

1063530

GEOS

Vol. 17 No. 1 Winter/Vol. 17, n° 1 Hiver 1988



This document was produced by scanning the original publication.

Ce document est le produit d'une numérisation par balayage de la publication originale.

A quarterly about the earth's resources / Publication trimestrielle sur les ressources de la Terre



GEOS

A quarterly about the earth's resources

Publication trimestrielle sur les ressources de la Terre

Vol. 17 No. 1 Winter 1988
Vol. 17, n° 1 Hiver 1988

GEOS is published quarterly by Energy, Mines and Resources Canada Minister, The Hon. Marcel Masse Minister of State for Forestry and Mines, The Hon. Gerald Merrithew Deputy Minister, Arthur Kroeger

GEOS est une publication trimestrielle d'Énergie, Mines et Ressources Canada L'hon. Marcel Masse, ministre L'hon. Gerald Merrithew, ministre d'État aux Forêts et aux Mines M. Arthur Kroeger, sous-ministre

Opinions expressed by contributors from outside the department are their own and not necessarily those of EMR.

Le Ministère ne partage pas nécessairement les opinions des collaborateurs de GEOS qui ne font pas partie d'EMR.

Editor

Rédactrice en chef
Primrose Ketchum

Associate Editor
Rédacteur associé
Attilio Barcados

Assistant Editors
Rédacteurs adjoints
Sylvain Vézina
Val Donnelly

Graphics
Présentation graphique
Carisse Graphic Design Ltd.

GEOS is distributed without charge on request. If you would like a copy of any article in the other official language please write to: Distribution, GEOS, Energy, Mines and Resources, 580 Booth Street, Ottawa, Ontario K1A 0E4.

Indexed in the Canadian Periodical Index

GEOS est distribué gratuitement sur demande. Si vous désirez recevoir le texte d'un article dans l'autre langue officielle, veuillez écrire au: Centre de diffusion, GEOS, Énergie, Mines et Ressources, 580, rue Booth, OTTAWA (Ontario) K1A 0E4.

Cité dans l'Index des périodiques canadiens

ISSN 0374-3268



Energy, Mines and
Resources Canada

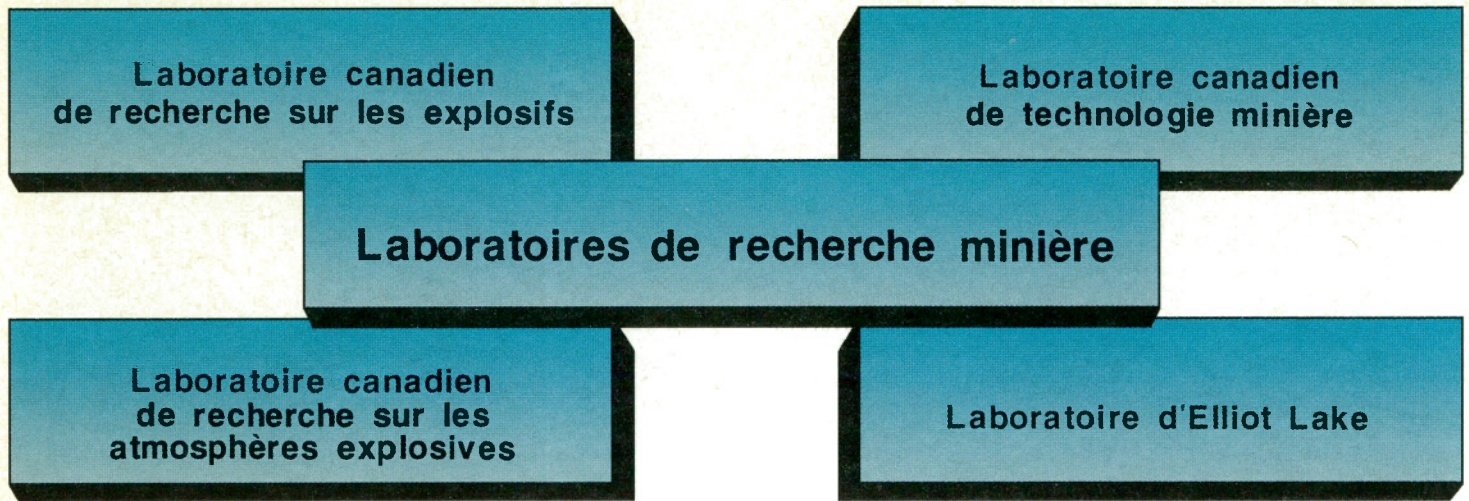
Énergie, Mines et
Ressources Canada

Contents/Sommaire

- 1 La recherche minière à CANMET
par J.E. Udd, A. Boyer et N.R. Billette, CANMET
- 7 Frontier Geoscience Program in Action!
by G.R. Davies and W.W. Nassichuk, GSC
- 11 L'éolienne de Kuujuaq
par Réal Reid et Sylvain Vézina
- ✓ 14 SPOT: A New Window on Canada *1063530*
by Bob Ryerson and Jean Game, CCRS
- 18 L'émergence de la côte sud du Saint-Laurent depuis la dernière glaciation
par Jean-Claude Dionne, Université Laval
- 22 What Was That?
Meteoroid Sonic Boom Recorded on Yellowknife Seismic Array
by F.M. Anglin and Dr. R.A.W. Haddon, GSC

COUVERTURE : Tunnelier de 7,6 m de diamètre mis au point par le Conseil national de recherches du Canada et CANMET. Il a percé un tunnel de 5 km pour accéder à des couches de charbon au large de la Nouvelle-Écosse.

COVER: Tunnel borer, 7.6 m in diameter, developed by CANMET and the National Research Council of Canada, tunneled a distance of 5 km to coal seams off the Nova Scotia coast.



La recherche minière à CANMET

Impact des ententes fédérales-provinciales Un aperçu des activités des Laboratoires de recherche minière (LRM)

par J. E. Udd, A. Boyer et N. R. Billette

L'évolution du marché et les nouvelles conditions économiques présentent des défis que doit relever l'industrie minière canadienne. Son succès dépend grandement de son dynamisme, de l'utilisation de techniques récemment éprouvées ainsi que de la recherche et de la mise au point de technologies nouvelles, mieux adaptées aux besoins des années 80 et 90.

L'industrie minière, désireuse de diminuer les investissements nécessaires à l'exploitation, cherche de plus en plus à centraliser les opérations minières et à réduire le nombre de mises en chantier dans chaque mine souterraine. Le succès de ces mesures de rentabilité dépend surtout de la mise au point de la technique d'abattage du roc en continu dans le Bouclier canadien. En effet, en raison de la dureté des roches, de dures à très dures, les frais liés à l'exploitation des mines dans le Bouclier sont particulièrement élevés.

L'industrie travaille au perfectionnement de l'exploitation continue dans les roches dures. En effet, un certain nombre de réalisations, au cours des 25 dernières années, a permis d'améliorer ce procédé de façon remarquable. Grâce à l'introduction, au cours de la dernière décennie, des foreuses de 10 cm de diamètre et plus, de nombreuses mines ont remplacé les méthodes d'exploitation souterraines peu productives, telles que par coupe et remblai, par des méthodes à haut rendement.

Certaines expériences en cours ne manqueront pas de donner lieu à des améliorations encore plus marquantes. Parmi celles-ci, on retrouve des projets de recherche effectués en vertu des ententes fédérales-provinciales tels les essais d'un tunnelier à la mine Kierna, d'une mini-écailleuse de la société Teledyne et d'un système d'indication d'orientation du foret fond-de-trou de la firme Vadeko.

On prévoit que d'ici la fin du siècle, la recherche aidant, l'automatisation, et éventuellement la robotisation, des activités souterraines entraîneront un renouveau dans l'industrie minière.

La recherche est sans aucun doute la clé du succès du secteur minier. Aussi, les Laboratoires de recherche minière (LRM), par leurs propres travaux de recherche ou ceux réalisés en collaboration avec les gouvernements provinciaux, les milieux industriels et universitaires, prennent des initiatives destinées à accroître la productivité de l'industrie minière et à améliorer l'environnement minier afin d'assurer la santé et la sécurité des travailleurs.

Voici une brève description des activités, des travaux de recherche et des projets reliés aux ententes fédérales-provinciales pour chacun des LRM (fig. 1).

Le *Laboratoire canadien de recherche sur les explosifs* effectue principalement les essais nécessaires pour certifier tous les explosifs commerciaux, servant

Figure 1 Schéma d'organisation des Laboratoires de recherche minière de CANMET.

Organization of CANMET Mining Research Laboratories.

notamment dans les mines. De plus, il vérifie les propriétés des nouveaux explosifs qui font leur entrée sur le marché. Aussi, les vérifications, la certification et l'amélioration des méthodes d'analyse constituent-elles ses tâches principales. Ces travaux, reliés à la chimie des explosifs, sont utiles pour les mines québécoises (fig. 2).

Assujetti à la *Loi canadienne sur les explosifs*, ce laboratoire transmet les résultats de ses recherches à l'inspecteur en chef des explosifs et le conseille au besoin.

Dans l'industrie minière, il est également nécessaire qu'on effectue des travaux de recherche sur la nature physique des explosifs et sur la fragmentation des roches lors des sautages. Ces facteurs peuvent influencer sur la sécurité des travailleurs et des communautés environnantes, la productivité ainsi que la rentabilité des mines. Les spécialistes des LRM tiennent toujours compte de ces facteurs au cours de leurs travaux, notamment sur les explosifs. Sous leur surveillance, des projets pratiques sont réalisés dans le cadre d'ententes fédérales-provinciales sur l'exploitation minière. Ces projets constituent le lien



entre les essais du Laboratoire canadien de recherche sur les explosifs et les besoins en recherche appliquée qui restent à combler.

Un des contrats récemment achevés a permis de tirer d'un logiciel de sautage conçu pour un ordinateur principal une version conviviale pour micro-ordinateur. Ce programme, élaboré pour les méthodes modernes de sautage des mines souterraines, devrait s'avérer un outil précieux dans un bon nombre de mines canadiennes car il conduit à une réduction des bris hors profil et des vibrations excessives.

Deux autres projets sont également en cours. Le premier consiste en la rédaction, dans le cadre de l'Entente Canada—Manitoba sur l'exploitation minérale, d'un manuel de procédures normalisées pour le sautage des arches survenant dans les trémies et les points de soutirage. Le deuxième projet vise à optimiser la conception des sautages dans la méthode d'exploitation par tranches verticales rabattantes au moyen de trous de grand diamètre.

En outre, des études se poursuivent sur le contrôle des sautages en périphérie des ouvertures, ce qui permet une réduction des dommages à la roche intacte et réduit les besoins d'écaillage. Cela a d'ailleurs été bien démontré par la présentation sur la mine Kiena, aux

journées de sautage 1986 qui se sont déroulées à l'Université Laval.

L'amélioration du rendement de l'énergie explosive, l'augmentation du niveau de sécurité et la réduction des coûts unitaires de production constituent les objectifs principaux du Laboratoire canadien de recherche sur les explosifs.

Le Laboratoire canadien de recherche sur les atmosphères explosives a pour principales tâches de certifier l'équipement employé dans les atmosphères explosives et de formuler des normes sur la qualité de l'air des galeries souterraines. Ce laboratoire a entre autres entrepris des travaux liés au contrôle des gaz d'échappement des diesels.

Dans le secteur environnemental, les spécialistes du Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie (CANMET) effectuant des recherches sur les atmosphères explosives se sont acquis une réputation enviable. En effet, les travaux qu'ils ont réalisés dans le domaine de la reconnaissance des gaz, des poussières ou des radiations ont été très bien accueillis par le milieu minier. Mentionnons, à titre d'exemple, l'index de qualité de l'air plus représentatif des polluants diesels. Cet index a été fort utile aux opérateurs canadiens. Les spécialistes de ce laboratoire éprouvent, pour des fins de certification, divers types

Figure 2 Chambre de mesures automatisées de la réaction exothermique des explosifs au Laboratoire canadien de recherche sur les explosifs d'Ottawa.

Room providing automated measurements of the exothermic reaction of explosives, Canadian Explosives Research Laboratory, Ottawa.

d'équipement destinés à être utilisés dans les mines à atmosphères explosives, telles les mines de sel ou de charbon.

Les travaux de ce laboratoire sont principalement consacrés à l'amélioration des conditions de travail des mineurs. Une des avenues majeures de recherche à l'heure actuelle concerne la commercialisation de filtres de céramique pour les véhicules diesels qui permettent de réduire les émissions de suie, de monoxyde de carbone et de plusieurs autres polluants (fig. 3). Les travaux de vérification effectués après l'installation de ces filtres dans les mines souterraines indiquent une amélioration importante des conditions environnementales consécutive au contrôle des suies d'échappement des moteurs diesels. On serait en mesure de réduire l'aéragé des galeries dans les mines mécanisées où seraient utilisés de tels filtres. Ce sont sans aucun doute les petites mines qui bénéficieraient le plus de l'installation de ces filtres. Cette technologie en est rendue à l'étape

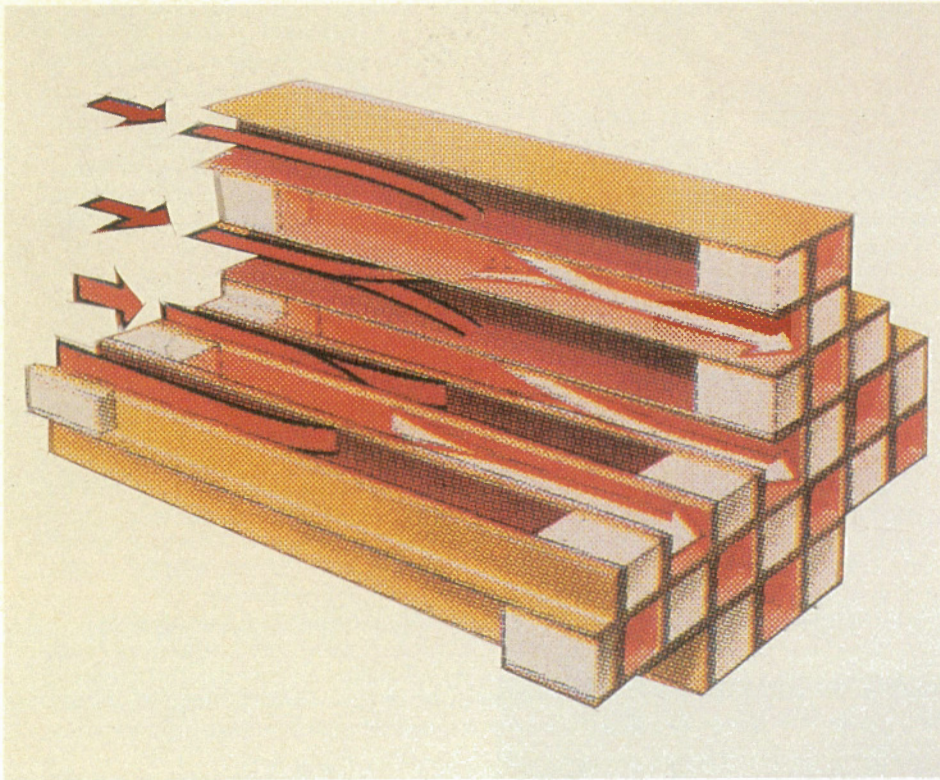


Figure 3 Principe de fonctionnement d'un filtre à céramique qui permet de réduire de 90 % les émissions de suie des moteurs diesels.

Operation of a ceramic filter. The filter reduces soot emissions from diesel engines by 90 per cent.

Figure 4 Système Macro seismic Instantil. Il mesure les tremblements de terre naturels et ceux induits durant l'activité minière.

Macro seismic Instantil system measures the intensity of both natural earthquakes and those induced by mining activity.

de fabrication commerciale et on prévoit qu'elle influera fortement sur l'élimination des polluants industriels.

Au cours de l'année écoulée, à la demande pressante de l'industrie, ce laboratoire a entrepris la réalisation d'un projet sur les explosions de sulfure. De telles explosions sont assez fréquentes dans les mines et représentent un danger pour les mineurs et l'équipement. Ces travaux devraient permettre d'en réduire la fréquence et d'améliorer la sécurité sous terre.

Le Laboratoire d'Elliot Lake consacre, pour sa part, ses efforts aux travaux de terrain, que ce soit en mécanique des roches, en mesures des poussières ou de la radioactivité sous terre. Il voit aussi à trouver des solutions aux problèmes engendrés par les résidus miniers. Les projets d'étude des coups de toit (fig. 4) et du remblai qui viennent de démarrer sont coordonnés par les chercheurs d'Elliot Lake. Toutefois, dans un avenir rapproché, les travaux sur le remblai seront dirigés à partir de Sudbury. Il y sera plus facile de superviser les contrats industriels puisque cette ville est située au centre des régions minières. Autre avantage, Sudbury possède les ressources matérielles permettant le déroulement d'essais de laboratoire pertinents.

Les laboratoires de CANMET œuvrent depuis longtemps dans le domaine de la mécanique des roches. Le parachèvement du volume intitulé *Pit Slope Manual* et la publication de celui intitulé *Principes de mécanique des roches* en sont



d'excellents exemples. Soit dit en passant, une étude de rentabilité sur le *Pit Slope Manual* a démontré un profit après investissement de 600 % à la suite d'un relèvement moyen de trois degrés des pentes de fosses. Un projet similaire, conçu par étapes, est en voie de réalisation dans le cas d'exploitations souterraines.

En outre, des initiatives de développement minéral ont été mises sur pied en vertu d'une entente intervenue entre le gouvernement fédéral, le gouvernement

de l'Ontario et l'industrie. Parmi ces initiatives, notons des études sur les coups de toit et sur le remblai qui ont commencé à produire des résultats fort intéressants. Par exemple, les remblais denses réduisent la manutention d'eau souterraine et des fines fluidisées, tout en améliorant l'homogénéité du soutènement (fig. 5). Plusieurs de ces travaux auront une incidence éventuelle sur les opérations minières canadiennes de petite et moyenne envergure. Quoique récemment obtenus, les résultats trouvent des applications importantes dans le secteur.

Le *Laboratoire canadien de technologie minière*, anciennement le *Laboratoire canadien de mécanique des roches*, effectue en laboratoire des essais de mécanique des roches (fig. 6) desquels on tire des modèles numériques capables de représenter les forces qui entrent en jeu dans la roche. Ce laboratoire comprend des groupes travaillant en technologie minière et en détermination des réserves minières.

Au moment de la crise énergétique, le gouvernement canadien était préoccupé par les possibilités d'épuisement des réserves d'uranium, une source d'énergie importante. Il a donc été formé un groupe à l'intérieur du Ministère chargé de scruter l'évolution des réserves de ce minerai devenu stratégique pour les réacteurs canadiens. Nos laboratoires ont reçu le mandat de garder à jour l'inventaire des réserves d'uranium et les

forages liés à l'exploration de ce minerai au Canada.

Au cours de ses premières années d'existence, ce groupe s'est consacré à la mise au point d'outils mathématiques qui assurent le traitement des données recueillies sur une base unique de comparaison. On a donc produit des programmes informatiques interactifs de codification et d'analyse des données de sondage et d'évaluation géostatistique minière (CADD/GEM). Par voie de transfert technologique, ce laboratoire a offert ses programmes au secteur privé et à d'autres secteurs de l'activité minière, aussi bien au Canada qu'à l'étranger.

À partir de ces travaux, nos chercheurs ont élaboré un projet visant la rationalisation des masses de données de prospection et de reconnaissance minière disponibles en vue de leur compilation dans un volume sur la prospection minière moderne. L'objectif essentiel de

cet ouvrage est de mettre les prospecteurs moins chevronnés en garde contre un certain nombre d'erreurs coûteuses couramment commises durant les travaux d'exploration.

Les chercheurs travaillent également à la diffusion de connaissances acquises au moyen de projets reliés à la sélection de séquences d'exploitation, et qui réduiraient les variations de teneur d'une mine. Ceci permettra d'augmenter la récupération des minéraux économiquement rentables des gisements exploités.

On effectue au Québec des travaux de terrain dont certains concernent les piliers de surface taillés à même la roche. Ces travaux visent à intégrer une approche d'ingénierie à une conception de chantiers sous-jacents. De plus, de nombreuses réalisations au Québec contribuent à approfondir nos connaissances de la masse rocheuse et de ses propriétés géomécaniques. Entre autres, un projet de tomographie d'un pilier de surface pourrait permettre de modéliser complètement le massif rocheux avec ses joints, sa grandeur véritable, sa localisation précise et son orientation. Munis de tels renseignements, on pourrait augmenter la sécurité des travailleurs.

Un autre contrat d'intérêt concerne la modélisation en trois dimensions des ouvrages souterrains en profondeur. Dans ce cas, l'objectif visé est double : d'une part, on cherche à réduire la complexité des modèles numériques disponibles et, d'autre part, on voudrait démontrer la validité de tels modèles dans le contexte d'une opération minière. Évidemment, ceci veut dire qu'il nous faudra effectuer de nombreuses mesures de contraintes dans l'exploitation en question. Les résultats prévus se traduiraient par la mise au point d'un modèle à la fois des plus perfectionnés et accessible aux opérateurs.



Figure 5 Remblai dense dans un point de soutirage. Aucune barricade!

Dense fill in a drawpoint. No bulkhead!

Figure 6 Essai de compression uniaxiale sur un échantillon de forage au Laboratoire de technologie minière d'Ottawa, et aménagement de la presse.

Uniaxial compression test of a bore sample and installation of the press at the Mining Technology Laboratory, Ottawa.



Bref historique

En 1907, le gouvernement a créé le ministère des Mines et sa Direction des mines. Le mandat de cette direction a été révisé à quelques reprises depuis lors afin d'y ajouter de nouvelles responsabilités. Ce n'est cependant qu'en 1975 que la Direction des mines est devenu le Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie (CANMET).

La recherche minière proprement dite a débuté au Ministère au début des années 50 par des travaux de relaxation des contraintes dans les mines de charbon de l'Ouest canadien. À la fin de la décennie, certaines études furent entreprises en relation avec les roches du Bouclier canadien. Ces recherches prirent de l'ampleur avec l'ouverture du laboratoire d'Elliot Lake en 1964 et l'établissement du Centre de recherches sur les techniques minières en 1967, dont M. D. F. Coates était le directeur.

Au cours des ans, les LRM de CANMET ont acquis une grande expertise dans le domaine de la mécanique des roches, des essais d'explosifs et de l'environnement minier. CANMET est passé maître dans l'art de mesurer le niveau du bruit, la concentration des poussières et des gaz, et les pressions de terrain aux fins de la réalisation de modèles. Il a à son actif la production de nombreux rapports privés et de publications scientifiques, dont les réputés *Pit Slope Manual* et *Principes de mécanique des roches*.

Avant 1985, sauf pour des travaux d'envergure nationale, tels que le développement du *Pit Slope Manual*, presque tous les travaux réalisés par les LRM tenaient de la recherche intérieure. Depuis deux ans, l'équilibre entre les travaux de recherche intérieurs et extérieurs a été grandement modifié, notamment à la suite d'ententes fédérales-provinciales.

Dans le cadre de l'Entente Canada—Manitoba, on prévoit plusieurs projets, dont un sur les critères de sélection pour la méthode d'exploitation moderne par tranches ascendantes. On étudie également diverses méthodes de consolidation des remblais de sable ou de résidus, après leur mise en place, afin de faciliter la récupération des piliers laissés entre les chantiers lors de la première phase d'exploitation. Dans le cadre d'un autre projet de contrôle du terrain, on cherche à évaluer la stabilité des lentilles exploitées en échelon.

À la suite des recommandations faites par le Comité consultatif extérieur de CANMET, le groupe de l'équipement et des méthodes minières des LRM étudieront, au cours des prochaines années, les problèmes de fragmentation et de halage du minerai (fig. 7). Il travaillera également à la mise en œuvre de méthodes destinées à accroître le rendement du matériel de transport. Le but de ces travaux consiste à définir les modalités qui permettront à l'industrie d'avancer sur la voie de l'automatisation, puis de la robotisation du matériel. Cette évolution devra obligatoirement passer par un contrôle plus poussé des fonctions vitales de la machinerie et par l'optimisation de l'entretien préventif.

Depuis le début de la décennie, des travaux exécutés à contrat ont permis la mise au point de machinerie de conception et de fabrication canadiennes : un tunnelier pleine section (page-

couverture) et une écailleuse mécanique. De par son efficacité, ce type de machinerie contribue favorablement à la balance commerciale canadienne. D'autres projets amorcés ne manqueront pas de déboucher sur des applications qui seront utiles aux opérateurs.

Nos laboratoires ont aussi contribué à la mise au point d'un prototype d'appareil qui, placé au bout du tube de carottage, serait capable de mesurer les déviations du forage et de les transmettre au mât de la foreuse à chaque addition de tige de forage. Un tel outil pourrait s'avérer utile en prospection de surface car il permettrait d'éviter les incertitudes et les erreurs d'interprétation.

Le développement du hissage vertical du minerai par pipeline est un autre projet auquel le gouvernement fédéral a contribué. Cette technologie, mise au point à Sudbury, réduit les crêtes de demande énergétique et permet de réduire le coût en main-d'œuvre, en plus de l'investissement requis pour accroître la production en milieu souterrain. Ceci pourrait contribuer à la rentabilité des petites sociétés minières du Québec lors de l'augmentation de leur rythme de production.

L'amélioration du rendement passe par l'utilisation de techniques de pointe, d'où un sujet d'importance pour l'industrie minière : les communications souterraines. Dans le cadre de l'Entente Canada—Manitoba sur l'exploitation minière,

la réalisation de travaux ont permis l'utilisation d'ondes à très basses fréquences qui voyagent sur le réseau de tuyauterie et les autres conducteurs. Ce réseau permet de réduire ainsi la demande de puissance et l'exigence de filage particulier. Au chapitre des avantages, mentionnons une amélioration au niveau des communications, lesquelles augmentent la sécurité des employés travaillant dans des endroits isolés, ainsi qu'une fiabilité accrue du transfert de données numériques, condition essentielle à une automatisation de l'équipement mobile en milieu souterrain.

En ce qui a trait aux logiciels, CANMET a octroyé à l'entreprise privée et ce, en vertu de l'Entente Canada—Ontario sur l'exploitation minière, un contrat de normalisation des logiciels pour la conception et les opérations minières. Le projet recommande l'utilisation du système de traitement UNIX plutôt que MS-DOS car il est plus apte à supporter diverses dimensions d'ordinateurs couramment employés. Les recommandations également formulées lors de ce projet portaient sur le langage de programmation « C », jugé plus approprié à la gamme des utilisateurs miniers. Les divers logiciels rendus disponibles à tous par ces recommandations devraient s'avérer fort utiles aux exploitations minières du Canada.

Un projet consécutif au précédent concerne la mise au point d'un ensemble de logiciels qui agiraient comme outil de soutien au personnel de gestion. Il s'agit de programmer l'ensemble des rapports d'ouvrier, de contremaître et d'autres niveaux de supervision, en plus de sauvegarder l'information afférente au matériel roulant ou stationnaire et aux entrepôts.

Un projet qu'il serait intéressant de promouvoir au cours des prochaines années porte sur les câbles de hissage. La technique présentement utilisée pour les essais non destructifs ne permet pas de suivi de tous les câbles employés. Il serait important de mettre au point un nouvel instrument qui pourrait remplacer avantageusement le système actuel et améliorer la sécurité dans les puits, particulièrement dans le cas des treuils à friction.

Depuis deux ans environ, nous exécutons des projets de recherche appliquée à l'échelle industrielle répartis sur cinq ans. Attendus depuis longtemps, ces projets ont été rendus possibles grâce aux ententes sur l'exploitation minière. La somme consacrée à ces projets est



d'environ 10,5 millions de dollars et elle sera dépensée dans l'industrie même.

Avant 1984-1985, les LRM consacraient environ 20 % de leurs ressources à la recherche contractuelle, et cela pour un total d'environ 1,5 million de dollars. Depuis, cette proportion est passée à environ 50 %, ce qui a eu un effet très positif sur l'orientation des activités des laboratoires, sur les communications avec l'industrie, sur la pertinence de nos travaux et sur le moral de notre personnel.

CANMET a la ferme intention de continuer à mettre sur pied des projets qui tiennent compte des besoins de l'industrie. Les orientations des laboratoires sont déterminées en fonction des recommandations de comités consultatifs

constitués de représentants industriels, universitaires et gouvernementaux.

CANMET voit dans la recherche contractuelle extérieure un mécanisme très utile permettant d'accroître l'envergure des activités du milieu minier. Les contrats de recherche, et en particulier ceux réalisés à l'intérieur des ententes fédérales-provinciales, constituent, tant pour l'industrie que pour nos laboratoires, un moyen d'atteindre des objectifs précis sur des sujets considérés prioritaires. On peut définir plusieurs retombées additionnelles pour les chercheurs, par exemple une évaluation plus juste des besoins industriels, une portée accrue des travaux réalisés et une diffusion plus rapide des résultats.

Figure 7 Télécommande d'une chargeuse-navette dans une mine souterraine.

Remote control of a shuttle loader in an underground mine.

The article identifies the various CANMET Laboratories and focuses on activities of the Mining Research Laboratories. The Canadian Explosives Research Laboratory tests all explosive products manufactured for civilian use in Canada. The Canadian Explosive Atmospheres Laboratory tests electrical equipment to be used in explosive atmospheres, develops standards for underground air quality and studies ways to reduce diesel emissions. The Elliot Lake Laboratory is a field unit, mainly concerned with rock mechanics model testing and environment quality measurements and control. The Canadian Mining Technology Laboratory carries out rock properties studies and develops standards for tests and theoretical models to be checked in the field. The unit also maintains a data

bank on Uranium in Canada, and encompasses a group dedicated to studies of mining methods and equipment.

Other CANMET MRL activities centre around work done outside on contract, such as studies not suitable for internal scientists or projects requiring extra personnel for a short duration. Such contracts are awarded either by tender or in response to unsolicited proposals. As a result of federal-provincial agreements on mineral development, the federal government has been involved with various provincial governments in mining technology developments and transfers at mine sites, in order to ensure a Canadian technology specifically suited to local needs.

This article is also available in English.

M. John E. Udd est directeur des LRM de CANMET. Il a été contremaître et chercheur-ingénieur pour la société minière IOC. De plus, M. Udd a été professeur associé et directeur du Programme minier à l'Université McGill, chef-ingénieur en stabilité à la Golder Associates, directeur du Bureau de liaison des collèges et des écoles pour l'Université McGill, et ingénieur en chef du contrôle de terrain pour la société Falconbridge.

M. André Boyer est spécialisé en géologie minière. Il est chercheur en sciences physiques aux LRM de CANMET à Ottawa. En plus de ses activités reliées à l'inventaire des réserves, M. Boyer s'occupe des travaux amorcés sur l'amélioration des techniques d'exploration minière. Il est membre de l'Association professionnelle des géologues et des géophysiciens du Québec.

M. Noël R. Billette a obtenu un doctorat en génie minier de l'École polytechnique de Montréal. Il est chercheur spécialisé en planification minière aux LRM de CANMET à Ottawa. M. Billette est également ingénieur professionnel de l'Ontario et membre de l'ICMM.

Frontier Geoscience Program in Action!

Lacustrine oil shales — Carboniferous precursor to a rift basin



Figure 1 Typical topography of Grinnell Peninsula, Devon Island, illustrating Belcher Channel carbonates (BC), Canyon Fiord redbeds (CF) and Emma Fiord oil shales or marlstones (EF)

Topographie typique de la péninsule de Grinnell, dans l'île Devon. On peut y voir les carbonates de Belcher Channel (BC), les couches rouges de Canyon Fiord (CF) et les schistes bitumineux ou marnes indurées d'Emma Fiord (EF).

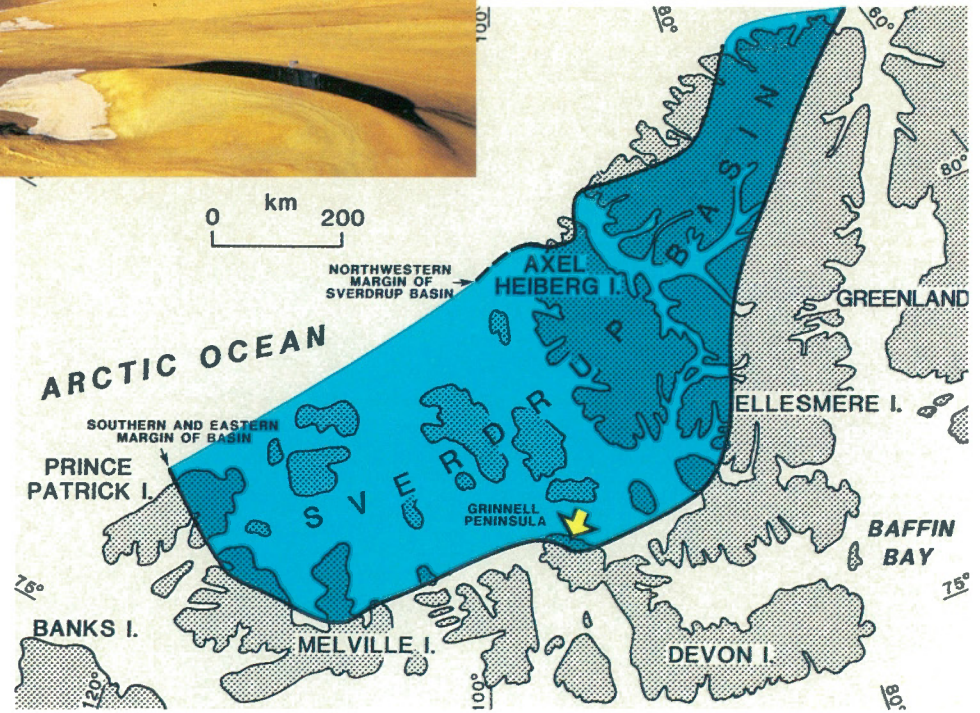
by G.R. Davies and W.W. Nassichuk

The authors and some of their associates at the Institute of Sedimentary and Petroleum Geology (ISPG) in Calgary have recently described 'oil shales' deposited in a Carboniferous lake during the earliest stages of formation of the Sverdrup rift basin (Figs. 1, 2) in the Canadian Arctic Archipelago.

The Geological Survey of Canada's Frontier Geoscience Program (FGP) is designed to accelerate the study of sedimentary basins in Canada's frontier areas in anticipation of future exploration for oil and gas. Two specific FGP objectives influenced the ISPG oil-shale project: first, to describe the tectonic and sedimentary evolution of oil- and gas-bearing basins, and second, to elucidate the processes governing generation, accumulation and preservation of hydrocarbon resources. In this article we illustrate the significance of lacustrine sediments as petroleum source rocks and demonstrate that lacustrine sediments are commonly the oldest sequences deposited in evolving rift basins.

From Precambrian time, more than 570 million years ago, to the present, lakes and their sediments have formed in many different climatic, geographic and tectonic settings. On a global geological scale, lacustrine rocks are relatively rare, yet the petroleum industry is becoming increasingly interested in the economic significance of this often-overlooked sedimentary facies.

This new interest stems from the association of lacustrine sediments with major oil and gas fields in China, with oil and gas discoveries in the Atlantic-margin pull-apart basins of West Africa and eastern South America, and the attempts at economic recovery of oil from in situ mining of lacustrine oil shales in the United States, Australia and elsewhere. Established oil and gas production from North American lacustrine deposits such as the Eocene (early Tertiary) Green River Formation and similar rocks in Utah,



Wyoming and Colorado further encourages this interest. In many of these sites, oil and gas are trapped in sandstone reservoirs along lake margins, but the hydrocarbons derive from the lacustrine infill.

Lacustrine rocks and hydrocarbon accumulations are often found together because rich oil source rocks form in lake environments. Many deep and relatively permanent lakes develop density, thermal and chemical stratification (Fig. 3). The upper, oxygenated water mass supports great biological activity and biomass, which often occurs as seasonal algal or cyanobacterial blooms; the lower anoxic water mass preserves the algal and bacterial organic matter from oxidation and biodegradation after it sinks downward from the upper layer. (A recent example of the complex physicochemical processes that may occur in stratified lakes was the catastrophic expulsion of trapped CO₂ gas from Lake Nyos in Cameroon, West Africa, which caused the death of more than 1700 people.)

If a lake is fed by carbonate-saturated streams draining over exposed carbonate rocks, the upper lake water will contain abundant carbonate particles. Periodic

Figure 2 Sverdrup Basin in the Canadian Arctic Archipelago. Arrow indicates Grinnell Peninsula, Devon Island, site of the Emma Fiord Formation lacustrine oil shale deposits

Le bassin de Sverdrup dans l'archipel Arctique canadien. La flèche indique la péninsule de Grinnell, dans l'île Devon, où se trouvent les dépôts de schistes bitumineux lacustres de la formation d'Emma Fiord.

precipitation of fine carbonate in the upper water mass during evaporation may result in an accumulation of carbonate mud, commonly interlaminated with layers of organic matter, on the lake bottom (Fig. 3). The resulting sediment, a mixture of organic matter, fine crystalline carbonate and admixed fine clays carried in by streams and wind, is an organic marl — or marlstone when compacted and indurated. Historical geological usage has incorrectly applied the term oil shale to this potentially rich marlstone oil source.

Organisms often found in lake sediments, in addition to cyanobacteria and other microorganisms, include freshwater or euryhaline pelecypods and gastropods, ostracods, charophytes and a wide variety of filamentous, tufted and other algae.

Phosphatic bone fragments from fish or other vertebrates may also be present. In lakes with closed drainage systems in arid to semiarid climates, excessive evaporation over inflow, commonly seasonal, results in saline lakes. Calcium sulphate (gypsum) and sodium chloride (halite) or, less commonly, trona, nahcolite and dawsonite may precipitate to the lake bottom. These nonmarine lacustrine evaporites may be closely associated with other periodically desiccated 'playa' sedimentary deposits.

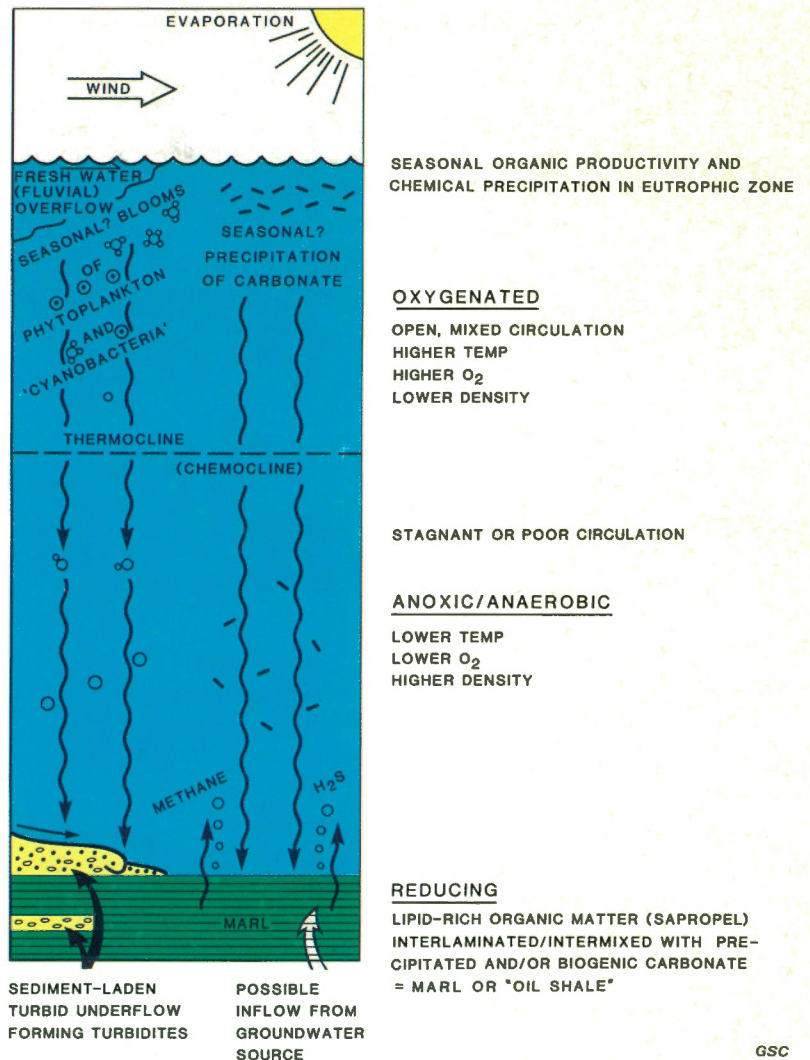
Rift basins

Renewed interest in lakes and their geological product is also sparked by the recognition that they are a common and integral part of the sedimentary record in the early formative phase of rift valleys and rift basins. Concepts of rift tectonics have changed markedly in the last few years. A new model has emerged; it postulates a half-graben bounded on one side by curved listric faults as the fundamental structural unit (Fig. 4a).

Rifting results from tensional or extensional tectonics developing (normally) within a continental plate of Earth's lithosphere. First, blocks of crustal rocks tilt downwards in a series of half-graben structures along a fault-controlled linear belt termed a rift valley. If the rift valley phase does not spread laterally or 'pull apart' very far, long linear depressions, like the present Great Rift Valley that runs from Syria to Mozambique through eastern Africa, may result. If the rift spreads far enough and deep enough for the sea to invade the depression, relatively narrow seas such as the present Red Sea or the ancient Sverdrup Basin in the Canadian Arctic Islands and the Windsor Basin of eastern Canada may form with very distinctive sedimentary fill. If rifting and spreading continue for a long time, with the creation of new oceanic crustal rocks by submarine volcanic activity in the centre of spreading, open marine conditions will be established between the separating continental plate segments and a new ocean will be created. The best example of this is the present Atlantic Ocean, particularly in the South Atlantic where the rift is made obvious by the close geometric fit of the outer margins of the continental shelves of eastern South America and western Africa.

Lakes usually appear in the early rift valley or half-graben phase of this tectonic setting (Fig. 4a). Lakes and marshes form in depressions created by the rotation and sinking of downfaulted blocks adjacent to large, downward-curving listric faults. Some lakes may form before the new fault scarps that rise along one margin of the rift structure are greatly eroded. If the lakes are deep enough and exist for long enough, they may develop characteristic thermal and chemical stratification and accumulate

PRINCIPAL CHEMICAL AND SEDIMENTARY CHARACTERISTICS OF A PERMANENTLY STRATIFIED (MEROMICTIC) LAKE WITH ANOXIC BOTTOM WATER



GSC

organic-rich marly sediments on the bottom.

When clastic wedges of continental and fluvial sandstones and conglomerates are deposited adjacent to fault scarps, on the graben floor and at lake margins, the potential for hydrocarbon accumulations is established. As the rift valley sequence is progressively buried by younger sediments, and thermal maturation of kerogen (organic matter) in the lacustrine source rocks forms oil and gas, the hydrocarbons may migrate into and become trapped in the surrounding porous sandstone and conglomerate overlay (Fig. 4b).

Emma Fiord Formation

The recently documented oil shale or marlstone in the Canadian Arctic Archipelago occurs in the Viséan (early Carboniferous, 335 to 345 million years ago) Emma Fiord Formation, the Sverdrup Basin's oldest sedimentary unit. The Sverdrup rift basin extends for 1300 km from Prince Patrick Island in the southwest to northern Ellesmere Island in the northeast, and contains at least

Figure 3 Summary of principal processes and products in a stratified lake

Résumé des principaux processus et éléments propres aux lacs stratifiés.

13 km of strata ranging in age from Carboniferous to Tertiary. The Sverdrup Basin may be linked to similar rift basins in northern Greenland and Svalbard, where lacustrine sediments similar in age and composition to the Emma Fiord Formation are known.

The Emma Fiord oil shales are exposed as a localized deposit of black marlstone (Fig. 5) with thin interbeds of limestone and thicker interbeds of sandstone and conglomerate on Grinnell Peninsula, Devon Island (Figs. 1, 2). Here, the oil shale is immature to marginally mature for oil generation, and is composed of fine carbonate and liptinite-rich kerogen. The oil shale contains a very high level, up to 60 per cent, of organic carbon. We deduce that Emma Fiord marlstones formed in a stratified lake during the earliest phase of the Sverdrup Basin's rift

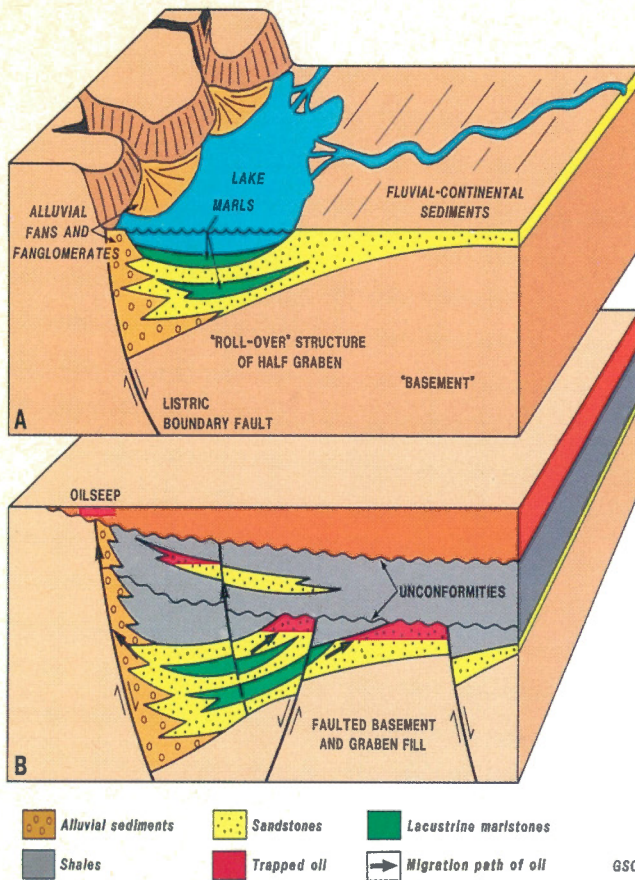


Figure 4a Sedimentary environments within a listric-faulted half-graben, emphasizing the development of lakes and of organic-rich lacustrine muds (marl or marlstone) on the lake floor. Note the asymmetry of environments and sedimentary facies contrasting with the bilateral symmetry in an idealized full graben

Environnements sédimentaires au sein d'un demi-graben limité par des failles listriques faisant ressortir la formation de lacs et le dépôt, sur leur fond, de boues lacustres riches en matière organique (marne ou marne indurée). Il est intéressant de noter le contraste entre l'asymétrie des environnements et des faciès sédimentaires et la symétrie bilatérale d'un graben théorique.

Figure 4b Projection in time of the lacustrine and associated sedimentary facies illustrated in Fig. 4a, with progressive structural subsidence and burial by younger sediments, placing the lacustrine oil shales or marlstones in the time period for oil generation. Oil sourced from marlstones migrates through permeable sandstones or along faults to become trapped as hydrocarbon pools or to escape to the surface as oil seeps

Projection dans le temps des faciès sédimentaires lacustres et des faciès connexes illustrés à la figure 4a montrant une subsidence structurale progressive et un enfouissement graduel sous des sédiments plus jeunes, ainsi que le temps nécessaire à la transformation de la matière en pétrole dans les schistes bitumineux lacustres ou marnes indurées. Le pétrole issu des marnes indurées migre à travers des grès perméables ou le long de failles et se fait piéger sous forme de gisements ou poursuit sa migration et suinte à la surface.

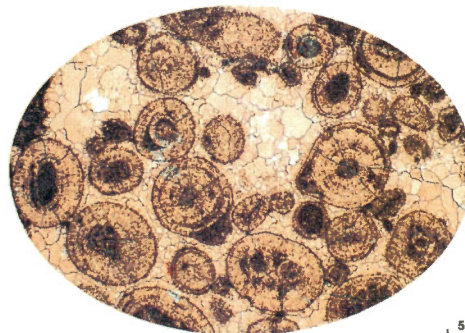


Figure 6a Thin-section photomicrograph of oolitic grainstone from a thin limestone bed in the Emma Fiord Formation. Ooids are formed by precipitation of multiple envelopes of calcium carbonate around a nucleus, and are characteristic of high-energy (generally wave-agitated), carbonate-supersaturated environments. The grainstone is cemented by pink-stained sparry calcite. Arrows indicate one or more asymmetric micrite nodes on many of the ooids

Photomicrographie d'une lame mince de grainstone oolithique provenant d'une couche de calcaire mince de la formation d'Emma Fiord. Les oolithes se forment par précipitation de nombreuses enveloppes de carbonate de calcium autour d'un noyau, et sont typiques des milieux à forte énergie (généralement agités par des vagues) et sursaturés en carbonates. Le grainstone est cimenté par de la calcite spathique rosée. La flèche indique un ou plusieurs noeuds de micrite asymétriques sur de nombreux oolithes.

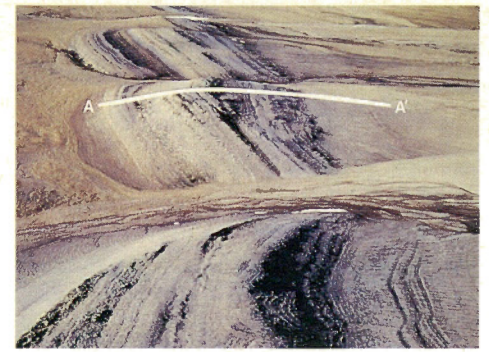


Figure 5 Typical exposure of the Emma Fiord Formation (A-A') on Grinnell Peninsula. Black marlstones dip northward, with the base of the sequence out of view to the left. Note the absence of plant coverage, typical of the High Arctic setting

Affleurement typique de la formation d'Emma Fiord (A-A') dans la péninsule de Grinnell. Les marnes indurées noires plongent vers le nord. La base de la séquence, qui n'est pas visible ici, se situe à gauche. L'absence de couverture végétale est caractéristique de l'environnement arctique.

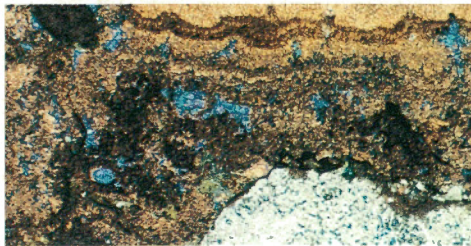


Figure 6b Thin-section photomicrograph of an algal oncolite with alternations of precipitated calcite, similar to ooids, and micritic algal layers. The oncolite is nucleated on a chert grain. The surrounding matrix contains a wide variety of other algal clasts, partly cemented by blue-stained ferroan calcite

Photomicrographie d'une lame mince d'une oncolithe algale renfermant des alternances de calcite précipitée ressemblant à des oolithes et de couches algales micritiques. Le noyau de l'oncolithe est un grain siliceux. La matrice environnante renferme une foule d'autres fragments de roches détritiques algales partiellement cimentés par de la calcite ferrugineuse bleutée.



A



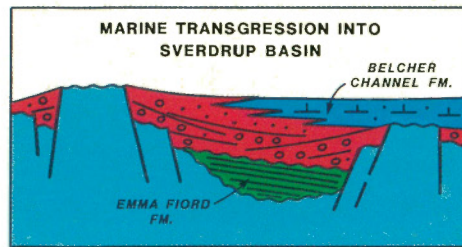
B

Figure 7a, b Examples of algal tufa intermixed with chert granules in coarse-textured interbeds in the Emma Fiord marlstone sequence. Tufa is biochemically precipitated calcium carbonate (calcite) in which molds of filamentous and arborescent algae commonly are preserved. Tufa is typical of many carbonate-saturated freshwater lakes and also of hot springs

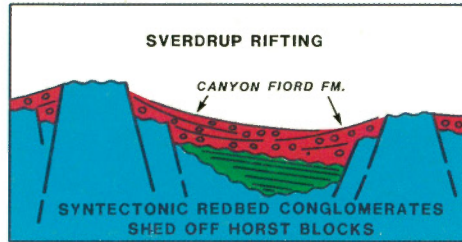
Exemples de tuf calcaire algal entremêlé de granules siliceuses dans des interstratifications de texture grossière, dans la séquence des marnes indurées d'Emma Fiord. Le tuf calcaire est du carbonate de calcium précipité par voie biochimique (calcite); y sont souvent préservés des moules d'algues filamenteuses et arborescentes. Le tuf calcaire est typique de nombreux lacs d'eau douce saturés de carbonates ainsi que des sources thermales.

development, before the fault-bounded scarps that formed the margins of the developing rift were significantly eroded. Streams drained into this lake over Silurian or older carbonate rocks. The surface water of the lake was saturated with carbonate, and carbonate mud intermixed with algal organic matter precipitated to form an organic marlstone on the lake bottom. At the lake margins, probably when water levels were low and waves agitated the shallow sands, algal oncoids, coated grains and ooids (Figs. 6a, b) were formed. These carbonate grains were created when calcium carbonate precipitated and formed thin envelopes around nuclei of quartz grains and other clasts. Occasionally the calcium carbonate spread outward across the lake to form thin limestone layers.

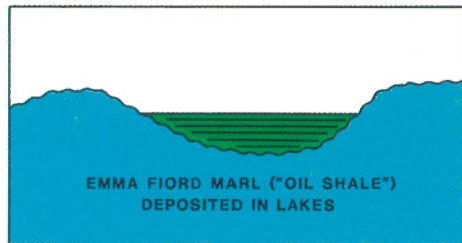
Remains of small vertebrates are found on some of these beds. Another common component of the lake sediment is algal 'tufa' (Fig. 7), characteristic not only of the Emma Fiord Formation and other lacustrine settings, but also of hot springs. We believe the interbedded sandstones and conglomerates, which get thicker towards the top of the unit, are



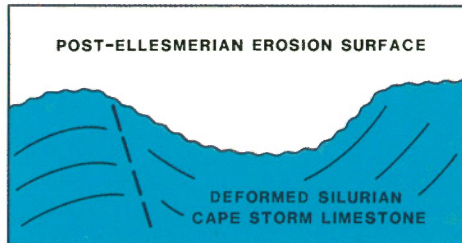
4. LATE CARBONIFEROUS



3. EARLY-MID CARBONIFEROUS



2. EARLY CARBONIFEROUS-VISÉAN



1. LATEST DEVONIAN, EARLIEST CARBONIFEROUS

the first syntectonic clastics eroded from newly created fault scarps at the evolving rift basin's margin (Fig. 8).

Although the Emma Fiord marlstones exposed on Devon Island form only a small, marginal segment of the Sverdrup Basin's sedimentary fill, we suggest that related lacustrine sedimentary rocks lie below the more deeply buried core of the rift basin. If so, they may provide a potential hydrocarbon source for nearby early syntectonic sandstones or conglomerates in the basin.

As scientists gather and analyze more data from exploratory wells and seismic surveys across continental-margin and intracontinental rift basins, the contribution of the lacustrine sedimentary assemblage will undoubtedly receive more emphasis and its geology and geochemistry become more refined. We hope the Frontier Geoscience Program will continue to play a role in this process by providing a special stimulus for data analyses and geological research.

Figure 8 Tectonosedimentary evolution of the Emma Fiord lacustrine oil shales developed prior to or almost synchronously with the onset of major faulting and formation of the Sverdrup Basin, followed by the deposition of syntectonic conglomeratic redbeds of the Canyon Fiord Formation and the first marine carbonates in the Belcher Channel Formation

Évolution tectonosédimentaire des schistes bitumineux lacustres d'Emma Fiord formés avant que ne débutent, ou presque au moment où débutaient, une importante étape de création de failles et la formation du bassin de Sverdrup, suivie du dépôt des couches rouges conglomératiques syntectoniques de la formation de Canyon Fiord et des premiers carbonates marins de la formation de Belcher Channel.

Le Programme géoscientifique dans les régions pionnières (PGRP) de la Commission géologique du Canada est conçu pour accélérer l'étude des bassins sédimentaires dans les régions pionnières du Canada, en prévision de la recherche de pétrole et de gaz naturel dans l'avenir.

Des scientifiques de l'Institut de géologie sédimentaire et pétrolière (IGSP) de Calgary ont récemment décrit des 'schistes bitumineux' qui se sont déposés dans un lac d'âge carbonifère au cours des premières étapes de la formation du bassin d'effondrement de Sverdrup dans l'archipel Arctique canadien. Deux objectifs du PGRP ont influé sur le projet de l'IGSP : premièrement, décrire l'évolution tectonique et sédimentaire de bassins renfermant du pétrole et du gaz naturel; deuxièmement, déterminer les processus régissant la production, l'accumulation et la préservation des ressources en hydrocarbures.

Cet article montre l'importance de sédiments lacustres comme roches-mères pétrolières et démontre que les sédiments lacustres constituent souvent les premières séquences à s'être déposées dans les bassins d'effondrement en évolution.

Cet article est aussi disponible en français.



Dr. Walter Nassichuk (left) is Director of the Geological Survey of Canada's Institute of Sedimentary and Petroleum Geology in Calgary. Dr. Graham Davies is the cofounder of AGAT Consultants in Calgary and Denver and president of his own geological consulting company. Both scientists have spent many years in Arctic exploration and have published more than 60 papers in Arctic geoscience.

L'éolienne de Kuujjuaq

par Réal Reid et Sylvain Vézina

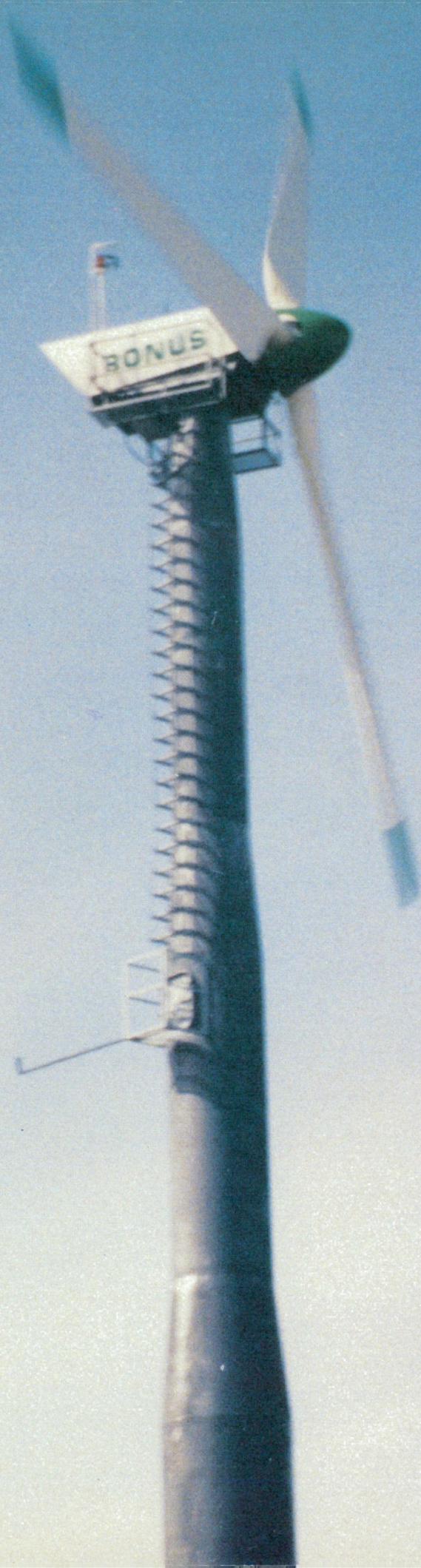
Avec le couplage d'une éolienne à axe horizontal au réseau électrique-diesel de Kuujjuaq, Hydro-Québec se propose de démontrer que l'énergie éolienne peut réduire de façon appréciable les coûts de production d'électricité dans ce genre de réseau.

De plus en plus, les habitants des régions périphériques désirent réduire leur dépendance énergétique liée aux importations de pétrole. Par conséquent, l'utilisation d'une énergie renouvelable prend toute sa signification. La rigueur du climat arctique et les coûts découlant du transport des approvisionnements pétroliers justifient pleinement les tentatives d'amortissement des dépenses énergétiques du Grand Nord.

Ainsi, l'Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ), le ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources et le groupe Équipement d'Hydro-Québec ont conjointement investi dans un projet

Figure 1 Du haut de ses 18 m, l'éolienne à axe horizontal de Kuujjuaq pourra produire jusqu'à 100 000 kWh annuellement.

At 18 m high, the Kuujjuaq horizontal-axle windmill can produce up to 100 000 kWh of electricity annually.



de démonstration pour les collectivités éloignées. Ce projet vise à démontrer la faisabilité technique de l'installation d'une éolienne, raccordée à un réseau électrique alimenté au diesel et isolé des grands réseaux de distribution. Il a pour principal objectif d'économiser du pétrole en région périphérique, plus spécifiquement au moyen de l'installation, à Kuujjuaq, d'une éolienne expérimentale d'une hauteur de 18 m et d'une puissance de 65 kW (fig. 1).

L'éolienne à axe horizontal retenue pour l'expérience a été fabriquée par la société danoise Bonus, chef de file mondial de cette technologie. Elle est peu coûteuse à l'achat, a été maintes fois éprouvée dans des conditions climatiques aussi extrêmes que celles prévalant au Nouveau-Québec et a pleinement atteint les normes de fiabilité fixées dans le cadre du projet. Dans le but de répondre aux exigences du climat arctique de Kuujjuaq, quelques modifications ont été apportées au modèle original. Par exemple, certaines composantes mécaniques de l'éolienne ont été hermétiquement isolées et chauffées pour permettre l'opération du système à des températures de $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Quant à la tour,

elle est fabriquée avec un acier spécial résistant aux chocs à basse température. Cette éolienne est opérationnelle depuis octobre 1986, et a déjà démontré toutes ses possibilités dans ce milieu rigoureux.

Caractéristiques techniques de l'éolienne

La région Montmorency d'Hydro-Québec, un détachement régional de la société d'État responsable de l'exploitation des réseaux non reliés au réseau principal de transport, s'est chargée d'apporter l'éolienne, de l'installer sur le site et de construire des fondations. L'une des grandes qualités de l'éolienne d'ailleurs est qu'elle est facilement transportable. Toutes les pièces qui la composent peuvent être rangées dans un seul conteneur, réduisant ainsi sensiblement les coûts exorbitants de transport des matériaux dans le Grand Nord. Malgré l'accès difficile des sites dans les régions éloignées, l'érection de l'éolienne de Kuujjuaq a été complétée par quatre hommes, seulement à l'aide d'un trépied et de treuils (fig. 2).

L'éolienne Bonus est munie de trois pales à pas fixe et d'une génératrice asynchrone 600 V/60 Hz. Selon les

prévisions, elle pourrait produire annuellement 100 000 kWh; en d'autres termes, l'éolienne permettrait de réduire de 1 % (40 000 L) la consommation actuelle de carburant diesel de la collectivité. Les habitants de Kuujjuaq soutirent actuellement leur énergie électrique d'une centrale diesel composée de trois groupes électrogènes de 800 kW chacun.

Critères d'évaluation du projet

L'Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ) surveille le déroulement des opérations et rédige des rapports d'évaluation en vue de soupeser les avantages et les inconvénients de cette éolienne expérimentale. Un système de transmission d'informations sur l'éolienne Bonus a été installé et acheminé, via satellite, un rapport journalier au centre

Figure 2 L'assemblage de l'éolienne est complété et l'équipe chargée de son installation l'érige au moyen d'un treuil.

The windmill is completely assembled; the team responsible for installing it winches it into place.





de réception des données d'Hydro-Québec à Montréal.

Ce rapport contient les moyennes, calculées toutes les cinq minutes, de la puissance et de la vitesse du vent, ainsi que les commentaires des opérateurs sur le rendement général de l'éolienne.

Ainsi, pendant un an, l'IREQ recueillera les données et veillera au contrôle strict des résultats. Outre la vitesse et la direction du vent, les paramètres suivants sont mesurés :

- L'énergie produite;
- Le nombre d'heures d'opération;
- La puissance moyenne et maximale;
- La demande totale du réseau;
- La fiabilité et la disponibilité du système éolien;
- La performance et le rendement général du système;
- Le sommaire des bris et des réparations effectuées.

Éventuellement, si les résultats du projet de démonstration de Kuujjuaq s'avèrent positifs, ce type d'installation pourrait être étendu au Nouveau-Québec, soit 12 réseaux éloignés desservis par Hydro-Québec (fig. 3). Les applications

Figure 3 L'éolienne est raccordée à un réseau électrique alimenté au diesel et isolé des grands réseaux de transport.

The windmill is linked to an electric grid fueled by diesel oil and detached from the large transportation grids.

techniques découlant du projet pourraient être exportées dans d'autres régions où il serait possible d'implanter un système éolien, soit les autres réseaux non reliés de la province, du Canada et même de l'étranger, à la suite d'ajustements pour les conditions locales (coût du combustible, températures, verglas, vélocité des vents, etc.).

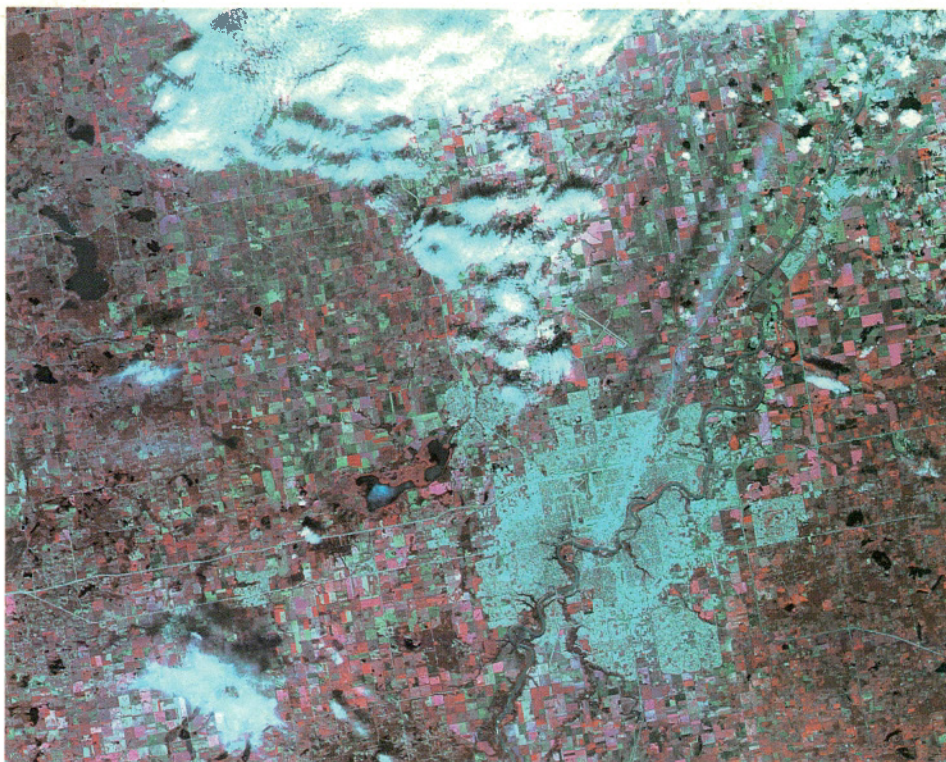
En somme, le projet de Kuujjuaq sabrerait singulièrement dans les dépenses en approvisionnement pétrolier tout en permettant de développer une nouvelle technologie de pointe dans le domaine des énergies renouvelables et de remplacement. Ce qui était considéré auparavant comme un fléau dans le Grand Nord québécois est en voie de devenir une richesse naturelle inépuisable.

With the collaboration of certain partners, Hydro-Québec is proposing to demonstrate the technical feasibility of installing a windmill at Kuujjuaq. The windmill would be linked to a diesel-powered electric grid and detached from the large transportation grids. This daring demonstration project has brought to the far north an experimental windmill with a horizontal axle which will use a form of renewable energy that could allow remote communities to reduce their consumption of oil.

This article is also available in English.

M. Réal Reid est ingénieur à l'Institut de recherche d'Hydro-Québec. Il a fait des études en ingénierie au Council Institute of Technology. Il a travaillé successivement en combustion de turbines à gaz à Pratt & Whitney Canada, et en pollution de l'air à Environnement Canada. Depuis 1980, M. Reid est ingénieur en énergie éolienne à Hydro-Québec.

M. Sylvain Vézina est rédacteur adjoint à la revue GEOS.



Multispectral image of Edmonton area just after the August 4, 1987 tornado. In this standard image, colors indicate type of vegetation, and urban area is clearly defined

Image multispectrale de la région d'Edmonton prise juste après la tornade du 4 août 1987. Dans cette image normalisée, les couleurs indiquent le type de végétation, et la zone urbaine est facilement reconnaissable.

117-kilometre swath of the earth's surface on each pass.

One key feature of the SPOT instrument package is the provision for off-nadir viewing. The instrument is pointable and can 'look' 27° to the east or west of its track. This innovation introduces the possibility of more frequent coverage, a factor particularly useful for monitoring localized phenomena such as forest fires or floods. It also decreases the chance of missing important data because of cloud cover (Fig. 1).

Off-nadir viewing also allows SPOT to record the same surface during different passes and from different angles to produce stereoscopic pairs of images.

Data

The Canada Centre for Remote Sensing receives SPOT data at two satellite receiving stations: Gatineau, Quebec, and Prince Albert, Saskatchewan. By late October 1987 more than 149 516 scenes had been recorded. Of these, 15 244 are designated cloud-free images or images with less than 10 per cent cloud over the entire image. Snow-covered scenes that are included in this group may not be useful for all applications. The data recorded are processed and distributed in a full range of digital or photographic products (Table 1).

The CCRS User Assistance Unit in Ottawa is the contact point for general information, requests and advice on applications. One service available to users is a computer-based catalogue of recorded SPOT scenes. This catalogue is updated monthly and may be searched to determine the available imagery for a specific area.

Capability

LANDSAT satellites have yielded images to update maps, calculate the extent of forest fires, monitor sediment in water, assess wetlands for wildlife habitat, track icebergs, help in mineral exploration, monitor where water is being used in irrigated areas, estimate potato acreages and even assess the possible yield of wild mushrooms.

SPOT will be able to provide useful information in some of these areas, but not all, because of its more limited range

SPOT: A New Window on Canada

by Bob Ryerson and Jean Game

The launch of France's earth observation satellite SPOT in February 1986 was an important event for resource monitoring in Canada

SPOT's launch gave earth observation activities a certain legitimacy. It proved that someone other than the largest space powers could plan, build and operate a sophisticated system to provide the images that are now becoming an essential part of resource management.

SPOT (Système Pour l'Observation de la Terre) is also a commercial venture. France will attempt to operate the satellite and distribute the images on a cost-recovery basis.

Canada has a central role. Its expertise was tapped, through EMR's Canada Centre for Remote Sensing (CCRS), for data reception and initial production of images for all of the very important North American market. In addition, CCRS is responsible for developing applications and marketing Canadian data in our domestic market. Already, our industry has profited from selling Canadian SPOT-related know-how to other countries, including India and

Thailand, which are producing SPOT imagery with Canada's technology.

Equipment

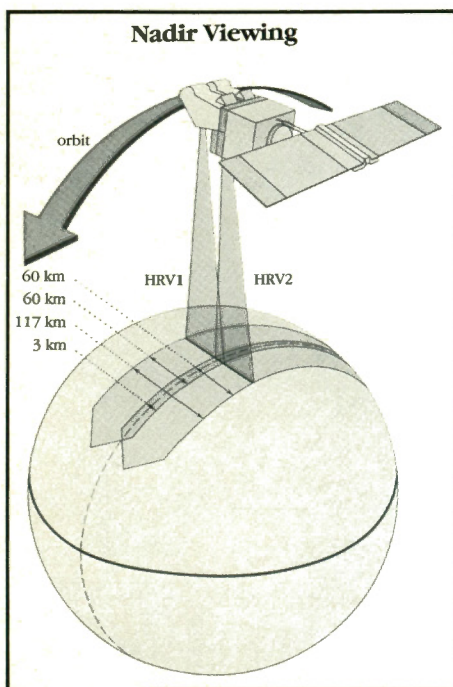
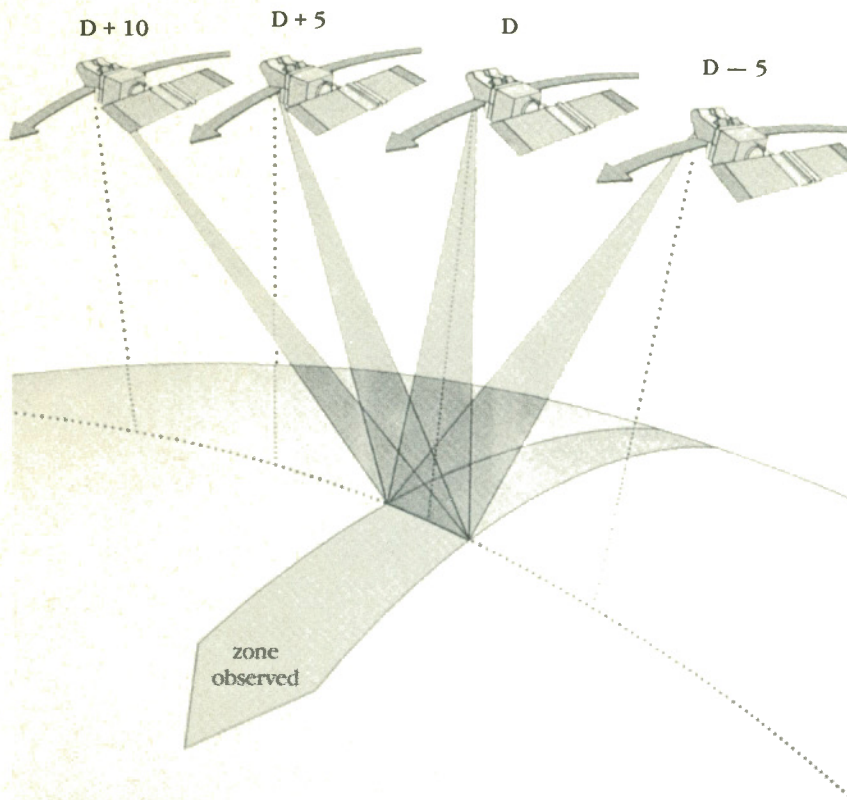
The SPOT-1 spacecraft carries two virtually identical High Resolution Visible (HRV) solid state imagers of the type first tested in Canada on board CCRS aircraft. The imagers are designed to operate in the visible and infrared parts of the spectrum in either of two modes, black and white Panchromatic Linear Array (PLA) with 10-metre resolution or color Multispectral Linear Array (MLA) with 20-metre ground resolution.

Of the earth-resource satellite imagers the 10-metre Panchromatic sensor is the most sensitive in terms of spatial detail: information is obtained by averaging returns over a ground area just 10 metres square. The first LANDSAT sensor, the Multispectral Scanner, had 80-metre resolution.

Each HRV imager views a 60-kilometre swath, and the HRVs in tandem see a

Revisit Capabilities

one pass each on days:



of spectral channels. For some purposes SPOT will be better. Its smaller area of coverage per image (60 km × 60 km compared with 180 km × 180 km) and greater cost, \$900 compared with \$400 for one LANDSAT image, are seen to be limitations by 'traditional' users of satellite data. But SPOT is not meant just for traditional users.

Figure 1 By pointing SPOT's mirrors 27° to the east or west of its track, we can see any location within a 950-km-wide corridor. Using this off-nadir viewing, SPOT can revisit an area at least twice a week, depending on latitude. The innovation vastly increases SPOT's flexibility and decreases the chances of missing important data because of cloud cover

En orientant les miroirs de SPOT à 27° de sa trajectoire, en direction est ou ouest, nous pouvons observer tout ce qui se trouve dans ce couloir de 950 km de largeur. Grâce à cette vision latérale, SPOT peut répéter l'observation d'une région au moins deux fois par semaine selon la latitude. Cette innovation augmente considérablement la souplesse de SPOT et diminue le risque de rater une prise de données importantes en raison d'une couverture nuageuse.

SPOT's real value lies in what it can do that other satellite systems cannot. For example, since it can depict terrain in stereo or three dimensions, it can be used to make topographic maps with vertical accuracies on the order of ± 7 metres — adequate for many parts of the world. Some believe that this capability may give serious competition to conventional aerial photography in the small-scale topographic mapping business. EMR's Surveys and Mapping Branch is doing state-of-the-art research and arranging seminars to speed the transfer of these results to industry where they may be used for operational mapping.

Applications

Two programs are helping develop applications. PEPS (Programme d'Évaluation Préliminaire SPOT) was organized by France and has eleven Canadian researchers, among 235 worldwide, evaluating the data for various uses. The other program is a strictly Canadian initiative in which private sector representatives may obtain a free satellite image by proposing a specific application for the data. In return for the image, they provide a written report on the usefulness of the data for the application outlined in their proposal — at no cost to government except the cost of producing the image.

Thus, should private-sector representatives believe that their applications may be of significant commercial use, they can be first off the mark to exploit it. If their findings are particularly significant, they may also buy the imagery at full price and not be required to submit a report. This program aims to make Canadian industry conversant with SPOT data at no risk and to provide a significant amount of free advice to CCRS. Current investigations include applications related to the oil industry, mapping, land-use planning, mineral exploration and forestry.

For example, images were provided to an Ontario land-use planning firm doing a detailed rural plan in eastern Ontario. The firm wanted to know what buildings existed in two rural townships. They planned to visit these buildings and note their use and condition. A preliminary study of images acquired in southern Quebec suggested that SPOT Panchromatic data would be an ideal source of such general locational information.

The Ontario study determined that images must be obtained after the greening of vegetation in spring and before autumn senescence. During the summer months rural buildings tend to stand out from the surrounding vegetation. In the fall, vegetation loses its greenness and chlorophyll, and often becomes indistinguishable from buildings. Other difficulties became apparent: where deciduous vegetation is lush, trees can often obscure buildings during the summer; because rural house and building sites are often amongst trees, images must be acquired looking almost straight down; and images acquired from the maximum tilt angle may cause buildings to go undetected because they are in a shadow, or because too little of the building is visible. Similar problems concerning the selection of images with tilt are also found in a variety of other applications, such as the location and mapping of roads.

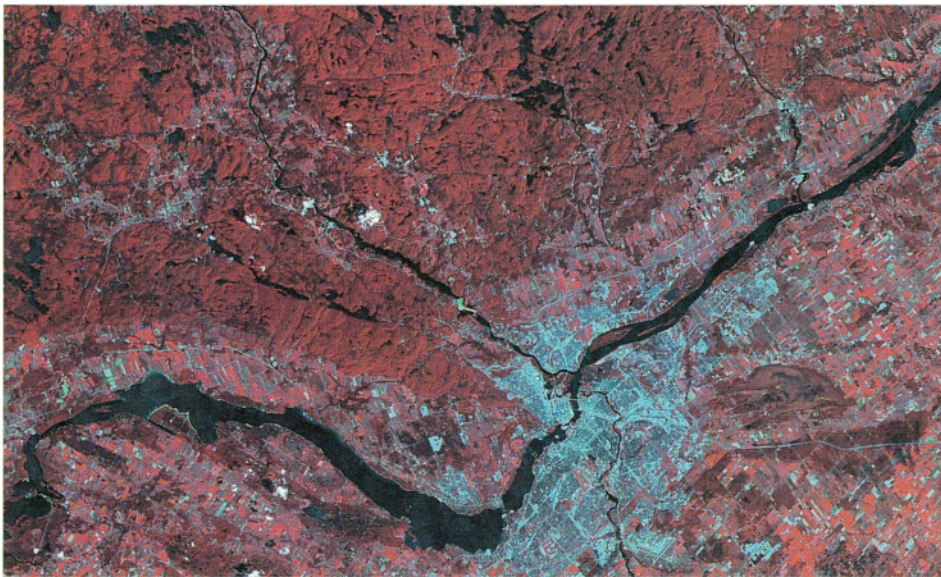
CCRS and users are beginning to form opinions about SPOT applications. First, the almost \$1000 cost per image dictates that users will not usually purchase SPOT images if they cannot get *all* required information from the SPOT image. For example, if the detail required is not all available from SPOT, and aerial photography is being purchased in any case, the user will not need SPOT.

Panchromatic and multispectral images of Ottawa and West Quebec. In upper left quadrant, details of logging roads are obvious in the forest of West Quebec; construction of new subdivisions shows as washed-out (no vegetation) areas in Orleans in lower right quadrant

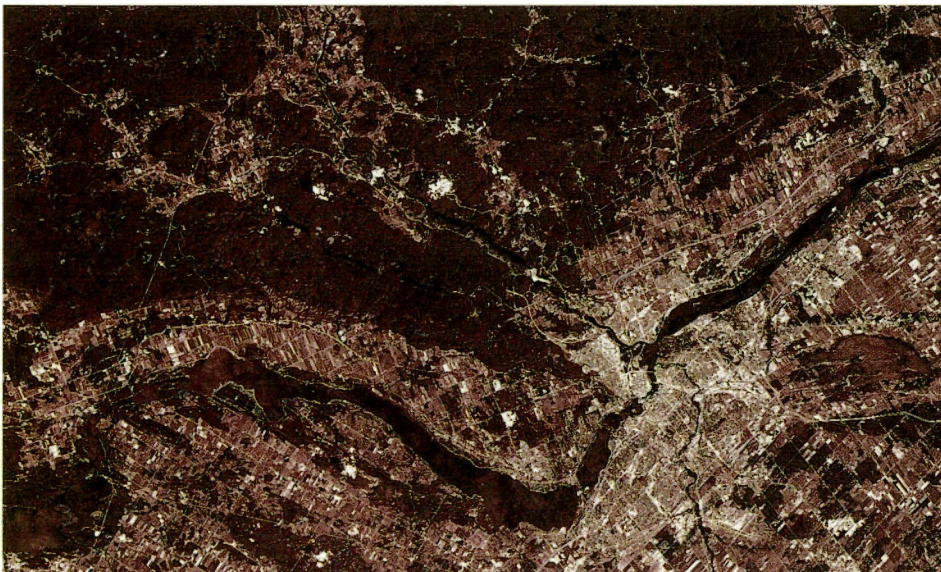
Images multispectrales et panchromatiques d'Ottawa et de l'Ouest du Québec. Dans le quadrant supérieur gauche, on peut distinguer le détail de chemins d'exploitation forestière situés dans l'Ouest du Québec. Dans le quadrant inférieur droit, de nouveaux lotissements en voie d'aménagement à Orléans apparaissent comme des zones dénudées (sans végétation).

However, if SPOT can be used to replace aerial photography, and so do the job more efficiently, it will be used. There may also be a trade-off between LANDSAT's broader area coverage and very useful spectral bands and SPOT's increased spatial resolution.

A second lesson is one also noted at the time of the LANDSAT launch. To apply SPOT effectively to the study of a particular resource, the user should be intimately familiar with that resource, how it is spatially manifested, and how it would, or should, appear on an image. Largely for this reason, CCRS always works with users that have an operational goal when doing applications-oriented research and development. That goal might be something as simple as developing a method for a provincial forestry department to map roads in forested areas, or as complex as monitoring growing conditions to produce crop yields for the Canadian Wheat Board.



Copyright SPOT Image



Copyright SPOT Image

SPOT PROCESSING LEVELS

Raw Full Scene (approx. 60-80 km × 60 km)

- Pixel size: MLA 20 m × 20 m
always 3000 pixels,
3000 lines
PLA 10 m × 10 m
always 6000 pixels,
6000 lines

(Pixel width varies with view angle. These products are not resampled.)

- No radiometric correction
- No geometric correction except detector alignment

Bulk Full Scene (approx. 60-80 km × 60 km)

- Pixel size: MLA 20 m × 20 m
3000-4000 pixels,
3000 lines
PLA 10 m × 10 m
6000-8000 pixels,
6000 lines

- Radiometric correction
- Across-track geometric corrections (no ground control points)
- Geodetic accuracy 1.5 km

System-Corrected Geocoded (approx. 20-42 km × 28 km)

- Pixel size: MLA 12.5 m × 12.5 m
1600-3360 pixels,
2240 lines
PLA 6.25 m × 6.25 m
3200-6720 pixels,
4480 lines

- Radiometric correction
- Along-track and across-track geometric corrections (no ground control points)
- Geodetic accuracy 1.5 km

Precision-Corrected Geocoded (approx. 20-42 km × 28 km)

- Pixel size: MLA 12.5 m × 12.5 m
1600-3360 pixels,
2240 lines
PLA 6.25 m × 6.25 m
3200-6720 pixels,
4480 lines

- Full radiometric and geometric correction with ground control points
- Geodetic accuracy: MLA 24 m
PLA 23 m

Requests or orders for SPOT data should be directed to: Order Desk, Prince Albert Satellite Station, P.O. Box 1150, Prince Albert, Saskatchewan S6V 5S7. Telephone (306) 764-3602.

CCRS has also learned that the more people see satellite images, the more ideas for applications will develop and the more products will be sold. The author of an article is faced with a dilemma: while we want to show SPOT images to encourage new users, we know that reproduction processes for a magazine cannot do justice to the original product (like the black-and-white image of Alberta) composed of more than 36 000 000 discrete points for which data are recorded. The reader is requested to make allowances for this fact. Original imagery can be seen through the CCRS User Assistance Unit in Ottawa or through many of the provincial remote-sensing centres across Canada.

Contest

This third lesson leads us to a challenge. We have found that many new uses for remote sensing are proposed by those who know almost nothing about earth observation from space, but who are well versed in the earth sciences or environmental sciences as business people, teachers or researchers. The GEOS readership comprises these people.

CCRS therefore offers GEOS readers this challenge. To the reader who provides the most innovative, yet practical, monitoring (i.e. requiring more than a one-time look at an area) application of SPOT data not previously published or reported, we will award a SPOT image of an area in Canada of his or her choice. Entries must be received by August 31, 1988. Judging will be done by the authors and their staff. Ideas must be typewritten on no more than one sheet of $8\frac{1}{2} \times 11$ paper, and those not winning will not be acknowledged. A subsequent issue of GEOS may summarize the most interesting ideas and introduce the winning concept and its author.¹

Ideas already published include the use of SPOT images to update road maps for those involved in planning forest fire suppression or doing fieldwork related to mineral exploration, to monitor water use in irrigation districts, and to assess where illicit crops might be grown in forested areas.

The range of applications is limited at one end by technology — but at the other only by the imagination and inventiveness of the user.

¹ This contest is intended to generate workable applications and is not meant for use as a classroom project at the elementary or junior-high levels. It could be the topic for science fair projects, and any provincial science fair winners would be acknowledged and eligible for the one grand prize. Send entries to: SPOT Contest User Assistance and Marketing Unit Canada Centre for Remote Sensing Energy, Mines and Resources Canada Ottawa, Ontario K1A 0Y7



Copyright: SPOT Image

Panchromatic image of Alberta brings out features like trails, buildings, construction sites and resource exploration areas. Upper left quadrant shows cultivated fields with different crops. Upper right quadrant shows an urban area with subdivision roads and the airport; tire marks can be detected on the runway. Lower left quadrant shows signs of oil and gas exploration near the lake

Image panchromatique de l'Alberta accentuant des éléments anthropiques comme des sentiers, des bâtiments, des chantiers de construction et des zones de prospection de ressources. Dans le quadrant supérieur gauche, on peut voir des champs contenant différentes cultures. Le quadrant supérieur droit représente une région urbaine. On peut y observer des chemins de lotissement, l'aéroport et même des traces de pneus sur la piste. Le quadrant inférieur gauche montre les activités d'exploration pétrolière et gazière en cours près du lac.



Le lancement de SPOT a procuré aux activités d'observation de la Terre une certaine notoriété. Ce satellite a prouvé que les grands chefs de file de l'aérospatiale n'étaient pas les seuls à pouvoir planifier, construire et exploiter un système perfectionné de télédétection visant à fournir les images qui seront bientôt essentielles à la gestion des ressources.

SPOT, outre son caractère scientifique, revêt un caractère commercial, car la France vendra les images acquises par le satellite selon un régime d'autofinancement.

Le Canada, par le truchement du Centre canadien de télédétection, une direction d'Énergie, Mines et Ressources Canada, joue un rôle de premier plan dans le cadre du programme SPOT. Le Centre est chargé de la réception des données et d'une première production d'images à l'intention du très important marché nord-américain. Il s'est également vu confier la tâche de mettre au point des méthodes d'application et de commercialiser des données canadiennes sur le marché intérieur. L'industrie canadienne a déjà bénéficié de la vente à d'autres pays de sa technologie aérospatiale relative à SPOT.

Cet article est aussi disponible en français.

Dr. Bob Ryerson and Jean Game operate the User Assistance and Marketing Unit of the Applications Technology Division at EMR's Canada Centre for Remote Sensing. Dr. Ryerson has been with CCRS since 1973 and Jean Game since 1975.

L'émersion de la côte sud du Saint-Laurent depuis la dernière glaciation

par Jean-Claude Dionne



Les courbes d'émersion des terres proposées jusqu'à maintenant présentent le profil en « J » classique qui caractérise les côtes glaciées au Wisconsinien (fig. 1). Ces courbes ont été dressées à partir de datations au radiocarbone de coquillages, étalés à diverses altitudes, que l'on a trouvés sur les plages ou dans les dépôts fins de la mer de Goldthwait. Si les données disponibles sont relativement abondantes pour la partie supérieure de la courbe d'émersion, c'est-à-dire pour la période comprise entre 13 500 et 9 000 ans A.P. pour la côte sud, il y en avait peu ou pas pour la période comprise entre 9 000 et 2 500 ans. Cette lacune a obligé les spécialistes à rattacher le haut de la courbe avec le zéro géodésique actuel en passant par quelques datations autour de 2 000 ans pour le niveau Mitis (environ 6 m).

De récentes découvertes fondamentales permettent maintenant de combler cette lacune et de mettre en évidence des événements géologiques importants survenus après 8 000 ans A.P., soit l'existence d'un bas niveau marin suivi d'une transgression de quelques mètres au beau milieu de l'Holocène.

Falaise morte (Micmac) et terrasse Mitis... (côte sud de l'estuaire maritime).

Stable cliff (Micmac) and Mitis bank (south shore of the maritime estuary).

Existence d'un bas niveau marin

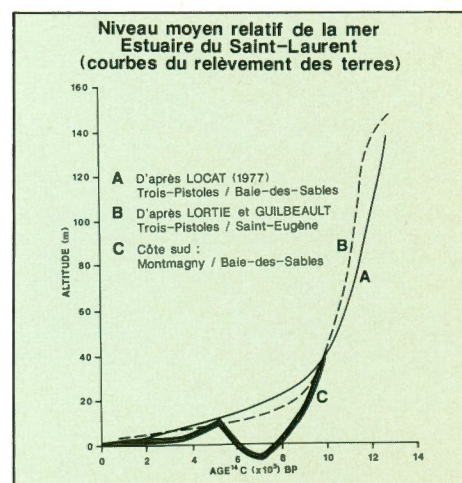
Des évidences géomorphologiques, stratigraphiques, paléoécologiques et paléontologiques, recueillies dans cinq sites (rivière Boyer, Montmagny, Cap-Saint-Ignace, Rivière-Ouelle et Saint-Fabien-sur-Mer) permettent d'affirmer l'existence d'un bas niveau marin dans l'estuaire du Saint-Laurent sur une distance d'au moins 300 km, entre 7 000 et 6 000 ans A.P.

En effet, dans la localité type (Montmagny), les restes d'une forêt relique (souches et troncs d'arbres) ont été découverts dans la zone intertidale actuelle. À cet endroit, une cinquantaine de souches d'épinette et de mélèze

Figure 1 Courbes du relèvement isostatique de la côte sud de l'estuaire du Saint-Laurent.

Isostatic rebound curves on the south coast of the Saint Lawrence Estuary.

M. Jean-Claude Dionne, diplômé de l'Université de Paris (Sorbonne), est un géographe spécialisé en géomorphologie littorale. Après avoir travaillé pendant une quinzaine d'années à Environnement Canada, dans la Vieille Capitale, il est, depuis 1980, professeur de géomorphologie à l'Université Laval de Québec. Il est connu internationalement pour ses travaux sur le glacier, à savoir l'action des glaces flottantes.



Montmagny : Profil schématique du rivage actuel

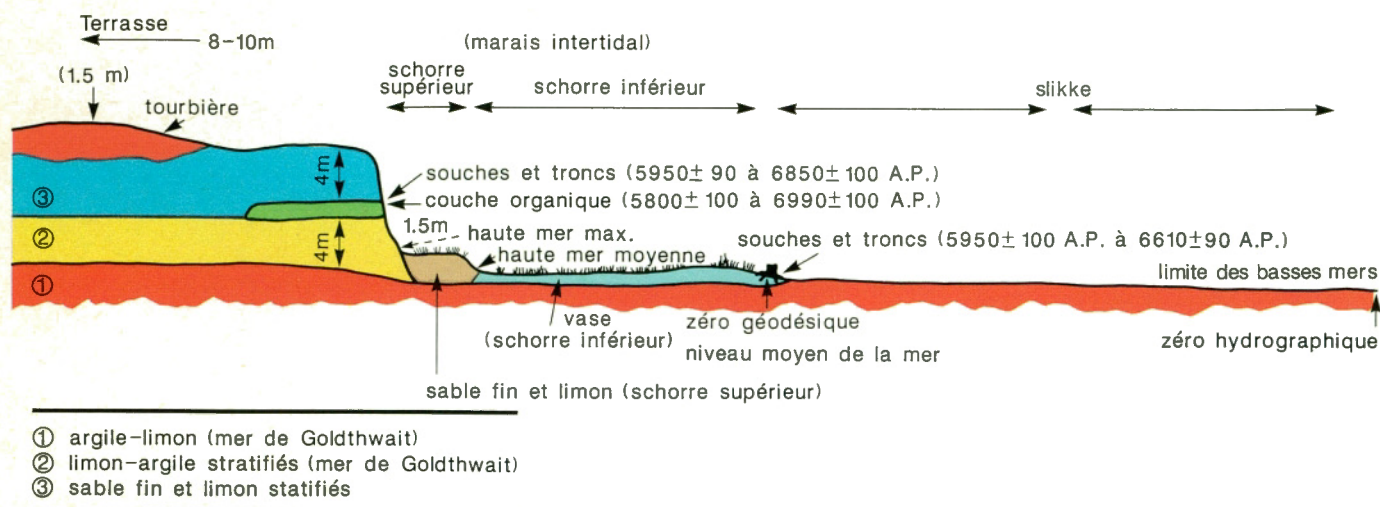


Figure 2 Coupe transversale schématique du rivage de Montmagny montrant les diverses zones ou unités et l'emplacement des souches et de la couche organique.

Cross-section of the Montmagny bank showing the different zones or units and the placement of tree stumps and organic layer.

Figure 3 Couche organique dans la falaise morte ravivée par érosion récente, à Montmagny.

Organic layer on the cliff destabilized by recent erosion at Montmagny.

Figure 4 Soutche en place dans la couche organique de la terrasse de 8 à 10 m.

Tree stump in place in the organic layer on the 8 to 10 m bank.

subsistent au niveau moyen de la mer (fig. 2), c'est-à-dire au niveau du zéro géodésique des cartes topographiques, ce qui donne environ 2,5 m au-dessus du niveau des basses mers (zéro hydrographique). Les âges obtenus par datation au radiocarbone, d'après l'analyse de 14 échantillons, sont compris entre 5 959 (+ ou - 100) et 6 610 ans A.P. (+ ou - 90).

À environ 250 m des souches de la zone intertidale, en direction de la côte, il existe une falaise morte qui, par endroits, est présentement érodée par la mer ou est entaillée par des ravins. Dans les escarpements rafraîchis, on peut voir une couche organique de 35 à 45 cm d'épaisseur, sise à environ 1,5 m au-dessus du niveau des plus hautes mers actuelles (fig. 3). Cette couche relativement compacte, qu'on peut suivre sur une distance de plus de 6 km, est recouverte



d'une unité de sédiments fins (sable fin et limon stratifiés) contenant des racines de scirpes, une plante monocotylédone croissant dans les marais intertidaux du secteur amont du moyen estuaire.

La couche organique contient aussi des souches et des troncs d'arbres en place (fig. 4). Les âges au radiocarbone obtenus (25 datations) vont de 5 800 ans A.P. (+ ou - 100) à 6 990 ans A.P. (+ ou - 90). Les espèces identifiées sont de l'épinette, du mélèze, de la pruche, du sapin, du bouleau blanc et du frêne. Les macrorestes de la couche organique comprennent essentiellement des espèces de milieu émergé humide en eau douce. Les âges obtenus sur les souches de la zone intertidale, sur les débris organiques de la couche de tourbe relique ainsi que sur les souches et les troncs d'arbres révèlent qu'il y avait là, jadis, une forêt de conifères qui s'étendait au moins jusqu'au niveau moyen actuel de la mer, soit à au moins 3,5 m en dessous du niveau des plus hautes mers d'aujourd'hui. Comme les espèces retrouvées ne poussent pas au niveau des hautes mers, on peut en conclure que, entre 7 000 et 6 000 ans environ, le niveau moyen de la mer dans le Saint-Laurent estuarien était au moins de 5 m inférieur au niveau actuel.

Transgression de 8 à 10 m

La couche organique relique étant recouverte de 3 à 4 m de sédiments fins (fig. 5), caractéristiques des dépôts intertidaux, il y a eu forcément une fluctuation du niveau de base, en l'occurrence celui du Saint-Laurent. En conséquence, à la suite du bas niveau marin du milieu de l'Holocène, il y a eu une transgression de l'ordre de 8 à 10 m à Montmagny. Cette phase transgressive a duré environ 1 500 ans. Ensuite, le niveau de la mer est redescendu progressivement au rythme du relèvement isostatique de la côte sud.

La datation de l'événement a pu être faite grâce à l'existence d'une tourbière. À la base de la tourbière, on trouve des plantes caractéristiques du schorre supérieur, ce qui indique le niveau du rivage à l'époque. Les datations au radiocarbone obtenues vont de 5 100 ans A.P. (+ ou - 100) à 4 660 ans A.P. (+ ou - 90). De plus, au-dessus de l'unité organique de base, on trouve une couche de fougères (osmondes), espèce poussant en milieu humide à la limite des

Figure 5 Coupe stratigraphique au droit de la terrasse de 8 à 10 m, à Montmagny.

Stratigraphic cut perpendicular to the 8 to 10 m bank at Montmagny.

Lors du recul de l'inlandsis laurentidien, les côtes de l'estuaire du Saint-Laurent et du golfe, déprimées par le poids de la glace, ont été submergées par une mer postglaciaire, à laquelle on a donné le nom de Goldthwait, pour rendre un hommage posthume à un géologue réputé de la Commission géologique du Canada, M. Goldthwait, qui a œuvré surtout dans l'Est du Canada au début du siècle.

La déglaciation des côtes de la Gaspésie ayant été plus précoce que celle des environs de Québec, la submersion marine n'a pas eu lieu simultanément sur l'ensemble du territoire entre Gaspé et Québec. En Gaspésie, elle a débuté vers 13 500 ans A.P., alors qu'aux environs de Québec, elle remonte à 12 500 ans environ. En raison de divers facteurs, dont l'épaisseur de la glace, l'ère de la mer de Goldthwait a varié de l'aval vers l'amont. On distingue généralement trois phases principales.

La plus ancienne, dite « glacio-marine », a eu lieu dans la même période que la déglaciation progressive des côtes et a duré de quelques

centaines d'années à près d'un millénaire. La seconde marque la phase marine principale de la submersion goldthwaitienne; elle a duré environ 4 000 ans. C'est à la fois une phase de submersion et de régression. La troisième phase en est une de régression. Elle a débuté il y a environ 8 000 ans et s'étend jusqu'à nos jours.

L'altitude maximale atteinte par la mer de Goldthwait est d'environ 180 m près de Québec, 160 m à Montmagny, 125 m à Matane et 75 m à Sainte-Anne-des-Monts (Gaspésie).

La mer postglaciaire s'est progressivement retirée ou abaissée à la suite du relèvement isostatique des côtes, relèvement commandé par un réajustement de la croûte terrestre jadis déprimée par le poids de la glace. Jusqu'à récemment, on pensait que l'abaissement de la mer de Goldthwait, ou l'émergence des côtes, avait été progressif et relativement continu. En effet, on sait que le taux d'émergence était passé de 3 cm/an au début (entre 13 000 et 9 000 ans), à moins de 1 mm/an de nos jours.

Montmagny : Terrasse de 8 à 10 m



plus hautes mers. Ces plantes poussaient il y a 4 370 ans A.P. (+ ou - 100). On peut donc affirmer que, à partir de cette époque, la côte s'est relevée isostatiquement ou que le niveau de la mer s'est abaissé.

Érosion de la falaise Micmac

Les événements survenus par la suite sont moins bien connus. Toutefois, les données disponibles permettent de penser que le niveau marin s'est abaissé assez rapidement et qu'il était semblable au niveau actuel ou voisin de celui-ci vers 3 000 à 3 500 ans A.P. Cette interprétation se fonde, d'une part, sur quelques datations de bouts de bois enfouis dans les sédiments de la zone intertidale, juste au-dessus de la surface argileuse constituant le substrat de la baie de Montmagny et, d'autre part, sur l'existence d'une falaise morte ourlant la terre de 8 à 10 m (fig. 6).

Cet escarpement, équivalent possible de la falaise Micmac de Goldthwait ailleurs le long du Saint-Laurent, a été taillé par une nappe d'eau dont le niveau de base était identique au niveau actuel. En se fondant sur l'emplacement des souches reliques dans la zone intertidale, on peut facilement évaluer le recul par érosion entre 300 et 400 m. Ce lent processus n'a pu se réaliser que grâce à une période de légère subsidence (transgression) permettant aux vagues de tailler une large plate-forme d'érosion à même la terrasse de 8 à 10 m. Après la formation de la falaise Micmac, la mer semble s'être retirée à nouveau. Elle se serait abaissée de 1 à 2 m par rapport au niveau actuel, ce qui aurait permis la construction de la basse terrasse Mitis à une altitude d'environ 6 m, que l'on retrouve à maints endroits le long de l'estuaire du Saint-Laurent.

Or, de nombreuses datations obtenues en divers sites, à la fois sur des coquillages et des débris organiques, indiquent un âge allant de 1 500 à 2 500 ans A.P. pour la terrasse Mitis. Présentement, là où elle n'est pas protégée, cette terrasse est en plusieurs endroits entaillée en micro-falaise du fait du type d'érosion. Cette forme d'érosion rend compte de conditions favorables : une stabilité relative de la côte impliquant un déficit sédimentaire ou encore une légère transgression.

Conclusion

En résumé, l'émersion de la côte sud du Saint-Laurent n'a vraisemblablement pas été aussi progressive et continue qu'on le croyait jadis. Des fluctuations du niveau marin sont survenues après 8 000 ans. Les deux principaux événements demeurent l'existence d'un bas niveau au milieu de



l'Holocène suivie d'une transgression de 8 à 10 m.

Il est difficile de mettre ces événements en rapport avec ceux survenus dans d'autres régions, en particulier avec des régions fort éloignées n'ayant pas été glaciées et qui, en conséquence, n'ont été affectées que par les variations eustatiques des océans. Dans l'estuaire du Saint-Laurent, la cause de ces fluctuations serait liée principalement aux modalités du réajustement de la croûte terrestre, ce qui traduit des caprices rhéologiques (déformation due aux contraintes) insoupçonnés jusqu'à maintenant.

Quoi qu'il en soit, ces événements géologiques importants ont une incidence capitale pour les recherches archéologiques relatives aux premières nations. En effet, comme les Amérindiens s'installaient généralement en bordure de la mer dans leurs déplacements le long du Saint-Laurent, les sites anciens, du moins ceux de la période comprise entre 6 000 et 8 000 ans, peuvent avoir été enfouis sous les dépôts laissés par cette transgression. L'existence d'un *hiatus* dans l'Archéen semble donc possible et pourrait expliquer certains faits demeurés obscurs ou sans explications valables.

L'étude des fluctuations du niveau marin relatif dans l'estuaire permet donc une meilleure compréhension des événements qui ont façonné notre environnement. On devrait s'y intéresser davantage.

Figure 6 Falaise morte, schorre supérieur en érosion et schorre inférieur à scirpes, à Montmagny.

Stable cliff with high salt pastures eroding and low salt pastures with bullrushes at Montmagny.

Emersion curves for the south shore of the Saint Lawrence, proposed up to the present, show the classic shape (in 'J') which characterizes shorelines glaciated during the Wisconsinan. Available data are relatively abundant for the upper portion of the emersion curve, the portion between 13 000 and 9000 years old, but it is quite the opposite for the portion between 9000 and 2500 years old.

This lack of information has obliged Quaternary specialists to align the top of the curve with the current geodetic zero to get datings around 2000 years old for the Mitis level. However, recent fundamental discoveries have allowed scientists to put forward evidence of important and unexpected geological events since 8000 BP. The emersion of the south shore of the Saint Lawrence has probably not been as progressive and continuous as we believed. Fluctuations in sea level have been stable since 8000 BP. The two principal events are the existence of a low level in the middle of the Holocene followed by an 8 to 10 m transgression.

This article is also available in English.

WHAT WAS THAT?

A sonic boom created by a meteoroid in Earth's atmosphere generated seismic signals which were recorded by the Yellowknife Seismic Array

by F.M. Anglin and R.A.W. Haddon

At 04:20 local time on September 19, 1986, Mrs. Laurie Harder saw a meteor passing across the sky above her home in Yellowknife, N.W.T.

She reported her observation to Yellowknife Seismic Station staff who examined the records of the Yellowknife seismic array to see if the associated meteoroid had hit Earth and generated observable seismic signals.

The examination did indeed reveal clear seismic signals arriving at the appropriate time. Station staff sent the records to the Geophysics Division of the Geological Survey of Canada in Ottawa for detailed analysis, with a view to locating the point of presumed impact where the meteoroid had crashed down. However, when we began to scrutinize the data, we found paradoxes that defied conventional interpretation.

A meteoroid colliding with Earth, a natural earthquake or an explosion would all have generated concentric circular seismic waves centred on the source. There was no measurable curvature in the relative wave arrival times on the west-east R line of seismometers (Fig. 1), implying that the source must have been at least 250 km away from the array. However, the pulselike simplicity of the main waveforms was inconsistent with all experience for a source at that distance.

This and other paradoxes suggested to us that the seismic signals may have been generated, not by the meteoroid hitting the ground, but rather by the sonic shock wave or boom created by the meteoroid

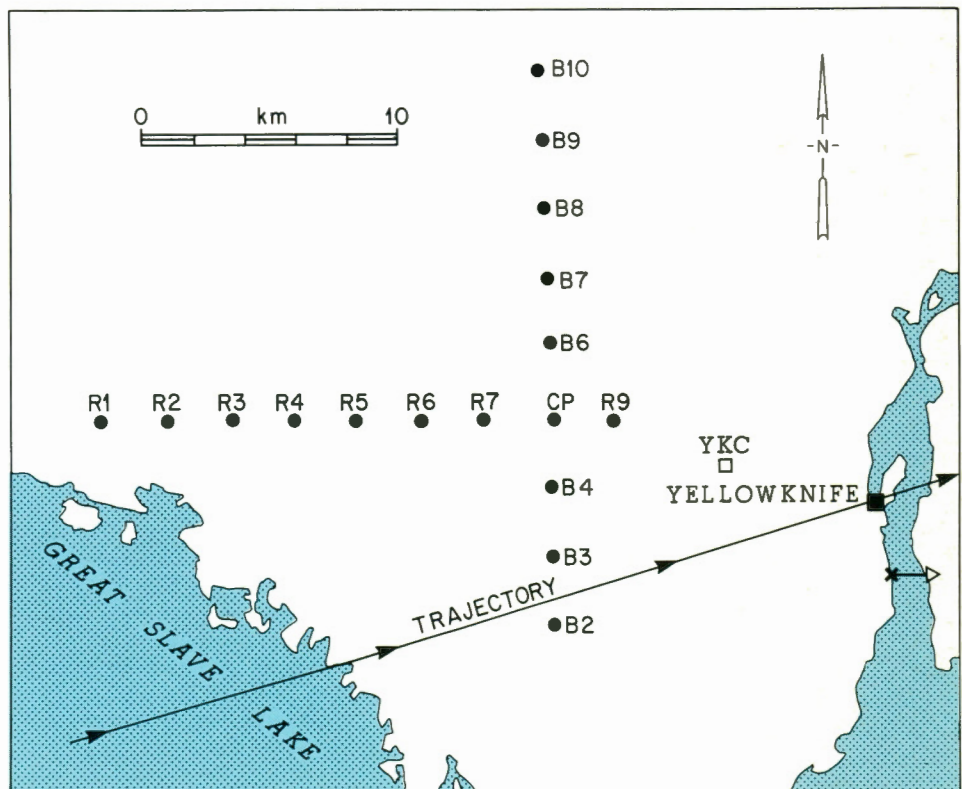
Figure 1 Yellowknife array with short-period vertical seismometers (R1 to R9 and B2 to B10) and the standard seismological station (YKC). X shows where the meteoroid was observed and the direction in which it appeared to be traveling. The trajectory line passing between B2 and B3 shows the meteoroid's path as inferred from the array data

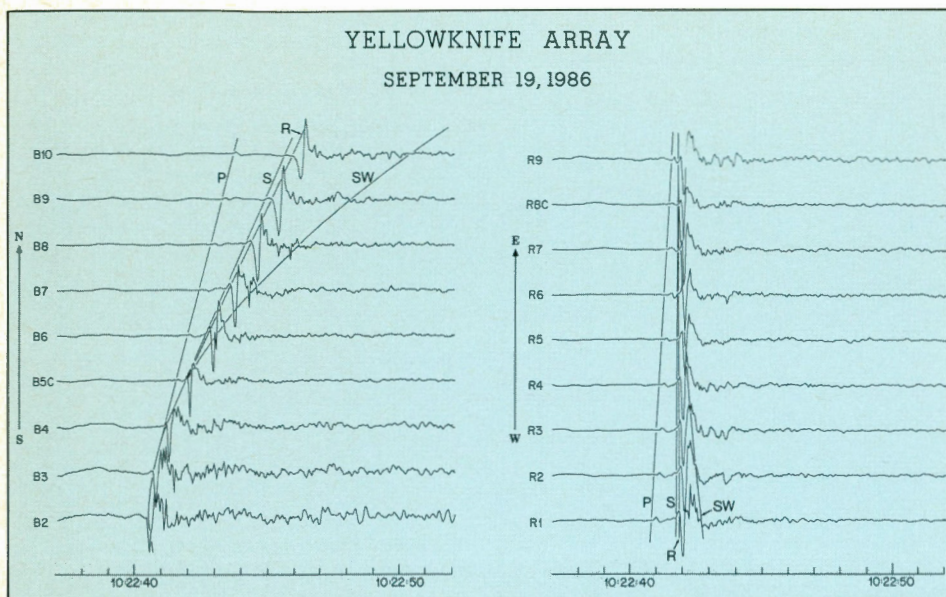
L'ensemble sismologique de Yellowknife se compose de sismomètres verticaux à courtes périodes (R1 à R9 et B2 à B10) et de la station sismologique de premier ordre (YKC). Le point X représente l'endroit où se trouvait la personne qui a observé le météoroïte et sa trajectoire approximative. La ligne passant entre B2 et B3 indique la trajectoire du météoroïte telle qu'elle a été calculée à partir des données recueillies.



Array outstation showing transmitting antennae and electronic boxes on mast. Tank on left supplies propane for thermoelectric generator

Station périphérique du réseau montrant l'antenne d'émission et, sur le mât, des boîtes renfermant les instruments électroniques. À gauche : le réservoir contenant du propane pour l'alimentation de la génératrice thermo-électrique.





as it passed through the atmosphere overhead.

The Yellowknife array has two perpendicular lines of nine equally spaced (2.5 km apart) short-period vertical seismometers (Fig. 1). Line B2 to B10 runs south-north and line R1 to R9 runs west-east. Waves traveling through Earth are monitored by this perpendicular array of seismometers. By carefully measuring the differences between wave arrival times on each of the individual seismometers, researchers can accurately determine the direction from which the waves arrived and their relative speeds of travel.

The seismograms in Figure 2 show that the main waves observed on the R1 to R9 instruments arrived almost simultaneously, indicating that they arrived from either the north or south. On B2 to B10, they arrived at significantly different times, the earliest arriving on B2 and the latest on B10, indicating that they came from the south. Small precursory signals, showing a nearly linear progression, can also be identified in addition to the main signals in each of the records from R1 to R9 and B5 to B10. These precursors arrived from a slightly different direction to that of the main arrivals.

To investigate the possibility that the signals had been generated by the sonic shock wave created by the meteoroid, we first assumed that the meteoroid's path was horizontal and that its speed greatly exceeded the speed of the shock wave. In these circumstances the shock wavefront would have been an acute-angled cone and at any instant the wavefront would have intersected Earth's surface as a hyperbolic curve with its axis parallel to the meteoroid's path. At points suitably distant, the wavefront would have been approximately cylindrical and the speed at which it swept across Earth's surface

Figure 2 Seismic signals recorded on the 17 channels of array data (R8 and B5 coincide) with Universal Time indicated. Superimposed are the theoretical travel-time curves for a meteoroid source at a 45 km elevation traveling from the southwest at 12 km per second at 15° to the north of east. Seismic wave propagation velocities are 6.4 (P), 3.55 (S) and 3.3 (Rayleigh). The shock wave velocity was assumed to be 0.3 km per second

Signaux sismiques enregistrés sur les 17 canaux du réseau (R8 et B5 coïncident) avec indications du temps universel. On peut voir les courbes de temps de trajectoires théoriques d'un météoroïte se déplaçant du sud-ouest, à une altitude de 45 km, à une vitesse de 12 km/s et à une direction de 15°, du nord vers l'est. Les vitesses de propagation des ondes sismiques sont de 6,4 (P), 3,55 (S) et 3,3 (Rayleigh). Par déduction, la vitesse de l'onde de choc devait être de 0,3 km/s.

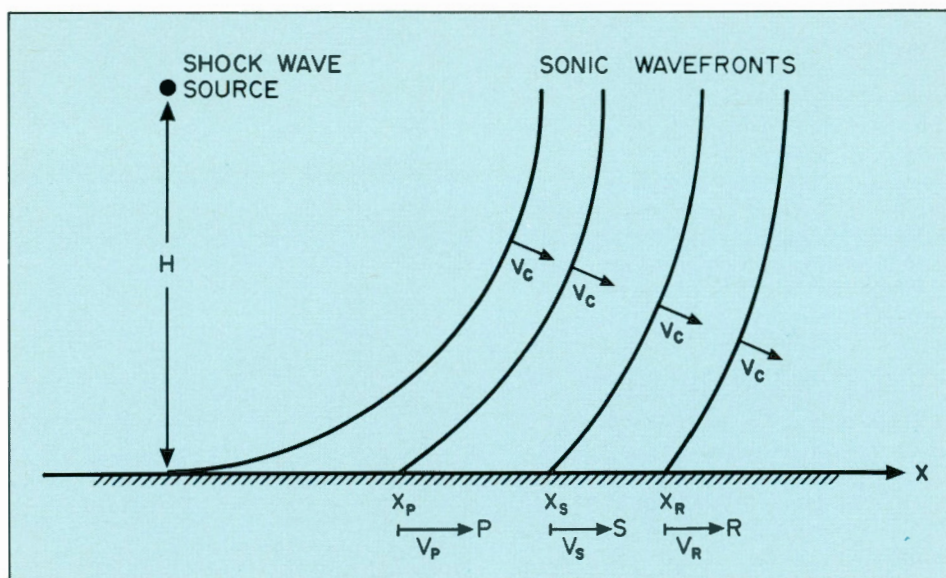


Figure 3 Wave velocity calculation. A shock wave source at height H above the ground radiates a sonic wavefront traveling at velocity V_c . At some distance, X_p , from the point immediately below the source, the velocity component tangential to the ground will equal the propagation velocity, V_p , of P waves in the earth's crust, and it is here that the P wave signal is effectively generated. The S wave, slower than the P, will be effectively generated at point X_s , which is farther from the source than X_p . Similarly the Rayleigh wave, still slower, will be effectively generated at point X_r .

Calcul de la vitesse des ondes. Une source d'ondes de choc, située à une hauteur H au-dessus du sol, émet des fronts d'ondes soniques se déplaçant à la vitesse V_c . À la distance X_p par rapport au point situé immédiatement sous la source, la tangente au sol de la vitesse sera égale à la vitesse de propagation V_p des ondes P dans la croûte terrestre; c'est là que le signal des sondes P s'est en fait produit. Les ondes S, qui sont moins rapides que les ondes P, seront générées au point X_s , qui est plus éloigné de la source que X_p . De façon identique, les ondes de Rayleigh, qui sont encore plus lentes, seront produites au point X_r .

would have decreased from very high speeds directly below the meteoroid's path to lower speeds as the radius of the approximately cylindrical wavefront increased (Fig. 3).

A cylindrical wave impinging upon Earth's surface generates three kinds of waves designated P, S and Rayleigh waves. At suitably distant points, each wave is instantaneously generated when and

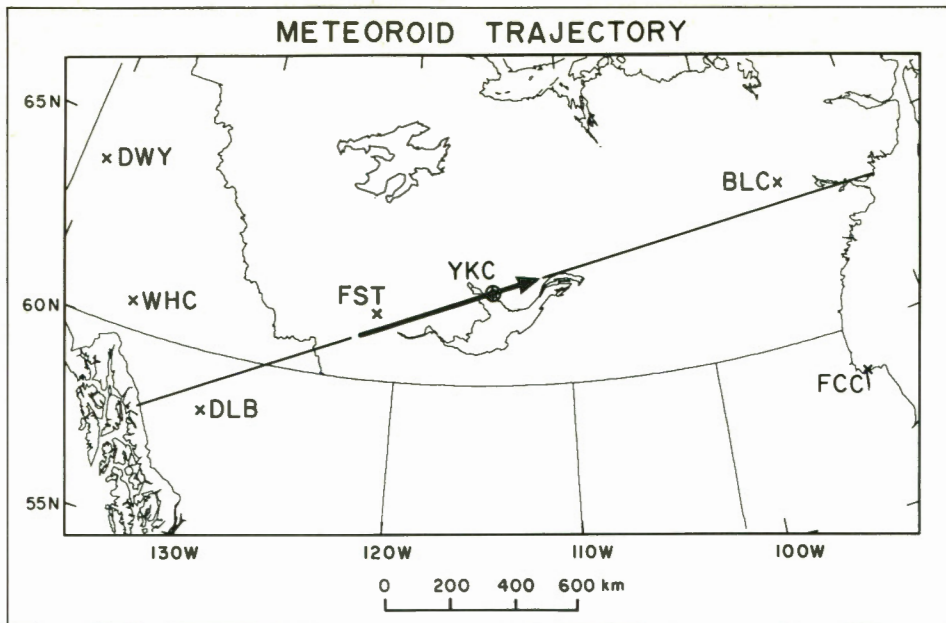


Figure 4 *Inferred path of the meteoroid over northern Canada. Seismic signals were observed at Fort Simpson and Yellowknife, though not at any other stations*

La trajectoire présumée du météorite au-dessus du Nord du Canada. On a reçu des signaux uniquement aux stations de Fort Simpson et de Yellowknife.

Mrs. Laurie Harder observed the meteorite disappear over the horizon behind her

M^{me} Laurie Harder a vu le météorite disparaître au-dessus de l'horizon.

where the sweep velocity of the shock wavefront's line of intercept with Earth's surface equals the propagation velocity of that particular wave (Fig. 3).

Theoretical travel-time curves for the three kinds of waves are superimposed on the seismic signals from the array in Figure 2. For the particular curves shown, the meteoroid's velocity and elevation were assumed to be 12 km per second and 45 km, and its path was assumed to be horizontal, passing vertically over a point midway between instruments B2 and B3 in a direction 15° north of east (Fig. 1).

The qualitative features of the observed arrivals were completely explained by the theoretical travel-time curves, and the observed times were matched to within ± 0.1 second. In obtaining the theoretical results shown in Figure 2, we first assumed that the shock wave was very weak with a propagation velocity of about 0.3 km per second, approximately the speed of sound in air. On this assumption we estimated that the formal uncertainties in the theoretical results shown in Figure 2 were about ± 10 km elevation, ± 5 km per second velocity, $\pm 3^\circ$ direction and $\pm 3^\circ$ inclination for the meteoroid's path. The more intense the shock wave, the higher the propagation velocity. We therefore derived further results for various assumed velocities from 0.3 to 3.0 km per second and obtained equally good fits to the data for all velocities in this range.

We found that the higher the assumed shock wave velocity, the lower the corresponding elevation of the meteoroid, to fit the data observed (Fig. 2). For the largest shock wave velocity assumed, 3.0 km per second, the values obtained were 4 ± 1 km elevation, 15 ± 5 km per



second velocity, $11 \pm 3^\circ$ direction and $0 \pm 3^\circ$ inclination. Thus, while the inferred elevation of the meteoroid was critically dependent on the assumed wave velocity, the other inferred parameters of the trajectory were not. Without independent evidence on the shock wave's velocity, we could not distinguish between the above range of possibilities.

After we had obtained these results, we learned that Mrs. Harder had seen the meteor disappear over the eastern horizon. This strongly confirmed our interpretation.

We also searched the records of the Northern Canadian Seismic Network Stations in the vicinity of the inferred path and found that sharp signals were recorded at the Yellowknife standard station at 10:22:41 UT (04:22 local time) and at Fort Simpson, 350 km west of

Yellowknife, at 10:22:19 UT (Fig. 4). The fact that no other signals were observed at either of these stations within at least an hour of the above times and that the latter are fully consistent with the results inferred from the array data further supports the interpretation.

To our knowledge the Yellowknife array records provide the first ever unambiguous observation of a shock wave and associated seismic waves generated by the sonic boom of a meteoroid.

We would like to thank D. Monsees and the Yellowknife station staff for the data from Yellowknife, J.A. Haddon for computing assistance and R. North and R. Wetmiller for helpful suggestions on the manuscript.

SONIC BOOM RECORDED BY CAPTAIN COOK?

In August 1987 F.M. Anglin and R.A.W. Haddon published their results in the scientific journal *Nature* in an article entitled "Meteoroid sonic shock-wave-generated seismic signals observed at a seismic array."

Following publication they received a letter from a reader, Dr. W. Rigby of Cumbria, England, who drew their attention to the following incident in an account of Captain Cook's first passage of the South Atlantic:

"On the 23rd [December, 1768] they observed an eclipse of the moon; and about seven o'clock in the

morning, a small white cloud appeared in the west, from which a train of fire issued extending itself westerly; about two minutes after, they heard two distinct loud explosions, immediately succeeding each other like cannon; after which the cloud soon disappeared." (*Captain Cook's Voyages of Discovery*, John Barrow, ed.)

Rigby concludes, "I have always assumed that this description concerned a supersonic meteorite — but I have not gone to source material to find out what Captain Cook's thoughts on it were."



Preparing a new underground vault for seismic instruments

Préparatifs d'une nouvelle cave souterraine qui abritera des instruments sismiques.

Des signaux sismiques surprenants ont été enregistrés par le réseau sismographique de Yellowknife, dans les T.N.-O., au moment où quelqu'un voyait un météorite passer dans le ciel. Les signaux ne peuvent être expliqués par un tremblement de terre, une explosion ou un mécanisme générateur d'impact d'origine terrestre. Ils sont dus à l'onde de choc produite par le météorite traversant l'atmosphère. La trajectoire et la vitesse du météorite, telles qu'établies à partir des enregistrements du réseau sismographique, concordent avec les observations et les données sismiques indépendantes enregistrées à deux stations du réseau sismographique du Nord canadien.

Cet article est aussi disponible en français.

Typical terrain in the Yellowknife array area

Terrain typique de la région où se trouve l'ensemble sismologique de Yellowknife.



R.A.W. Haddon (left) received a B.E. in aeronautical engineering from the University of Auckland, New Zealand in 1961 and an M.S. and Ph.D. in applied mathematics from the University of Sydney, Australia. From 1961 to 1981 he taught applied mathematics at the University of Sydney. Since 1981 he has been a research scientist with the GSC's Geophysics Division. Dr. Haddon is interested in theoretical seismology and the structure of Earth's interior.

F.M. Anglin, a seismologist at the Geological Survey of Canada's Geophysics Division in Ottawa, has been with EMR since 1967 and is currently part of the group using the Yellowknife seismic array for global seismic detection and discrimination studies. He is a graduate of the universities of Ottawa and Western Ontario.

RESORS

DATE **APR - 1 10R8**
RECEIVED

DATE **APR - 1 10R8**
CHECKED

DATE **28/04/88**
INDEXED

The objective of the Department of Energy, Mines and Resources (EMR) is to enhance the discovery, development and use of the country's mineral and energy resources and broaden our knowledge of Canada's landmass for the benefit of all Canadians. To attain this objective the department devises and fosters national policies based on research and data collection in the earth, mineral and metal sciences, and on social and economic analyses.

Le ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources (EMR) a pour objectif d'accroître la découverte, la mise en valeur et l'utilisation des ressources minérales et énergétiques canadiennes. Il se propose également d'étendre nos connaissances relatives à la masse continentale du Canada, au bénéfice de tous les Canadiens. Pour réaliser cet objectif, le Ministère conçoit et favorise des politiques nationales fondées sur la recherche et la compilation de données dans le domaine des sciences de la Terre, des minéraux et des métaux, de même que sur des analyses sociales et économiques.
