10^{-21} m^2 suggesting that they may act as a conventional hydrocarbon seal.

Études des carottes — propriétés physiques

On sait que les propriétés physiques des sédiments telles que la granulométrie, la porosité et la perméabilité exercent une influence déterminante sur l'accumulation et la stabilité des hydrates de gaz. La précision des déterminations en laboratoire de ces propriétés et leur applicabilité aux situations de terrain dépendent du degré de perturbation par les carottages et de la mesure dans laquelle les propriétés des sédiments ont été modifiées par des processus tels que le relâchement des contraintes ou la dissociation des hydrates de gaz. Au puits Mallik 2L-38, on a constaté que des échantillons de carottes renfermant des hydrates de gaz étaient refroidis à des températures inférieures au point de congélation à cause du refroidissement endothermique provoqué par la dissociation des hydrates de gaz. Étant donné que les carottes ont été emmagasinées à des températures négatives et que le volume de la glace interstitielle était légèrement inférieur au volume d'hydrates de gaz dissociés, dans la plupart des échantillons on n'a pas observé une perturbation marquée de la fabrique sédimentaire.

Winters et al. présentent les résultats d'essais sur les propriétés physiques menés essentiellement sur le terrain, l'accent étant mis sur le contrôle des paramètres relatifs au contenu en eau, à la salinité des eaux interstitielles, à la granulométrie et à la densité des grains. Ces données sont utilisées pour estimer la porosité et la masse volumique apparente des sédiments. En général, on observe une bonne corrélation entre les valeurs mesurées sur les carottes et les valeurs d'origine diagraphique. Les hydrates de gaz sont présents surtout dans des sédiments sableux dont la porosité varie de 32 à 45 % et dans des graviers de porosité inférieure (23–29 %). Les silts dépourvus d'hydrates de gaz et les silts à faible teneur en hydrates de gaz présentent généralement des porosités semblables à celles des sables ou légèrement inférieures. Le grès à ciment dolomitique (sous-faciès Sst) présente une porosité inférieure à 5 %. Ces relations générales sont confirmées par Katsube et al., qui ont passé en revue des recherches pétrophysiques détaillées en laboratoire sur la porosité, les caractéristiques relatives à la taille des pores et la perméabilité. On a constaté que les sables présentent une texture jointive plutôt simple avec des pores unimodaux. Le modèle textural proposé pour les silts comporte une structure de grains de silt et de sable et une matrice argileuse remplissant les pores intergranulaires, d'où une répartition bimodale complexe de la taille des pores. Ainsi, bien que la porosité efficace des sables soit du même ordre que celle des silts, la taille des pores des silts est inférieure de plusieurs ordres de grandeur. Les mesures de perméabilité indiquent que dans les silts peu perméables, le degré d'interconnexion des pores est faible. Conformément aux observations sédimentologiques, les silts du faciès Ss semblent présenter des propriétés pétrophysiques légèrement différentes de celles des silts du faciès Cs. Malgré que les modèles de la structure des pores donnent à penser qu'on a affaire à une texture jointive semblable avec matrice argileuse, les mesures de la répartition de la taille des pores et de la perméabilité diffèrent. Les silts du faciès Ss, qui recouvrent directement l'indice peu profond d'hydrates de gaz entre 897 et 926 m, présentent des perméabilités très faibles variant de 2×10^{-19} à 2×10^{-21} m^2, ce qui donne à penser qu'ils agissent peut-être comme couche étanche classique aux hydrocarbures.

Core studies — geochemistry

Pore-water and gas geochemistry provides important insights into the geology of the Mallik reservoir, as well as affecting the structure and stability of the in situ gas hydrate. An important part of the research conducted at the Mallik 2L-38 well was to determine whether the sedimentary section penetrated had the potential to generate the observed gas occurrences in situ, or if the gases migrated to their present location from deeper sources. Snowdon concludes, based on Rock-Eval T_{max} and vitrinite-reflectance testing, that Mallik sediments found in the Iperk, Mackenzie Bay, and Kugmallit sequences all have very low thermal maturity. Complementary gas-kinetics studies also indicate that no thermogenic methane could have been generated within the drilled section, given past geothermal conditions thought to have occurred at the site. In contrast, investigation of the microbial cell distribution by Colwell et al. demonstrates the presence of viable methanogens within the sediments of the Kugmallit and Mackenzie Bay sequences. Thus there is the potential, at least, for in situ generation of microbial gas within the sedimentary section.

Based on molecular and isotopic compositions of recovered core and cuttings gases, Lorenson et al. clearly establish that the Mallik 2L-38 well can be divided in to three zone. The lower two zones have a discernable thermogenic methane component which, based on the discussion above, must have migrated from deeper in the Mallik reservoir. In zone 1 (0–350 m), a dominance of methane with light isotopic composition (average $\delta^{13}C_1$ -90.5 to -71.3‰) suggests a microbial source with very little to no thermogenic gases. Zone 2 (480–680 m) contains a mixture of microbial and thermogenic gases with iC_4/nC_4 ratios <1, iC_5/nC_5 ratios >10, and carbon isotopic composition of methane indicating microbial gas, but with a shift towards heavier gases with depth ($\delta^{13}C_1$ -79 to -57.6‰). Zone 3 (785–1150 m), which encompasses the gas hydrate occurrences, contains the highest measured methane concentrations. The iC_4/nC_4 ratios >1 and the iC_5/nC_5 ratios <10, in combination with the methane carbon isotope characteristics (average $\delta^{13}C_1$ -43‰), suggest a high proportion of thermogenic gases. While some mixing is noted between each zone, the character of the gases in the Mallik 2L-38 well appear to be controlled by aspects related to the geology, permafrost conditions, and possibly the formation of gas hydrate. Zone 1 occurs entirely within ice-bonded strata of the Iperk Sequence while Zone 2 occurs within the ice-bonded interval of the Mackenzie Bay Sequence. In this case, the marked regional unconformity between the Iperk and Mackenzie Bay sequences and the base of ice-bonded permafrost appear to be barriers to gas migration from deeper in the section. Zone 3 comprises sediments of the Mackenzie Bay and Kugmallit sequences and includes the gas hydrate zone from 897 m to 1110 m. Lorenson et al. present very interesting arguments based on carbon isotopic compositions on the effects of isotopic filtering related to migration of thermogenic gas and possible isotopic partitioning of lighter isotopes resulting from fractionation of C_1 through C_4 carbon isotopes related to gas hydrate formation.

Études des carottes — géochimie

Les recherches sur la géochimie des gaz et des eaux interstitielles fournissent des aperçus importants sur la géologie du réservoir de Mallik tout en renseignant sur la structure et la stabilité des hydrates de gaz en place. Une composante importante des recherches menées au puits Mallik 2L-38 consistait à tenter de déterminer si la section sédimentaire pénétrée présentait le potentiel d'engendrer en place les indices de gaz observés ou si les gaz avaient migré à leur position actuelle à partir de sources plus profondes. En se fondant sur des essais Rock-Eval T_{max} et des essais de réflectance de la vitrinite, Snowdon conclut que les sédiments de Mallik trouvés dans les séquences d'Iperk, de Mackenzie Bay et de Kugmallit présentent tous une très faible maturité thermique. Des études complémentaires sur la cinétique des gaz ont en outre révélé que du méthane thermogène n'a pu être engendré au sein de la section forée compte tenu des conditions géothermiques passées vraisemblables du site. Par contraste, des recherches sur la répartition des cellules microbiennes par Colwell et al. ont démontré la présence de bactéries méthanogènes viables au sein des sédiments des séquences de Kugmallit et de Mackenzie Bay. Il est donc possible qu'il y ait eu génération en place de gaz microbiens au sein de la section sédimentaire.

En se fondant sur la composition moléculaire et isotopique des gaz dans les carottes et les débris prélevés, Lorenson et al. ont montré clairement que le puits Mallik 2L-38 peut être subdivisé en trois zones. Les deux zones inférieures contiennent une composante détectable de méthane thermogène qui, conformément aux considérations ci-dessus, a dû migrer à partir de zones plus profondes du réservoir de Mallik. Dans la zone 1 (0–350 m), la prédominance de méthane de composition isotopique légère (en moyenne $\delta^{13}C_1$ -90,5 à -71,3 ‰) semble indiquer une source microbienne avec une quantité nulle ou très faible de gaz thermogènes. La zone 2 (480–680 m) contient un mélange de gaz microbiens et thermogènes avec des rapports iC_4/nC_4 <1 et des rapports iC_5/nC_5 >10 et présente une composition isotopique du carbone du méthane indicatrice d'un gaz microbien mais avec une transition vers des gaz plus lourds avec la profondeur ($\delta^{13}C_1$ -79 à -57,6 ‰). La zone 3 (785–1 150 m), qui comprend les indices d'hydrates de gaz, renferme les plus hautes concentrations de méthane mesurées. Les rapports iC_4/nC_4 >1 et les rapports iC_5/nC_5 <10, combinés aux caractéristiques isotopiques du carbone du méthane (en moyenne $\delta^{13}C_1$ -43 ‰), laissent supposer une proportion élevée de gaz thermogènes. Bien qu'on observe un certain mélange entre chaque zone, les caractéristiques des gaz dans le puits Mallik 2L-38 semblent être contrôlées par des aspects liés à la géologie, aux conditions du pergélisol et, peut-être, à la formation d'hydrates de gaz. La zone 1 est entièrement confinée aux strates liées par la glace de la Séquence d'Iperk, alors que la zone 2 est présente dans l'intervalle lié par la glace de la Séquence de Mackenzie Bay. Dans ce cas, la discordance régionale marquée entre les séquences d'Iperk et de Mackenzie Bay ainsi que la base du pergélisol lié par la glace semblent constituer des barrières à la migration des gaz à partir des zones plus profondes de la section. La zone 3 comprend des sédiments des séquences de Mackenzie Bay et de Kugmallit ainsi que la zone d'hydrates de gaz de 897 à 1 110 m. Lorenson et al. font valoir des arguments très intéressants basés sur la composition isotopique du carbone sur les effets de la migration des gaz thermogènes liée au filtrage isotopique et sur le fractionnement isotopique possible des isotopes légers résultant du fractionnement des isotopes du carbone de C_1 à C_4 lié à la formation des hydrates de gaz.

The geochemistry of the pore waters associated with gas-hydrate-bearing sediments have been used by others as proxy indicators of gas hydrate concentration in marine environments. This methodology is based on the phenomenon of solute exclusion thought to occur during gas hydrate formation. Cranston investigated the pore water geochemistry of sediments recovered from the Mallik well and concludes that sands and gravels with significant gas hydrate content have average salinities of 8 ppt, compared with 34 ppt for non-gas-hydrate-bearing sediments. Based on the assumption that the salinity was originally uniform through the section, this difference in salinities suggests that up to 90% of the pore space in some intervals was filled with gas hydrate. Isotopic investigations by Clark et al. provide further insights on the pore-water geochemistry in the gas hydrate interval. Pore waters have highly variable isotopic and Cl^- compositions. Overall, the $\delta^{18}O$ values are significantly depleted compared to seawater values, and simple modelling suggests that the original pore waters were a mixture of seawater and continental-discharge meteoric waters. Significantly different, high-salinity pore waters in strata adjacent to gas-hydrate-bearing intervals, and a weak negative correlation with $\delta^{18}O$, are taken as evidence of solute and ^{16}O partitioning into residual pore water during gas hydrate formation, supporting the conclusions of Cranston.

La géochimie des eaux interstitielles associées aux sédiments renfermant des hydrates de gaz a été utilisée par d'autres chercheurs comme indicateurs indirects de la concentration d'hydrates de gaz en milieu marin. Ce procédé est fondé sur le phénomène de l'exclusion du soluté qui a lieu, croit-on, au cours de la formation des hydrates de gaz. Après avoir analysé la géochimie de l'eau interstitielle des sédiments prélevés dans le puits Mallik, Cranston conclut que les sables et les graviers renfermant d'importantes quantités d'hydrates de gaz présentent des salinités moyennes de 8×10^{-3}, comparativement à 34×10^{-3} pour les sédiments dépourvus d'hydrates de gaz. En supposant qu'au départ la salinité était uniforme dans l'ensemble de la section, cet écart de salinité donne à penser que dans certains intervalles, jusqu'à 90 % de l'espace interstitiel a été rempli d'hydrates de gaz. Des études isotopiques par Clark et al. fournissent des aperçus supplémentaires sur la géochimie des eaux interstitielles dans l'intervalle renfermant des hydrates de gaz. Les eaux interstitielles présentent des compositions isotopiques et de Cl^- très variables. En général, les valeurs de $\delta^{18}O$ sont nettement appauvries par rapport aux valeurs de l'eau de mer; or, une modélisation simple semble indiquer que les eaux interstitielles d'origine étaient constituées d'un mélange d'eau de mer et d'eaux météoriques de décharge continentale. Une transition marquée vers une forte salinité dans les strates adjacentes aux intervalles renfermant des hydrates de gaz et une faible corrélation négative avec $\delta^{18}O$ sont considérées comme des indices de fractionnement du soluté et de ^{16}O dans l'eau interstitielle résiduelle au cours de la formation des hydrates de gaz, ce qui corrobore les conclusions de Cranston.

Core studies — gas hydrate characterization

In total, eight papers in this volume present considerable data and discussions regarding the character and physical properties of gas hydrate within Mallik 2L-38 core samples. While these studies provide critical characterization of the Mallik gas hydrate occurrence, it is important to reflect that their direct application to in situ conditions at the Mallik 2L-38 well is limited in some instances. Because all of the gas hydrate samples were collected using conventional coring techniques, a certain amount of gas hydrate dissociation was inevitable during the retrieval and core-handling process. Negative core temperatures and freezing of the pore waters (ice bonding) observed within core samples are a direct consequence of this reaction. Using simple heat-exchange modelling, Wright et al. successfully demonstrate that in situ gas hydrate concentrations estimated from quantitative well-log methods can be accurately back-calculated in some instances. Typically, gas hydrate dissociation experiments conducted on core samples in the field indicate that less than 40% of the pore space was occupied by gas hydrate, whereas in situ values may be higher than 80%. As outlined by Tulk et al., another factor which must be considered when evaluating laboratory-derived measurements on Mallik samples is the impact of storage of the gas hydrate samples prior to post-field laboratory testing and the testing procedures invoked. For the Mallik 2L-38 samples, three primary storage schemes were adopted: samples destined for testing at the National Research Council of Canada were stored unpressurized in liquid nitrogen (~-196°C). Samples destined for testing in Japan were stored in pressure vessels charged with nitrogen gas and

Études des carottes — caractérisation des hydrates de gaz

Au total, huit articles de ce volume présentent d'abondantes données et des analyses approfondies sur les caractéristiques et les propriétés physiques des hydrates de gaz dans les échantillons carottés du puits Mallik 2L-38. Bien que ces recherches fournissent une caractérisation d'importance cruciale sur l'indice d'hydrates de gaz de Mallik, il importe de garder à l'esprit que leur application directe aux conditions en place au puits Mallik 2L-38 est dans certains cas restreinte. En raison du fait que tous les échantillons d'hydrates de gaz ont été recueillis au moyen de techniques de carottage traditionnelles, la dissociation des hydrates de gaz a été dans une certaine mesure inévitable au cours des processus de prélèvement et de manipulation des carottes. Les températures négatives des carottes et la congélation des eaux interstitielles (liaison par la glace) observées dans les échantillons carottés sont une conséquence directe de cette réaction. Au moyen d'une modélisation simple de l'échange thermique, Wright et al. ont réussi à montrer que les concentrations en place d'hydrates de gaz estimées au moyen de méthodes diagraphiques quantitatives peuvent dans certains cas être rétrocalculées avec précision. En général, les expériences de dissociation des hydrates de gaz menées sur le terrain sur des échantillons carottés indiquent que moins de 40 % de l'espace interstitiel est occupé par des hydrates de gaz, alors que les valeurs sur place peuvent dépasser 80 %. Comme l'ont expliqué Turk et al., un autre facteur dont il faut tenir compte lorsqu'il s'agit d'évaluer les mesures obtenues en laboratoire sur les échantillons de Mallik est l'entreposage des échantillons d'hydrates de gaz avant les essais en laboratoire et les techniques d'essais évoquées. Au puits Mallik 2L-38, on a eu recours à trois procédés d'entreposage principaux. Les échantillons destinés à être testés au Conseil national de

maintained at between -30 and -70°C. Samples destined for testing at the USGS were placed in large pressure vessels, backfilled with methane gas, and maintained at temperatures between -5 and -10°C.

As described by Uchida et al., visual core observations at the drill site identified a predominance of pore-space gas hydrate in varying concentrations within framework-supported sands and sandy gravel. Gas hydrate was mainly fine grained (<2 mm), filling the intergranular pores and/or coating mineral grains. Although rare, thin veins (1–2 mm) and clasts or nodules of gas hydrate (up to 0.5 mm) were observed in sands, and the largest piece of gas hydrate (~2 cm) formed the matrix of a granular sand. As a result of the dominance of fine-grained gas hydrate mixed with sediment, new methods were utilized by Tulk et al. and Uchida et al. to concentrate the gas hydrate fraction for molecular-science investigations. These studies reveal that enclathrated gas species from the Mallik 2L-38 well are mostly methane (>98%). Nuclear magnetic resonance (NMR) analyses by Uchida et al. and powder X-ray diffraction analyses by Tulk et al. confirm that the bulk of the gas hydrate found in the Mallik sediments was Structure I methane hydrate. However, Tulk et al. found that some samples contained significant amounts of heterogeneously dispersed propane and carbon dioxide, and that these samples were significantly more stable than samples containing only methane. While conclusive evidence for the presence of Structure II gas hydrate was not found, the role of small quantities of propane, carbon dioxide, and some other heavy gases may be important for the Mallik gas hydrate accumulation. These observations, and those described by Lorenson et al. related to possible isotopic partitioning affecting the heavier gases, point to the need for further research on this topic.

From a practical perspective, when assessing engineering properties of gas-hydrate-bearing sediments, data are required on the effects of the porous media and resident pore waters on the pressure-temperature thresholds for gas hydrate stability. Assessments of geotechnical properties, such as strength and hydraulic conductivity, are also critical. Reports by Wright et al. and Winters et al. provide insights on these properties. In the case of Wright et al., testing on reconstituted Mallik 2L-38 sands collected from a fresh pore-water system has established that methane hydrate pressure-temperature stability conditions are similar to published data for pure Structure I methane hydrate. In contrast, a progressively increasing shift towards a higher pressure and lower temperature region is noted for sands of elevated salinity. Test results for the saline silt suggest a unique shift in the stability threshold due to porous media effects. Although coring was limited at the base of the gas hydrate zone at the Mallik 2L-38 well, the pressure-temperature threshold conditions that were predicted on the basis of laboratory testing of sands with salinities above 20 ppt agree well with the observed base of the gas hydrate stability field assessed on the basis of well-log interpretations. Using a specialized gas hydrate testing

recherches du Canada ont été entreposés sans pressurisation dans de l'azote liquide (environ -196 °C). Les matériaux destinés à être testés au Japon ont été emmagasinés dans des récipients sous pression remplis d'azote gazeux et conservés à des températures de -30 à -70 °C. Enfin, les échantillons destinés à être testés à la USGS ont été placés dans de grands contenants sous pression remplis de méthane gazeux et conservés à des températures de -5 à -10 °C.

Comme l'ont expliqué Uchida et al., les observations visuelles des carottes sur le site de forage ont permis de constater la prédominance des hydrates de gaz interstitiels à des concentrations variables dans les sables et les graviers sableux à texture jointive. L'hydrate de gaz est pour l'essentiel finement grenu (<2 mm); il remplit les pores intergranulaires et/ou enrobe les grains minéraux. Bien que rares, des filonnets (1–2 mm) et des clastes ou des nodules d'hydrate de gaz (jusqu'à 0,5 mm) ont été observés dans les sables; plus grosse concentration d'hydrates de gaz (environ 2 cm) constitue la matrice d'un sable grenu. En raison de la prédominance des hydrates de gaz finement grenus mélangés avec des sédiments, Tulk et al. et Uchida et al. ont eu recours à de nouvelles méthodes afin de concentrer la fraction d'hydrates de gaz pour des analyses en science moléculaire. Ces études ont montré que les espèces de gaz encagées dans un clathrate étaient essentiellement constituées de méthane (>98 %). Des analyses par résonance magnétique nucléaire, réalisées par Uchida et al., et par diffraction des rayons X sur poudre, réalisées par Tulk et al., ont confirmé que la plus grande partie des hydrates de méthane présents dans les sédiments de Mallik sont de structure I. Tulk et al. ont toutefois observé que certains échantillons renferment d'importantes quantités de propane et de dioxyde de carbone dispersés de manière hétérogène et que ces échantillons étaient beaucoup plus stables que les échantillons ne contenant que du méthane. Bien qu'on n'ait pas observé d'indices concluants de la présence d'hydrates de gaz de structure II, le rôle de petites quantités de propane, de dioxyde de carbone et de quelques autres gaz lourds a peut-être de l'importance pour l'accumulation des hydrates de gaz de Mallik. Ces observations et celles décrites par Lorenson et al. relativement à un possible fractionnement isotopique touchant les gaz lourds indiquent la nécessité de poursuivre les recherches sur ce sujet.

Dans une perspective pratique, lorsqu'on évalue les propriétés techniques des sédiments renfermant des hydrates de gaz, il est nécessaire d'obtenir des données de fourchette sur les effets des milieux poreux et des eaux interstitielles permanentes sur les seuils de pression-température relatifs à la stabilité des hydrates de gaz. L'évaluation de propriétés géotechniques telles que la résistance et la conductivité hydraulique sont également d'importance critique. Des rapports par Wright et al. et Winters et al. fournissent des aperçus sur ces propriétés. Dans le cas de Wright et al., des essais sur des sables reconstitués du puits Mallik 2L-38 prélevés au sein d'un système à eau interstitielle douce ont permis d'établir que les conditions de stabilité des hydrates de méthane en fonction de la pression et de la température sont semblables aux données publiées sur les hydrates de méthane purs de structure I. Par contraste, on note une transition progressivement croissante vers une région de pression plus élevée et de température moins élevée dans les sables à forte salinité. Les résultats d'essais sur le silt salin semblent indiquer une transition unique du seuil de stabilité en raison des effets relatifs aux milieux poreux. Bien que le carottage ait été restreint à la base de la zone à hydrates de gaz du puits Mallik 2L-38, les conditions limites de pression-température prédites à partir d'essais en laboratoire sur des sables dont la salinité est

instrument, Winters et al. present triaxial testing data which suggest that gas-hydrate-bearing sands from the Mallik 2L-38 well have shear strengths which are three to nine times greater than those at similar consolidation pressures without gas hydrate. Interesting data are also presented in Winters et al. which document the influence of the ice phase within Mallik 2L-38 sediments on acoustic and physical properties. When reviewing the data from Winters et al., it should be noted that because methane was used as a secondary gas to charge the pressure vessels used for storing the gas hydrate samples, it is very likely that the gas hydrate contents measured are greater than those present when the core samples were collected. However, because the original samples had depleted gas hydrate contents relative to in situ values, the data presented in Winters et al. are actually quite representative of intermediate gas hydrate contents (35–60% pore saturation).

Two papers by Uchida et al. conclude the gas hydrate characterization section, presenting data from X-ray computerized tomography experiments. This technique is used to establish the presence of gas hydrate within the sediment pore spaces and with time-series scans, assess the characteristics of gas hydrate dissociation in Mallik 2L-38 core samples.

Downhole geophysics

A major emphasis was placed on the downhole-geophysical program to determine the in situ physical properties of the gas-hydrate-bearing sediments in the Mallik 2L-38 well. The quality of the downhole measurements in the gas-hydrate-bearing portion of the Mallik 2L-38 well is excellent, with a near-gauge hole throughout the gas hydrate interval. Downhole electrical-resistivity and acoustic-transit-time logs (both compressional- and shear-wave measurements) from the Mallik 2L-38 well confirm the occurrence of in situ gas hydrate at the Mallik drill site within the subsurface depth interval from 897 to 1110 m. Downhole-log data also confirm the occurrence of a relatively thin (about 1.5 m thick) free-gas-bearing unit below the predicted base of the gas hydrate stability zone in the Mallik 2L-38 well. Miyairi et al., Lee and Collett, and Collett et al. have shown that acoustic-transit-time and electrical-resistivity log data can be used to accurately estimate the amount of gas hydrate in the sedimentary section penetrated by the Mallik 2L-38 research well. Described in each of these reports are a series of equations and statistical relations that utilize various downhole-log data to calculate sediment porosities and the magnitude of gas-hydrate saturation within the well-log-characterized sediment pores. In general, the various well-log analysis methods applied by Miyairi et al., Lee and Collett, and Collett et al. yielded similar results. Downhole-log-calculated gas hydrate saturations within the log-inferred gas-hydrate-bearing interval of the Mallik 2L-38 well, ranged from near 0 to 90%. The log-derived sediment porosities in the gas-hydrate-bearing

supérieure à 20 x 10^{-3} concordent bien avec la base observée du champ de stabilité des hydrates de gaz telle qu'évaluée à partir des interprétations diagraphiques. À l'aide d'un instrument spécialisé de mise à l'essai des hydrates de gaz, Winters et al. ont présenté des données d'essais triaxiaux qui laissent penser que les sables renfermant des hydrates de gaz au puits Mallik 2L-38 présentent une résistance au cisaillement qui est de trois à neuf fois supérieure à celle observée à des pressions de consolidation semblables sans hydrates de gaz. Winters et al. fournissent en outre des données intéressantes décrivant le rôle de la phase glacée dans les sédiments du puits Mallik 2L-38 sur les propriétés physiques et acoustiques. Il y a lieu de noter, à l'examen des données de Winters et al., qu'étant donné que le méthane a été utilisé comme gaz secondaire pour remplir les récipients sous pression utilisés pour entreposer les échantillons d'hydrates de gaz, il est très probable que le contenu en hydrates de gaz mesuré soit supérieur à celui des échantillons carottés d'origine. Toutefois, parce que ceux-ci renfermaient un contenu appauvri en hydrates de gaz relativement aux valeurs en place, les données présentées par Winters et al. sont en réalité tout à fait représentatives des teneurs moyennes en hydrates de gaz (saturation des pores de 35 à 60 %).

Deux articles par Uchida et al. terminent la section de caractérisation des hydrates de gaz en présentant des données sur des expériences de tomographie informatisée aux rayons X. Cette technique est utilisée afin d'établir la présence d'hydrates de gaz au sein des espaces interstitiels des sédiments et, au moyen de balayages selon des séries chronologiques, d'évaluer les caractéristiques de dissociation des hydrates de gaz dans les échantillons carottés provenant du puits Mallik 2L-38.

Géophysique de fond

On a accordé beaucoup d'importance au programme de géophysique en sondage afin de déterminer les propriétés physiques en place des sédiments renfermant des hydrates de gaz dans le puits Mallik 2L-38. La qualité des mesures en sondage dans la portion renfermant des hydrates de gaz du puits Mallik 2L-38 est excellente, le trou étant presque calibré dans l'ensemble de l'intervalle à hydrates de gaz. Les diagraphies de la résistivité électrique et du temps de parcours acoustique (mesures sur les ondes de compression et de cisaillement) y confirment la présence d'hydrates de gaz en place dans l'intervalle de profondeur de 897 à 1 110 m. Les données en sondage confirment également la présence d'une unité relativement mince (environ 1,5 m d'épaisseur) renfermant des gaz libres sous la base prédite de la zone de stabilité des hydrates de gaz dans le puits Mallik 2L-38. Miyairi et al., Lee et Collett et Collett et al. ont montré que les données diagraphiques sur le temps de parcours acoustique et la résistivité électrique peuvent être utilisées afin d'estimer avec précision la quantité d'hydrates de gaz dans la section sédimentaire pénétrée par le puits de recherche Mallik 2L-38. Est décrite dans chacun de ces rapports une série d'équations et de relations statistiques qui utilisent diverses données diagraphiques enregistrées dans le puits afin de calculer les porosités des sédiments et l'importance de la saturation en hydrates de gaz au sein des pores sédimentaires caractérisés par les diagraphies de puits. En général, les diverses méthodes d'analyse des diagraphies de puits appliquées par Miyairi et al., Lee et Collett et Collett et al. ont fourni des résultats semblables. Les valeurs des saturations en hydrates de gaz calculées à partir des diagraphies en sondage dans l'intervalle renfermant des hydrates de gaz déduit des diagraphies

units of the Mallik 2L-38 well averaged about 30%. The back-pocket figures accompanying the well-log papers by Collett et al. provide detailed summaries of well-log response and derived physical properties for the gas hydrate interval.

Based on the analysis of the available downhole-log data, it has been determined that the log-inferred gas-hydrate-bearing stratigraphic section in the Mallik 2L-38 well contains about 4.15 x 10^9 m^3 of gas in the 1 km^2 area surrounding the Mallik 2L-38 drill site. Additional analysis of high-resolution electrical-resistivity image logs from the Mallik 2L-38 well reveals that the gas hydrate inferred to occur in the Mallik well likely occurs as disseminated pore-filling constituents within discrete, sand-dominated, stratigraphic units.

Initial analysis of the vertical seismic profile (VSP) data from the Mallik 2L-38 well by Walia et al. and Sakai have yielded high-quality compressional- and shear-wave velocity-depth profiles for the Mallik drill site. The excellent quality of the VSP data has allowed the cross-correlation of the available surface multichannel seismic-reflection data with the conventional open-hole log data from the Mallik 2L-38 well. Both Walia et al. and Sakai concluded that the VSP data suggest that, at a microscopic scale, the in situ gas hydrate at the site of the Mallik well occurs primarily in the sediment pores, and is generally isolated from the grain-boundary contacts.

Regional gas hydrate occurrence, production, and climate-change considerations

Collett et al. have undertaken a re-analysis of more than 240 km of industry-acquired seismic-reflection data and downhole-log data. Using the quantitative relationships developed through the body of research undertaken as part of Mallik 2L-38 research-well program, four significant gas hydrate accumulations are characterized in and around the Mallik well area. Each gas hydrate accumulation occurs within a broad anticline structure and displays unique well-log and seismic responses. The total amount of in situ gas trapped as gas hydrate in these accumulations is estimated at 187 178 x 10^6 m^3, with the Mallik accumulation alone being 110 000 x 10^6 m^3. While the total volumes of gas are remarkable, caution must be exercised when evaluating the resource implications. As described by Khairkah et al., there are many issues which must be considered when evaluating the viability and potential for gas production. At Mallik 2L-38, important considerations include the character and extent of the free-gas zones beneath the gas hydrate interval. Full evaluation of the production capacity of the gas hydrate zones will require comprehensive production-simulation modelling and preferably an extended production test.

du puits Mallik 2L-38 varient de près de 0 à 90 %, alors que les porosités sédimentaires déduites des diagraphies dans les unités renfermant des hydrates de gaz du puits Mallik 2L-38 se chiffrent en moyenne à environ 30 %. Des figures en pochette accompagnant les articles de Collett et al. fournissent des résumés détaillés des résultats obtenus par diagraphies de puits et des propriétés physiques déduites dans l'intervalle à hydrates de gaz.

Sur la base de l'analyse des données diagraphiques de puits disponibles, on a montré que la section stratigraphique renfermant des hydrates de gaz déduite à partir des diagraphies du puits Mallik 2L-38 renferme environ 4,15 x 10^9 m^3 de gaz dans une région de 1 km^2 entourant le site du puits Mallik 2L-38. Des analyses supplémentaires de diagraphies à image à haute résolution de la résistivité électrique du puits Mallik 2L-38 révèlent que les hydrates de gaz dont la présence a été déduite au puits Mallik sont vraisemblablement présents sous forme de constituants disséminés de remplissage de pores au sein d'unités stratigraphiques distinctes à dominante sableuse.

L'analyse initiale des données de profilage sismique vertical (PSV) sur le puits Mallik 2L-38 par Walia et al. et Sakai ont fourni des profils de haute qualité sur la vitesse des ondes de compression et des ondes de cisaillement en fonction de la profondeur pour le site de forage Mallik. L'excellente qualité des données de PSV a rendu possible la corrélation croisée des données de sismique-réflexion multicana de surface disponibles avec les données diagraphiques en découvert traditionnelles sur le puits Mallik 2L-38. Walia et al. et Sakai ont conclu que les données de PSV semblent indiquer qu'à l'échelle microscopique, les hydrates en place au site du puits Mallik sont présents essentiellement dans les pores des sédiments, généralement à distance des contacts de bordures de grains.

Répartition régionale et production des hydrates de gaz et considérations sur les changements climatiques

Collett et al. ont entrepris d'analyser de nouveau plus de 240 km de données de sismique-réflexion et de données diagraphiques de puits acquises par le secteur privé. Au moyen des relations quantitatives élaborées dans l'ensemble des recherches entreprises dans le cadre du programme du puits de recherche Mallik 2L-38, quatre importantes accumulations d'hydrates de gaz ont été caractérisées dans la région du puits Mallik et à proximité. Chaque accumulation apparaît dans une vaste structure anticlinale et présente des caractéristiques diagraphiques et sismiques distinctes. On estime à 187 178 x 10^6 m^3 la quantité totale de gaz piégé en place sous forme d'hydrates de gaz dans ces accumulations, l'accumulation de Mallik à elle seule en renfermant 110 000 x 10^6 m^3. Malgré que le volume total de gaz soit remarquable, la prudence s'impose lorsqu'il s'agit d'évaluer les conséquences relativement aux ressources. Comme l'expliquent Khairkah et al., de nombreuses questions doivent être prises en considération pour évaluer la viabilité et le potentiel de la production de gaz. Parmi les considérations importantes dont il faut tenir compte au puits Mallik 2L-38 figurent la nature et l'étendue des zones renfermant des gaz libres sous l'intervalle à hydrates de gaz. Une évaluation complète de la capacité de production des zones à hydrates de gaz nécessitera la modélisation systématique d'une simulation de production et, préférablement, un essai de production rigoureux.

Numerous authors have inferred that gas hydrate deposits may be vulnerable to future climate warming due to their sensitivity to temperature and pressure changes. Concerns have also been expressed that the release of substantial volumes of methane from dissociating gas hydrate may enhance the pace of warming, as it is a very efficient greenhouse gas. To assess this concern for the Mallik gas hydrate occurrence, Taylor undertook two-dimensional finite-element modelling using detailed knowledge of the geology and gas hydrate distribution at the Mallik field, and local knowledge of the variability of the surface ground-temperature regime. Modelling for 13 300 years based on an increase of surface temperatures of 2°C/100 years suggests that the response time is quite long. For instance, the base of the gas hydrate stability field would rise only 2 m after 300 years and perhaps 70 m after 13 300 years. This conclusion is not surprising, given the depth of the Mallik field gas hydrate occurrences. It should be noted, however, that the occurrence of gas hydrate within the shallow, ice-bonded interval may be quite a critical climate-change issue. This concern, however, cannot be addressed at present as no pertinent data was collected during the Mallik 2L-38 gas hydrate research-well program.

Étant donnée la sensibilité des gisements d'hydrates de gaz aux changements de température et de pression, de nombreux auteurs ont émis l'hypothèse qu'ils sont peut-être vulnérables au futur réchauffement climatique. On a également soulevé la possibilité que le dégagement de volumes substantiels de méthane à partir d'hydrates de gaz en voie de dissociation accélère le rythme du réchauffement, car ce gaz agit très efficacement comme gaz à effet de serre. Afin d'évaluer cette possibilité dans le cas de l'indice d'hydrates de gaz de Mallik, Taylor a entrepris une modélisation bidimensionnelle par éléments finis à partir de connaissances détaillées sur la géologie et la répartition des hydrates de gaz au champ de Mallik et de connaissances locales sur la variabilité du régime de température des sols en surface. Une modélisation sur 13 300 ans basée sur un accroissement des températures de surface de 2 °C/100 ans semble indiquer que le délai de réponse est très long. Ainsi, la base du champ de stabilité des hydrates de gaz ne s'élèverait que de 2 m après 300 ans et, peut-être, de 70 m après 13 300 ans. Cette conclusion n'est pas surprenante, compte tenu de la profondeur des indices d'hydrate de gaz au champ de Mallik. Il importe toutefois de noter qu'eu égard au problème du changement climatique, la présence d'hydrates de gaz dans l'intervalle peu profond lié par la glace est peut-être tout à fait critique. Toutefois, on ne peut présentement aborder l'étude de ce problème, faute d'avoir recueilli des données pertinentes sur la question au cours du programme du puits de recherche Mallik 2L-38.

Acknowledgments

As editors, we are indebted to the authors of the papers within this volume who have worked diligently over the past year to complete their scientific studies and finalize their manuscripts. As with nearly every aspect of the Mallik 2L-38 project, the schedule has been demanding, with just 14 months between completion of the fieldwork and publishing of this report. The staff at the Geological Survey of Canada in Ottawa, who have assisted with all phases of the production effort, also deserve special acknowledgement. Technical editors A.J. Weatherston and O.E. Inglis played key roles, as did D.A. Busby and M. Sigouin and their teams, who led the production and cartography efforts.

Each manuscript was reviewed by two scientific referees, and in this capacity we acknowledge the efforts of the following individuals: T. Ahlbrandt, H. Amano, K. Bird, B. Bradshaw, M.M. Burgess, I.D. Clark, R.E. Cranston, J.R. Dietrich, J. Dixon, L.D. Dyke, T. Dyman, M. Imazato, J.A. Hunter, D. Issler, T.J. Katsube, H. Knebel, E. Kotler, K.A. Kvenvolden, M.W. Lee, T.D. Lorenson, H. Lu, R. Matsumoto, D.J. McIntyre, B.E. Medioli, J. Miller, T. Nakayama, F.M. Nixon, S. Okada, B.R. Pelletier, A. Reysenbach, J.A. Ripmeester, O. Senoh, D.E. Sloan, S.L. Smith, T.J. Springfield, A. Sweet, D. Taylor, C.A. Tulk, T. Uchida, A. Waseda, M. Williamson, W.J. Winters, W. Wood, and J.F. Wright. Finally, the senior editor would like to acknowledge the considerable contribution of B.E Medioli, who assisted in nearly all aspects of the production of this volume.

Remerciements

En tant que rédacteurs, nous sommes reconnaissants envers les auteurs des articles du présent volume, lesquels ont oeuvré consciencieusement depuis un an afin de terminer leurs recherches scientifiques et d'achever leurs manuscrits. Tout comme ce fut le cas pour presque tous les aspects du projet du puits Mallik 2L-38, le calendrier était exigeant puisqu'il ne prévoyait qu'un intervalle de 14 mois entre l'achèvement des travaux de terrain et la publication du présent rapport. Le personnel de la Commission géologique du Canada, qui a fourni son aide pour chacune des phases des travaux de production, mérite également une reconnaissance toute particulière. Les rédacteurs techniques A.J. Weatherston et O.E. Inglis ont joué un rôle clé, tout comme D. Busby et M. Sigouin ainsi que leurs équipes, qui ont dirigé les travaux de production et de cartographie.

Chaque manuscrit a été révisé par deux examinateurs scientifiques, aussi sommes-nous reconnaissants des contributions à cet égard des personnes suivantes : T. Ahlbrandt, H. Amano, K. Bird, B. Bradshaw, M.M. Burgess, I.D. Clark, R.E. Cranston, J.R. Dietrich, J. Dixon, L.D. Dyke, T. Dyman, M. Imazato, J.A. Hunter, D. Issler, T.J. Katsube, H. Knebel, E. Kotler, K.A. Kvenvolden, M.W. Lee, T.D. Lorenson, H. Lu, R. Matsumoto, D.J. McIntyre, B.E. Medioli, J. Miller, T. Nakayama, F.M. Nixon, S. Okada, B.R. Pelletier, A. Reysenbach, J.A. Ripmeester, O. Senoh, D.E. Sloan, S.L. Smith, T.J. Springfield, A. Sweet, D. Taylor, C.A. Tulk, T. Uchida, A. Waseda, M. Williamson, W.J. Winters, W. Wood et J.F. Wright. Enfin, le rédacteur principal souhaite souligner la contribution considérable de B.E. Medioli, qui a prêté son assistance à l'occasion de presque toutes les étapes de la réalisation du présent volume.