

LE PROJET *LITHOPROBE*

«SONDER LA LITHOSPHERE»

TEXTE ACCOMPAGNANT LE DIAPORAMA

Préparation des notes
Horst Heise et Ron Clowes
Secrétariat du LITHOPROBE
Université de la Colombie-Britannique
Vancouver (C.-B.) V6T 1Z4

Note: Le générique masculin est utilisé sans aucune discrimination et uniquement dans le but d'alléger le texte.

DIAPOSITIVE 1: Présentation du projet et principales sources de financement.

DIAPOSITIVE 2: Page titre de la pochette (dans laquelle est insérée une brochure).

I. INTRODUCTION

DIAPOSITIVE 3: Carte du monde montrant les continents et les bassins océaniques.

(Laissez la diapo.3 jusqu'au texte de la diapositive 4.)

Le LITHOPROBE est le premier projet multidisciplinaire visant à étudier un continent entier. Et le Canada est le premier pays à se lancer dans une telle aventure.

I.1 LES OCÉANS ET LES CONTINENTS

Lorsque l'on regarde un globe terrestre ou une carte du monde, on ne cesse de s'étonner de la vastitude des grands océans, du Pacifique à l'Atlantique, en passant par l'océan Indien et même l'océan Arctique.

Il faut des heures aux avions pour les traverser et des jours, parfois même des semaines, aux bateaux. Les océans semblent nous dire qu'ils ont toujours été là, qu'ils ont toujours été aussi vastes, aussi puissants, aussi immuables.

Ils sont en fait un peu tout cela, ou presque. Ils sont assez jeunes à l'échelle des temps géologiques. Généralement parlant, ils ne sont pas plus vieux que 180 millions d'années (Ma); bien sûr, c'est un âge plus qu'honorable à nos yeux, mais pas en comparaison avec celui des

continents sur lesquels nous vivons qui sont environ vingt fois plus vieux que les océans.

Mais que deviennent les océans avec le temps? Bonne question! N'est-ce pas? Nous devrions avoir réponse à cette question à la fin du diaporama.

La plupart d'entre nous seront surpris d'apprendre que, dans de nombreux coins de notre pays, où aujourd'hui nous faisons pousser du grain, laissons pâturer le bétail et exploitons des ressources, il y avait peut-être autrefois un océan, parsemé de belles îles, grosses et petites. Ou encore une majestueuse chaîne de montagnes qui nous aurait bloqué la vue et aurait dominé le paysage si nous avions été là, à cette époque précoce de l'évolution de la Terre.

DIAPOSITIVE 4: Carte des éléments tectoniques de l'Amérique du Nord.

Le Canada, constitué en son centre du vieux Bouclier canadien et à son pourtour de portions plus jeunes, n'était au début qu'un ramassis de plus petits morceaux; c'était peu de temps après la naissance de la planète Terre, il y a environ 4 600 millions d'années (4 600 Ma).

Les plus vieilles roches qui ont été datées remontent à environ 4 000 Ma et affleurent dans la partie occidentale des Territoires du Nord-Ouest, dans la Province des Esclaves. Cette dernière est en fait l'un des plus vieux cratons archéens à partir desquels le Bouclier canadien s'est formé.

DIAPOSITIVE 5: Échelle des temps géologiques.

Le Canada contient, d'une part, les plus vieilles roches de la Terre et, d'autre part, quelques-unes comptant parmi les plus jeunes; et il ne faut pas oublier qu'à peu près tous les âges intermédiaires sont représentés. C'est donc un endroit idéal pour étudier comment les continents et les océans de notre planète se sont formés.

I.2 LE PROJET LITHOPROBE

Le projet LITHOPROBE propulse les géoscientifiques canadiens dans le XXI^e siècle, en avance sur les autres nations pour ce qui est des travaux du même genre. Le LITHOPROBE constitue une extension d'un siècle et demi d'excellence dans ce secteur des sciences au Canada.

DIAPOSITIVE 6: Carte montrant la participation au LITHOPROBE, d'une rive à l'autre du pays.

Le projet LITHOPROBE est unique sur de nombreux aspects: le sujet de ses recherches, son envergure nationale, son recours à différentes disciplines des sciences de la Terre qui se complètent l'une l'autre et la collaboration (participation des commissions géologiques tant à l'échelle fédérale que provinciale, des départements des sciences de la Terre de la majorité des universités canadiennes et du secteur privé). C'est une étude multidisciplinaire 100% canadienne, dont les géoscientifiques du pays peuvent, et avec raison, être fiers.

DIAPOSITIVE 7: Apport des diverses disciplines des sciences de la Terre au projet LITHOPROBE.

Le Canada est le premier pays à sonder en détail comment la lithosphère d'un continent entier s'est formée par accollement d'éléments et a parfois été complètement scindée au cours de milliers de millions d'années de dérive, de compression, d'étirement et de déchirement, depuis la formation de la Terre dans le système solaire (il y a environ 4 600 millions d'années) jusqu'à aujourd'hui.

L'étude de la lithosphère du Canada fait appel aux connaissances de quelque cinq cents spécialistes des différents domaines des sciences de la Terre qui vouent leur

savoir-faire au projet LITHOPROBE, le programme national de notre pays en matière d'exploration du milieu intra-terrestre; il s'agit des premiers travaux multidisciplinaires et à l'échelle d'un pays visant à sonder en profondeur les racines d'un continent et à reconstituer son évolution.

I.3 PERCER LES SECRETS LES MIEUX GARDÉS DE NOTRE CONTINENT

Rendons-nous donc sur les rives du plus grand des océans sur Terre, le Pacifique. Notre aventure visant à découvrir le milieu intra-terrestre débute sur une plage; nous y sommes pour voir où le projet LITHOPROBE a démarré il y a dix ans. La plage en question est appelée «Long Beach»; elle borde l'île de Vancouver, fait face au vaste océan Pacifique où des gens viennent se reposer pendant leurs vacances et observer les baleines.

Sur la mer, à l'horizon, quand on plonge sous la surface agitée par les vagues jusqu'au plancher océanique, on peut constater que la Terre subit un bouleversement. Mais quel en est le mécanisme ?

Il s'agit d'un mécanisme de très grande échelle. Notre continent entre en collision avec une partie de la croûte de l'océan Pacifique; il avance, imperturbable, sur le plancher océanique et charrie les sédiments au fond de l'eau pour les ajouter petit à petit à la marge de l'Amérique du Nord qui ainsi progresse vers l'ouest.

Aussi vaste que puisse être l'océan Pacifique, il n'en rétrécit pas moins lentement mais régulièrement, les régions continentales qui l'entourent le comprimant.

Ainsi, la côte ouest et ses zones extracôtières se prêtent bien à l'étude de cet événement sans communes mesures, qui en fait n'est que le plus récent de plusieurs autres semblables qui se sont produits auparavant.

En effet, c'est ici que le LITHOPROBE a vu le jour, ce projet innovateur dont le but est de reconstituer l'évolution de notre continent à travers les temps géologiques, des premiers microcontinents à ce que nous observons aujourd'hui.

DIAPOSITIVE 8: Subduction d'une plaque océanique sous une plaque continentale.

Ce schéma donne un aperçu des couches externes de la croûte terrestre. La lithosphère solide atteint quelque 100 kilomètres d'épaisseur.

Le phénomène à l'origine de processus comme ceux représentés sur cette illustration, à savoir la «**subduction**» d'une «**plaque océanique**» sous un continent, est communément appelé la «**dérive des continents**», un équivalent plus acceptable étant la «**tectonique des plaques**».

Ces termes décrivent les déplacements et les collisions qui se produisent constamment entre des plaques crustales adjacentes, lesquelles sont comme les morceaux d'une mosaïque, celle de la portion externe solidifiée de notre planète, appelée la lithosphère.

DIAPOSITIVE 9: Carte des principales plaques tectoniques de la Terre.

À la limite entre la lithosphère continentale du Canada et la plaque océanique du Pacifique, il faut que l'une des deux masses disparaisse. Dans le cas présent, c'est le plancher océanique du Pacifique qui s'enfonce sous l'île de Vancouver et le continent. Nous avons déjà décrit comment le continent avance sur le plancher océanique, tassant les sédiments mous et les raclant de la surface dure de la croûte océanique ignée, un peu comme un bulldozer repousserait la neige qui recouvre une rue. Voici donc une image de ce mécanisme.

DIAPOSITIVE 10: Image obtenue par sonar latéral du plancher océanique au large de l'île de Vancouver.

Un système d'imagerie marine par sonar latéral a permis de reconstituer le plancher océanique; cette technique est l'équivalent en mer d'une photographie aérienne de la surface terrestre. Cette image a été prise juste à l'endroit où la plaque Juan de Fuca plonge sous l'Amérique du Nord.

Ainsi, les sédiments du bassin océanique sont raclés de la surface de la plaque océanique et accolés au continent.

La bande blanche et rectiligne traversant le centre de l'image est la trace de direction

nord-ouest du bateau à bord duquel a été effectué le levé. Le balayage se fait sur dix kilomètres de largeur (voir l'échelle), le secteur directement sous le bateau demeurant en blanc.

Sur l'image, le secteur gris pâle et lisse que l'on voit sous la bande blanche est associé au fond plat de l'océan. Au-dessus de la bande centrale, les secteurs en gris foncé correspondent au début froissement et du charriage des sédiments tapissant le plancher océanique. À mesure que la lourde plaque Juan de Fuca glisse sous le continent nord-américain plus léger, la croûte continentale forme une sorte de bulldozer qui repousse les sédiments recouvrant la plaque océanique et construit des collines et des crêtes de plusieurs centaines de mètres de hauteur.

DIAPOSITIVE 11: Coupe de la lithosphère de la côte ouest.

La côte ouest du Canada est un exemple de la tectonique des plaques en action. Il y a création continue de nouvelle croûte océanique sous la forme de magma au niveau de la dorsale Juan de Fuca, quelque 200 kilomètres à l'ouest de l'île de Vancouver. La nouvelle croûte glisse sous l'île de Vancouver et redevient en grande partie magma lorsqu'elle atteint de plus grandes profondeurs sous la chaîne Côtière, là où des volcans laissent échapper des gaz, des fluides et du magma par des ouvertures dans la croûte.

I.4 TREMBLEMENTS DE TERRE et VOLCANS

Ainsi, nous sommes sur la plage appelée «Long Beach» et la plaque Juan de Fuca s'enfonce dans les profondeurs sous nos pieds. Et à mesure que la croûte océanique est entraînée sous la croûte continentale, il y a des couches sus-jacentes qui sont prises en étau.

Imaginez les couches de croûte continentale obductée (qui chevauchent la croûte océanique) comme de minces feuilles de métal coincées sur la surface inégale du plancher océanique. Elles seront pliées et traînées jusqu'à ce qu'il y ait un point de faiblesse.

Quand cela se produit, les couches ont littéralement tendance à rebondir. Et la nature nous en fait part de façon assez drastique puisque cela provoque des tremblements de

Terre (séismes). Les secousses peuvent être très fortes et créer des vagues géantes sur l'océan (appelées tsunamis), lesquelles vont s'écraser sur la côte causant souvent beaucoup de dommages. Sur terre, les séismes sont également à l'origine de vagues, appelées correctement des ondes sismiques, dont les conséquences sont encore pires.

Pendant ce temps, la plaque océanique continue sa descente sous la plaque continentale, à la vitesse étonnante de 4 cm/année, la température et la pression augmentant sans cesse. L'eau piégée dans les pores et les minéraux est expulsée, les roches solides entrent en fusion et le matériel subducté plus léger et surpressurisé cherche une porte de sortie qui s'avère être les ouvertures dans la croûte continentale sus-jacente.

Très rapidement, un volcan pour ne pas dire une guirlande de volcans se forme dans le secteur du côté du continent de la zone de séismes. Le mont St. Helen's a été le dernier volcan à se réveiller. Quant au mont Garibaldi, il a aussi été en activité, mais auparavant. La plus récente éruption d'un édifice volcanique en Colombie-Britannique est celle du mont Meager, il y a environ 2 350 Ma. Pour les gens qui demeurent dans la partie sud-ouest de la Colombie-Britannique, le volcan qui a récemment fait éruption dans leur région n'est pas au Canada; il s'agit du mont Baker, qui se trouve juste au sud de la frontière. Dans ce secteur, le dernier événement volcanique d'importance a eu lieu en 1872 et, depuis, seuls de petits épisodes éruptifs ont été signalés.

L'océan Pacifique est entouré d'édifices volcaniques qui forment ce qu'on appelle la «ceinture de feu». Les séismes et les volcans témoignent du caractère actif de la tectonique des plaques, des endroits où la lithosphère, la couche externe solide de la Terre, subit des changements.

1.5 UN OCÉAN EN EXPANSION

Suivons la devise de notre pays et rendons-nous sur l'autre rive du Canada, d'un océan à l'autre, «a mari usque ad mare», de l'île de Vancouver jusqu'à Terre-Neuve.

Nous nous trouvons maintenant sur les rives de l'**Atlantique**, un océan encore en expansion

étant donné que le continent nord-américain s'éloigne de l'Europe.

DIAPOSITIVE 12: Topographie de l'Atlantique et des continents adjacents.

La côte est du Canada est une marge dite «passive», ce qui signifie qu'elle est de plus en plus large, tandis que la côte ouest en est une dite «active», c'est-à-dire qu'elle chevauche le plancher océanique.

L'ouverture de l'océan Atlantique se poursuit encore aujourd'hui, quelque **180 millions d'années** après son début, au moment où notre continent s'est détaché de l'Europe et de l'Afrique. Dans les régions plus septentrionales, dans l'Atlantique Nord, le rifting a commencé plus tard. Le rift à l'origine de l'Atlantique a scindé un ancien supercontinent, la Pangée. On peut affirmer que la partie est de Terre-Neuve a déjà été un morceau de l'Afrique occidentale.

La plate-forme continentale de l'Atlantique est large là où on se trouve; elle est caractérisée par de nombreux lits qui recouvrent le fond marin et des bassins profonds remplis de sédiments. Quelques roches sédimentaires sont riches en pétrole et en gaz, le fameux champ de pétrole Hibernia en étant un exemple.

DIAPOSITIVE 13: Carte faisant le lien entre les unités géologiques en surface (entités identifiées) et les blocs crustaux profonds du substratum (en couleurs).

Localisez la trace de la coupe 86-2 qui sera présentée sur la prochaine diapositive.

Les levés effectués dans le cadre du LITHOPROBE permettent de sonder très profondément sous les plages et même sous les champs de pétrole. Le LITHOPROBE cherche à établir le lien entre les plaques crustales profondes et les terranes sus-jacents qui longent la marge continentale des Maritimes. Mais de quelle façon les scientifiques s'y prennent-ils pour arriver à leurs fins ?

DIAPOSITIVE 14: La coupe sismique 86-2 permet d'établir des liens entre les roches en surface et les blocs crustaux sous-jacents. La portion supérieure de la diapositive montre les données sismiques recueillies; la portion inférieure, leur interprétation.

Ils envoient des signaux *sismiques* (qui sont en fait des ondes sonores) dans les profondeurs de la Terre et enregistrent les *réflexions* qui reviennent à la surface. Sur une diapositive à venir, nous verrons mieux comment la sismique-réflexion fonctionne. C'est donc de cette façon que les scientifiques du LITHOPROBE s'y prennent pour obtenir les données de réflexion profonde, à partir desquelles ils peuvent dessiner des coupes sismiques comme celle de la diapositive 14.

Cette description de la marge «active» du Pacifique et de la marge «passive» de l'Atlantique nous a donné un aperçu de la **dynamique** de la tectonique des plaques.

Nous irons maintenant au coeur du continent, c'est-à-dire sur le territoire du Bouclier canadien; nous nous attarderons non seulement à ce que nous voyons en surface, mais aussi au milieu intra-terrestre dans cette région.

II. L'ÉVOLUTION DU CANADA SUR 4 000 000 D'ANNÉES

DIAPOSITIVE 15: Carte des éléments tectoniques de l'Amérique du Nord.

La Province du Supérieur constitue le coeur du continent. Elle est bordée d'ajouts qui ont été accolés à son pourtour le long de «ceintures de collisions», dont la Province du Grenville et l'orogène trans-hudsonien. Nous passerons donc un petit moment à essayer de comprendre comment de telles collisions peuvent se produire.

À l'instar de la Province du Supérieur, celles de Hearne-Rae, des Esclaves et de Nain remontent à l'Archéen.

Les Appalaches et la Cordillère sont cependant les additions les plus récentes à notre continent, leur accollement ayant eu lieu au cours du Phanérozoïque. Cette division chronologique représente le dernier épisode de l'histoire de notre planète, lequel correspond au moment où la Terre était bien vivante, dans le sens où de nombreuses formes de vie évoluée existaient; d'ailleurs, de petites parties de ces organismes sont maintenant préservées sous la forme de fossiles.

Un petit rafraîchissement de mémoire s'impose; nous jetterons donc un autre coup d'oeil à l'échelle des temps géologiques que nous avons vu auparavant.

II.1 LE NOYAU PRÉCAMBRIEN

DIAPOSITIVE 16: Échelle des temps géologiques.

Les âges associés au Bouclier canadien apparaissent au bas de l'échelle des temps géologiques et correspondent aux divisions chronologiques les plus vieilles; dans la partie supérieure de l'échelle, il y a les divisions les plus récentes. Sur la carte de la diapositive 15, les unités sont de plus en plus jeune à mesure que l'on s'approche des bordures du continent.

Aux premiers blocs de croûte continentale se sont accolés des morceaux de croûte océanique; cet ensemble est progressivement devenu un craton stable, lequel est d'ailleurs considéré comme l'assise de notre continent en constante évolution. Le craton nord-américain compte parmi les plus vieux de la planète et en est probablement le plus grand. Il est au coeur de notre continent.

DIAPOSITIVE 17: Éléments tectoniques de l'Amérique du Nord, sans la couverture sédimentaire.

La présente carte ne ressemble pas à celles que l'on voit habituellement parce que le Bouclier baltique est figuré à l'endroit où il se trouvait à une certaine époque, tout comme le Groenland avant qu'il ne se sépare de l'Amérique du Nord. Il y a également plus de détails que sur la carte des éléments tectoniques de la diapositive 15. Les polygones délimités par les lignes jaunes mettent en évidence les 10 secteurs d'étude ou transects du LITHOPROBE, qui sont les suivantes: SC, Cordillère méridionale; SNORCLE, évolution de la lithosphère dans la Cordillère septentrionale et la Province des Esclaves; AB, socle albertain; THOT, orogène trans-hudsonien; WS, partie ouest de la Province du Supérieur; KSZ, zone structurale de Kapuskasing; GL, Great Lakes International Multidisciplinary Program on Crustal Evolution; AG, Abitibi-Grenville; LE, partie est du Canada; ECSOOT, zones continentales et extracôtières de la partie est du Bouclier canadien.

II.1.1 LES BONS VIEUX CRATONS ARCHÉENS

Saviez-vous que le protocraton archéen consistait en un agrégat de six microcontinents appelés «provinces» (par ex. Province du Supérieur). Chacune des six provinces qui se sont accolées date de l'Archéen tardif, mais se compose de proportions variables de croûte remontant à l'Archéen précoce ou moyen; elles ont toutes une évolution interne caractéristique. Elles sont représentées par les couleurs suivantes sur la diapositive 17: rouge, orange et tons de rose.

Le protocraton archéen a été appelé la Laurentie. Il englobe les provinces des Esclaves, de Nain, du Supérieur, du Wyoming, de Hearne et de Rae, qui sont toutes d'anciens microcontinents.

Les plus vieilles roches de la Terre sont âgées d'environ 4 000 000 d'années, c'est-à-dire 4 000 millions d'années ou 4 000 Ma). Elles s'observent dans la partie ouest de la Province des Esclaves.

Bien que chacune des six provinces archéennes ait eu une évolution différente, elles ont toutes connu une croissance crustale majeure entre 2 800 et 2 600 Ma. La nouvelle lithosphère provenait des roches partiellement fondues des profondeurs sous-jacentes.

Au cours du Protérozoïque précoce, il y a eu du rifting dans ces vieilles provinces. Par la suite, les microcontinents archéens ont été soudés ensemble par d'énormes collisions qui couvraient de grands territoires et qui sont à l'origine des imposantes chaînes de montagnes (orogènes) qui bordent les provinces et qui se sont édifiées entre 2 000 et 1 800 Ma. Le continent nord-américain commençait à prendre forme.

NOTIONS ÉLÉMENTAIRES: PRÉCISION DE L'ÉCHELLE DES TEMPS GÉOLOGIQUES

Comment pouvons-nous savoir quand s'est produit un phénomène qui remonte à si longtemps? Il faut réussir à lire le temps sur l'horloge de longue durée que la nature a laissée dans certains minéraux et éléments atomiques.

DIAPOSITIVE 18: Spectromètre de masse.

Le spectromètre de masse est un appareil qui permet de mesurer avec précision la quantité d'isotopes contenue dans les minéraux.

La géochronologie est une branche de la géochimie qui étudie la physique des isotopes; elle permet de déterminer le moment de formation des roches, des minéraux et des fossiles. Les spécialistes de ce domaine analysent des matériaux qui varient en âge de quelques années à des milliards d'années. Le principe fondamental qui régit leur travail est le suivant: les isotopes radioactifs qui existent au moment de la «naissance» d'un minéral se désintègrent à une vitesse fixe. La mesure de l'abondance relative de l'élément «père» par rapport à l'élément «fils» permet donc d'assigner un âge aux roches analysées.

Un exemple de l'utilisation des isotopes radiogéniques est la méthode de datation U/Pb sur zircons.

DIAPOSITIVE 19: Cristal de zircon observé au microscope électronique à balayage. Le rouge correspond aux fortes teneurs en uranium et le vert, aux teneurs faibles.

Le zircon est présent en petites quantités dans de nombreuses roches de la croûte et contient un petit peu d'uranium (U), un élément qui se désintègre en plomb (Pb) et qui a une demi-vie de 4 500 Ma, environ l'âge de la Terre (4 600 Ma). En mesurant l'abondance et le rapport isotopique de l'uranium et du plomb dans les zircons, on peut dater des roches avec une précision de l'ordre de 2 à 5 Ma, résultat meilleur qu'une partie par millier.

Pour le projet LITHOPROBE, la géochronologie est importante puisqu'elle permet d'assigner des âges tant aux roches en surface qu'aux intrusifs, un aspect essentiel dans la reconstitution de leur évolution géologique à l'échelle locale.

II.1.2 LA GRANDE COURTEPOINTE ASSEMBLÉE AU COURS DU PROTÉROZOÏQUE

Retournons donc à l'étape d'assemblage des portions centrales très vieilles du Canada ! Nous en sommes au moment où les anciens cratons se soudent ensemble en une

courtepoinTE géante qui couvrira la presque totalité du continent.

DIAPOSITIVE 20: Éléments tectoniques de l'Amérique du Nord, sans la couverture sédimentaire.

Quand les vieux microcontinents se sont accolés, ils ont comprimé tout ce qui se trouvait entre leurs limites, y compris le matériel magmatique nouvellement formé (appelé roches «juvéniles») et les terranes océaniques accrésés comme les îles et les groupes d'îles, pour former des orogènes de collision.

Un exemple de ce qui vient d'être décrit s'observe dans le coin nord-ouest de l'Amérique du Nord. L'ancienne province géologique des **Esclaves** est entourée de trois domaines distincts, en l'occurrence le terrane de Wopmay à l'ouest, celui de Taltson au sud et celui de Thelon à l'est. Mais que sont ces entités ?

Le terrane de **Wopmay** était déjà une hauteur il y a environ 2 400 à 2 000 Ma; il a été soudé ou «accrésé» au protocraton archéen des Esclaves entre **1 900 et 1 700 Ma** et il en a résulté l'orogène de Wopmay. Quant au terrane de **Taltson**, il est constitué d'un arc magmatique et d'intrusions associées plus jeunes; les plutons ont en âge entre **1 990 et 1 950 Ma**. Le terrane de **Thelon** est également un orogène, c'est-à-dire une chaîne de montagnes. Il a été formé par une collision oblique entre la Province des Esclaves et celle de Rae, qui a eu lieu entre **1 970 et 1 920 Ma**. Il s'agit du plus vieil orogène découlant de l'accolement de deux provinces archéennes.

La **Province du Supérieur** est la composante la plus importante du vieux continent et constitue un élément typique du **Bouclier canadien**. La Province du Supérieur est entrée en collision avec les provinces archéennes de **Hearne** et de **Rae**, respectivement au nord et au nord-ouest, il y a entre **1 900 et 1 800 Ma**.

Cette collision est à l'origine de l'**orogène trans-hudsonien** qui, à partir du centre des États-Unis, traverse le Manitoba et la Saskatchewan. De là, les montagnes bifurquent vers l'est et le nord-est pour se rendre jusqu'au nord du Québec et dans la baie d'Ungava, après avoir recoupé la baie d'Hudson. À cet endroit, le nom de la chaîne de montagnes devient l'**orogène du Nouveau-Québec**, ce qui

complète la grande cicatrice entre les provinces archéennes du Supérieur, de Hearne et de Rae.

Au nord-est, la **Province de Nain** comprend des roches fortement métamorphisées plus vieilles que **3 800 Ma**. Il y a **2 600 Ma**, il ne manquait aucune partie à la Province de Nain, même son prolongement vers l'est au Groenland (et plus loin jusqu'en Europe) étant formé. Et l'âge de ces formations rocheuses a été déterminé, comme nous l'avons vu, à l'aide de l'horloge atomique fiable que les géoscientifiques ont trouvé, à savoir la mesure du taux de désintégration des isotopes radioactifs.

Regardez encore notre carte intitulée «**Éléments tectoniques de l'Amérique du Nord**»; cette fois-ci cependant, concentrez votre attention sur le coin nord-est, là où la bordure nord-est de la Province du Supérieur est parallèle à la bordure sud-ouest de la Province de Nain. À cette époque, on aurait pu qualifier quiconque d'écervelé de se tenir entre ces deux vieux cratons, parce qu'il semble que ce qui devait arriver est arrivé; ils ont compressé et broyé tout ce qui se trouvait entre leurs limites, serrant en étau de grandes régions, de vastes océans et d'autres entités, pour en arriver au résultat final : la formation de chaînes de montagnes ou d'orogènes relativement étroits.

Dans le cas présent, il y avait parmi les éléments coincés un prolongement vers l'est de la Province de Rae. Cette dernière, comme nous l'avons dit plus tôt, a participé à l'édification de l'orogène trans-hudsonien par sa collision avec la Province du Supérieur, le résultat étant l'orogène du Nouveau-Québec, qui a donc un lien avec l'orogène trans-hudsonien.

De l'autre côté de la Province de Rae, qui dans ce coin de pays correspond à la partie est de la Province de Churchill, la rencontre avec la Province de Nain a donné lieu à l'**orogène de Torngat**. Passons donc à une représentation détaillée de cette région.

DIAPOSITIVE 21: Provinces tectoniques de la région de l'Atlantique Nord.

Les forces dynamiques de la Terre (la tectonique) ont continué leur travail sur le flanc sud-est de la Province de Nain. En effet, c'est

là que s'est construit l'**orogène de Makkovik** il y a environ **1 800 Ma**.

Regardez de plus près les lignes foncées avec des petits triangles qui sont dessinées sur la carte. Elles figurent les contacts le long desquels une unité géologique a été charriée sur une autre et correspondent donc aux régions où s'observent d'imposantes failles de chevauchement. Les triangles pointent dans la direction d'où vient le chevauchement. À vrai dire, cette affirmation n'est pas tout à fait exacte. Il vaudrait mieux dire que les triangles sont sur le compartiment des formations rocheuses qui ont chevauché celles de l'autre côté de la ligne. Et quand, sur une carte, ces lignes représentant les failles de chevauchement se croisent, il y en a nécessairement une qui s'est superposée à toutes les autres, à savoir la plus récente.

Sur la diapositive 21, on peut voir ce qui vient d'être expliqué là où le chevauchement de l'**orogène du Labrador** recoupe les orogènes (chaînes de montagnes) plus vieux du Nouveau-Québec et de Torngat, ainsi que le coeur de la Province de Rae (Churchill) qui les séparent. Le chevauchement de l'**orogène du Labrador** a eu lieu entre **1 700 et 1 650 Ma**, ou encore de 100 à 150 Ma après celui de l'orogène de Makkovik. La raison pour laquelle ces chiffres semblent imprécis est que ces processus ne sont pas soudains mais couvrent un certain intervalle de temps. Les continents et les plaques océaniques ne se déplacent peut-être pas aussi vite qu'un train à grande vitesse, mais ils sont autrement plus difficiles à arrêter. Quelque 600 Ma après l'édification de l'orogène du Labrador, une autre poussée beaucoup plus forte de direction à peu près identique a créé l'imposant **orogène de Grenville**, remaniant les restes érodés de l'orogène du Labrador du même coup.

DIAPOSITIVE 22: Carte du champ magnétique total dans la région de l'ECSOOT (transect des zones continentales et extracôtières de la partie est du Bouclier canadien), montrant les relations entre les profils magnétiques et les éléments tectoniques.

Quand des roches ignées ou sédimentaires se forment, les minéraux aux propriétés magnétiques fossilisent le **champ magnétique** de la Terre à ce moment. Ainsi, l'intensité du

magnétisme dans ces minéraux et l'orientation du champ ne sont jamais les mêmes d'un endroit à l'autre. À l'aide des ordinateurs, on peut visualiser les différentes intensités du champ magnétique en leur assignant des couleurs, ce qui donne une carte assez étonnante figurant les divers éléments tectoniques de la région.

Sur la partie gauche de la diapositive, nous pouvons voir le coin nord-est de la Province du Supérieur et en haut à droite, la portion sud-ouest de la Province de Nain. Ces deux cratons archéens ont broyé entre leurs limites tous les terranes tectoniques qui sont alignés parallèlement aux lignes de failles de direction approximative nord-nord-ouest dans le centre et la partie supérieure de la carte; il s'agit de la portion la plus orientale de l'orogène trans-hudsonien. Le gigantesque orogène de Grenville, avec sa poussée venant du sud, recoupe tous ces éléments et surimpose ses structures approximativement est-ouest à toutes les signatures tectoniques préexistantes.

DIAPOSITIVE 23: Éléments tectoniques de l'Amérique du Nord, sans la couverture sédimentaire.

Au début du présent diaporama, nous avons fait allusion à d'anciens océans remplis de matériaux et enfouis au coeur du continent nord-américain. Il n'est pas difficile de visualiser des archipels dans la partie sud de l'océan Pacifique; il l'est cependant au coeur des Prairies, en Saskatchewan et à quelques endroits du Manitoba. Il faut laisser voyager notre imagination.

Nous sommes donc de retour dans la région de l'**orogène trans-hudsonien (THO)**, qui maintenant se présente sous la forme de vestiges d'érosion d'une série de collisions. Un jour, il y avait un océan avec un arc insulaire et un climat assez doux; c'était avant que la Province du Supérieur (au sud-est) ne vienne emboutir la Province de Hearne-Rae (au nord-ouest) et ne mette un terme à ces conditions, il y a environ **1 900 à 1 800 Ma**. L'orogène trans-hudsonien présente une gamme particulièrement complète d'exemples d'événements tectoniques qui ont abouti à l'agglomération de nombreux minicontinents préexistants à l'Amérique du Nord. En Saskatchewan et au Manitoba, cette ceinture orogénique mesure 500 km selon une

orientation est-ouest; il s'agit de l'un des meilleurs exemples que l'on puisse observer d'un orogène de collision.

Certaines régions de l'orogène trans-hudsonien ont suscité beaucoup d'intérêt de la part des compagnies minières. Et à l'ouest de cette chaîne de montagnes, il y a le **socle albertain** qui attire aussi l'attention des sociétés d'exploration, particulièrement en ce qui a trait au pétrole et au gaz. Nous retournerons dans l'ouest du pays immédiatement après avoir passé en revue l'orogène trans-hudsonien.

Bien sûr, les scientifiques du LITHOPROBE ne travaillent pas pour une compagnie d'exploration et ne sont pas à la recherche d'or, de pétrole ou de diamants. Ils se concentrent plutôt sur la recherche fondamentale. Toutefois, les travaux effectués aident à reconstituer et à comprendre le contexte géologique où se forment, par exemple, les gîtes minéraux et les gisements d'hydrocarbures (pétrole et gaz), ou encore celui où peuvent exister les diamants qui, de leur lieu de formation à de très grandes profondeurs, peuvent réussir à monter jusqu'à la surface par l'intermédiaire de pipes volcaniques. De plus, là où cela est pertinent, les scientifiques tentent d'identifier les raisons pour lesquelles se produisent les tremblements de Terre et les éruptions volcaniques.

DIAPOSITIVE 24: Carte géologique des affleurements du Protérozoïque précoce associés à l'orogène trans-hudsonien, entre les cratons archéens du Supérieur (au sud-est) et de Hearne (au nord-ouest).

Les géologues fondent beaucoup d'espoir sur l'étude de l'orogène trans-hudsonien, parce qu'il s'agit de l'un des meilleurs exemples d'une ceinture de collision dont il existe encore des traces. Peut-être que ce qu'ils aiment le mieux, c'est sa complexité, l'aboutissement d'une évolution tectonique des plus colorées, ponctuée de divers épisodes: rifting, décrochement, compression, formation de croûte océanique juvénile, préservation de vestiges d'un ancien craton archéen, sans oublier tout ce qui est intermédiaire entre ces extrêmes.

En Saskatchewan et au Manitoba, l'orogène trans-hudsonien se divise en quatre zones tectoniques importantes que vous pouvez voir

sur la diapositive 24. On y identifie une zone d'avant-pays dans la partie sud-est (jaune avec TB en surcharge et rouge foncé juste à côté), une grande zone interne composée de croûte juvénile du Protérozoïque (FFB, KD, HLB, GD et RD), un batholite d'arc magmatique de type andin (rouge avec WB en surcharge) et une zone d'arrière-pays dans la partie nord-ouest (jaune avec WD en surcharge).

*La zone d'avant-pays dans la partie sud-est s'appelle la zone de Churchill (zone frontière) et englobe la ceinture de Thompson (couleurs rouge foncé et jaune). Elle a la forme d'une patte de chien; du sud-ouest, elle tourne vers l'est en suivant la bordure du craton du Supérieur. La pétrochimie des **roches volcaniques** de cette zone suggère que ces unités et les roches métasédimentaires associées (roches sédimentaires altérées ou métamorphisées par la chaleur et la pression) se sont formées dans un **rift**, c'est-à-dire à un endroit où la croûte s'est partiellement scindée.*

*La zone interne, appelée la zone de Reindeer, s'étend jusque de l'autre côté de l'orogène trans-hudsonien (jusqu'à la zone de plissement figurée par la couleur jaune). La zone de Reindeer, d'une largeur de 400 km, est un collage du Protérozoïque précoce (**1,9 à 1,8 Ga**), composé de **roches volcaniques d'arc insulaire**, de **plutons** (intrusions magmatiques qui n'ont pas fait surface), de roches sédimentaires volcanogènes (dérivées de l'érosion de volcans) et de molasse plus jeune (détritiques de chaînes de montagnes nouvellement formées). Ces **terrane d'arc insulaire** du Protérozoïque précoce ont été fortement déformés par les **collisions** qui serraient en étau tout ce qui se trouvait entre les limites des provinces du Supérieur et de Hearne-Rae; ils présentent des écaillés imbriquées de formations rocheuses qui se **chevauchent** (c'est-à-dire qu'elles sont les unes sur les autres) et qui s'entremêlent.*

*Les analyses géochronologiques (mesures de l'abondance des isotopes) ont permis de déterminer que la troisième zone, le batholite de Wathaman-Chipewyan (rouge avec WB en surcharge), s'est mise en place il y a environ **1 855 Ma**. (Un «**batholite**» est une importante intrusion magmatique qui recoupe les roches sus-jacentes et se compose de plusieurs plutons.) Ainsi, le batholite susmentionné se trouve entre, au sud-est, le terrane d'arc de la*

zone de Reindeer et, au nord-ouest, les roches continentales remaniées dérivant de l'érosion du craton archéen de Hearne-Rae.

La quatrième zone correspond à l'arrière-pays de la séquence et s'appelle la zone de plissement de Wollaston (jaune avec WD en surcharge). Elle a également été fortement déformée et métamorphisée; elle présente un plissement complexe et ses roches s'entremêlent avec celles du socle archéen.

Il a fallu faire appel à plusieurs disciplines des sciences de la Terre pour en arriver à dresser ce portrait d'ensemble complexe des épisodes tectoniques du passé. On compare ce vieil orogène à la partie ouest de l'Himalaya, où des roches océaniques semblables sont prises en sandwich entre deux continents convergents, à savoir l'Inde qui dérive vers le nord et entre en collision avec l'Eurasie. Passons donc une coupe verticale d'un bout à l'autre de cette carte pour en dégager les tendances tectoniques.

DIAPOSITIVE 25: Coupe géologique sur laquelle apparaissent les principales unités tectonostratigraphiques de l'orogène trans-hudsonien. Elle a été construite à partir de profils de sismique-réflexion dont la trace est montrée sur la diapositive précédente (lignes 2, 3 et 9), mais aussi de données géologiques (cartographie des formations en surface et description de carottes de forage) et de cartes des champs de potentiel. Les tirets en surcharge figurent, de façon schématique, le pendage et la fréquence des réflexions sismiques.

Les coupes obtenues dans le cadre du LITHOPROBE font ressortir un TROISIÈME craton archéen (masse pourpre dont la limite inférieure est la «discontinuité de Mohorovicic»). Au-dessus du craton en question, les roches ont été poussées et tassées; elles forment un drapage vers l'ouest du côté ouest et vers l'est du côté est (voir la coupe schématique à l'écran). La découverte inattendue d'une autre structure archéenne entre les cratons du Supérieur et de Hearne-Rae (qui, par le fait même, est dans le domaine général de l'orogène trans-hudsonien) a été une surprise totale pour les géoscientifiques. Bien que n'affleurant pas, il y a de nombreuses «fenêtres du socle» dans le domaine de Glennie, lesquelles pourraient être

associées au même craton nouvellement identifié.

Ce nouveau craton découvert dans le substratum de la Saskatchewan a des racines crustales profondes, comme en témoigne l'épaisseur de la croûte à cet endroit, laquelle épaisseur est définie par la profondeur de la **discontinuité de Mohorovicic** ou le «**Moho**» selon la forme courte en usage (voir l'unité basale de la coupe schématique). Les questions en suspens maintenant sont les suivantes : Jusqu'où va ce troisième bloc archéen vers le nord et vers le sud? S'agit-il d'un ancien microcontinent? Se poursuit-il à quelque part? Ainsi, les prospecteurs à la recherche de diamants sont à l'affût de cette découverte parce que là où la croûte est épaisse et date de l'Archéen, il y a un bon potentiel diamantifère. Des kimberlites (pipes volcaniques contenant souvent des diamants) semblent être associées à ce bloc archéen.

Si nous voulons reconstituer l'édification de l'orogène trans-hudsonien, la carte des éléments tectoniques et la coupe schématique à travers ces unités peut nous en donner une image tridimensionnelle. En même temps que l'orogène trans-hudsonien s'est formé par collision continentale, la même chose se produisait dans la région qui constitue aujourd'hui l'Alberta. Il semble qu'il s'agisse de deux séries d'événements plus ou moins simultanés (ou contemporains), une sorte de deux pour un, deux grandes ceintures montagneuses s'étant édifiées côte à côte et n'étant séparées que par la Province de Hearne; cette dernière a donc été déformée et imbriquée, c'est-à-dire que ses différentes écaillés se sont chevauchées, formant ainsi un empilement.

DIAPOSITIVE 26: Éléments tectoniques de l'Ouest canadien. Les lignes bleues correspondent à la trace des profils de sismique-réflexion et la ligne rouge en pointillé, à la limite septentrionale de la couverture sédimentaire.

Sur cette diapositive, sont figurés en rose les vieux cratons **archéens**, en l'occurrence ceux du **Supérieur**, de **Rae** et de **Hearne**. Voyez-vous la **zone tectonique de Snowbird** ? Elle apparaîtra également sur la carte du **socle albertain**. La **zone tectonique de Snowbird (STZ)** est un élément tectonique qui se décrit en

superlatifs, en ce qu'elle est très vieille, très importante, très imposante et qu'un jour, elle était le centre d'une activité très intense, de grandes forces tectoniques s'affrontant alors entre des plaques continentales qui s'entrechoquaient.

Suivez la ligne que forme cette zone en descendant vers le sud-ouest jusqu'à la région du **transect du socle albertain**; à cet endroit, la zone tectonique de Snowbird se termine abruptement au niveau de la bordure orientale des **montagnes Rocheuses**, étant recoupée par une imposante faille de chevauchement (ligne bordée de triangles pleins) que l'on peut voir aujourd'hui en avion et même au sol.

La Cordillère est l'addition la plus récente à notre continent et son processus d'accrétion se poursuit encore. Souvenez-vous quand nous nous imaginions sur la côte du Pacifique, à Long Beach, sur les rives de l'île de Vancouver; nous regardions vers l'ouest, vers l'endroit où, sous l'eau, une plaque océanique du Pacifique s'enfonce, par subduction, sous notre continent. Ces mécanismes sont en jeu **au moment présent**, alors que nous regardons cette carte.

La **zone de Snowbird** peut être suivie des contreforts des Rocheuses (les Foothills), vers le nord-est, jusqu'à ce qu'elle bifurque vers l'est pour continuer son chemin jusqu'à la baie d'Hudson. Les géoscientifiques peuvent reconnaître cette zone tectonique sur le terrain (là où les roches **affleurent**), sur des cartes aéromagnétiques et gravimétriques et, parfois, sur des profils de sismique-réflexion qui la recourent.

Il ne faut pas oublier que la couverture sédimentaire qui tapisse aujourd'hui la majeure partie de l'Alberta et se superpose au socle cristallin et aux vieilles unités tectoniques n'apparaît pas sur la présente carte. Les seuls orogènes (chaînes de montagnes) que nous pouvons encore observer aujourd'hui à peu près comme ils étaient au moment de leur édification sont ceux qui n'ont pas encore été complètement érodés ou recouverts de sédiments plus récents; en somme, il s'agit de ceux qui sont toujours des montagnes comme les Appalaches de l'Est et les Rocheuses de l'Ouest.

Mais comment savons-nous qu'il y a un **substratum** sous les sédiments? Encore une

fois une bonne question! C'est l'essence même du projet LITHOPROBE, à savoir d'étudier non seulement les affleurements rocheux, mais aussi leur prolongement dans les grandes profondeurs de la Terre. Sur la présente carte, par exemple, nous pouvons suivre les unités rocheuses et les éléments tectoniques du Bouclier canadien même aux endroits où il est recouvert de sédiments. Une façon d'arriver à ce résultat est d'établir des cartes aéromagnétiques comme celle de la diapositive 27.

DIAPOSITIVE 27: Carte aéromagnétique de l'Ouest canadien. Les lignes blanches montrent la trace des profils de sismique-réflexion.

Il est à noter que la configuration des roches affleurantes du Bouclier canadien peut être suivie même sous la couverture sédimentaire.

Retournons maintenant aux unités du flanc ouest de l'**orogène trans-hudsonien** qui plongent sous la région du transect du **socle albertain**. La coupe géologique de la diapositive 25 a une orientation approximativement est-ouest et recoupe les roches non loin de la limite sud du transect de l'orogène trans-hudsonien. En continuant cette ligne vers l'ouest d'un bout à l'autre du transect du socle albertain, nous couvrons environ 1 000 km et traversons la **zone de Snowbird**. Sur cette distance, nous recoupons deux immenses orogènes autrefois dominants qui ont été érodés, deux chaînes de montagnes qui sont en l'occurrence l'orogène trans-hudsonien et l'orogène de l'Alberta, ce dernier n'ayant pas encore été dénommé. Eh oui! Sa découverte est encore trop récente. Justement, quel nom donneriez-vous à cette chaîne de montagnes du socle albertain? Avez-vous des idées? Pensez-y alors que nous passons en revue le socle albertain.

DIAPOSITIVE 28: Domaines tectoniques du socle albertain et de la partie nord-est de la Colombie-Britannique. Cette carte découle de l'interprétation de données de champs de potentiel (aéromagnétiques) et de datations géochronologiques (méthode uranium/plomb) sur carottes de forage provenant de roches du socle.

Quand les géoscientifiques du LITHOPROBE étudient le socle albertain recouvert de roches

sédimentaires, ils utilisent tous les outils que leur profession met à leur disposition. Nous avons déjà mentionné qu'ils suivent les unités affleurantes du Bouclier canadien qui ont été mises à jour quand elles plongent sous la couverture sédimentaire, mais aussi que certaines propriétés des roches enfouies peuvent être mesurées indirectement. Ce sont, par exemple, la résistance aux courants électriques induits par les grandes nappes de courant qui circulent dans la magnétosphère terrestre à des distances de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres au-dessus de la surface de notre planète; la densité des roches qui perturbe le champ de la pesanteur; les variations de teneur en minéraux magnétiques dans les roches qui modifient le champ magnétique, mais aussi d'autres propriétés des roches des grandes profondeurs.

Mais justement, la couverture sédimentaire, les unités déposées dans le **Bassin sédimentaire de l'Ouest canadien (BSOC)** par exemple, en ont long à raconter. En premier lieu, il y a le fait indéniable qu'il a fallu que le socle s'enfonce pour permettre l'existence de ce bassin. Ensuite, on sait que le bassin est de plus en plus profond à partir de l'endroit où le Bouclier est affleurant jusqu'au front des Rocheuses; cela implique que le taux de subsidence était plus important à proximité des montagnes que du Bouclier. Imaginez le tout comme des couches de roches sédimentaires qui sont minces dans la région du Bouclier et qui s'épaississent à mesure qu'on approche des montagnes.

La carte des éléments tectoniques que nous avons sous les yeux ne nous donne-t-elle pas l'impression que le **socle albertain** est vraiment une mosaïque composée de différentes unités tectoniques ? Et encore, ce ne sont que les grandes unités; à une plus petite échelle, elles présentent des différences.

Pour faire une histoire courte de la description d'un phénomène assez complexe, on peut dire que chaque portion du socle a eu une évolution différente à travers les temps géologiques, et il est fort probable qu'il en soit encore ainsi. Les portions du socle qui s'enfoncent moins rapidement que les entités adjacentes ou même qui subissent un soulèvement auront donc accumulé une couverture sédimentaire moindre au cours des épisodes de mouvement différentiel.

Le **BSOC** a été percé, parfois transpercé, d'un très grand nombre de puits; et toutes les données recueillies ont été gardées. De plus, les levés de sismique-réflexion et de sismique-réfraction ont permis, grâce aux coupes obtenues, de corrélérer les puits. [Vous savez donc maintenant de quoi vivent les géophysiciens et les géologues du secteur pétrolier.]

Le moment du dépôt des divers intervalles de roches sédimentaires est établi par analyse des fossiles et des isotopes qu'elles contiennent (méthode géochronologique). Ainsi, en effectuant différentes mesures dans les couches sédimentaires qui remplissent le **BSOC**, par l'intermédiaire des trous de sondage et en faisant des corrélations entre les levés de sismique-réflexion, il est possible de déterminer quand et où certaines portions du bassin se sont enfoncées plus rapidement que les autres adjacentes (ou le contraire). Cela représente bien sûr beaucoup de travail et on peut s'interroger sur la raison qui justifie tant de trouble ?

C'est simple! Les géoscientifiques cherchent à établir **des liens entre le socle et la couverture sédimentaire**, afin de déterminer comment le socle a modifié le type et le taux de sédimentation ou d'érosion à certaines époques. Cet exercice va plus loin que de simplement évaluer les différences d'épaisseur; il implique aussi l'identification des **types** de sédiments qui ont été déposés (par exemple, du sable ou des carbonates ou de l'argile) et la reconstitution de ce qui s'est produit par après, quand **des fluides de formation ont circulé** dans les sédiments.

Encore une fois, il faut se rappeler que la question est la suivante: Le socle a-t-il eu un rôle à jouer et si oui, quels mécanismes ont été impliqués ? Pourquoi, par exemple, les récifs (souvent associés aux structures poreuses qui piègent le pétrole et le gaz) se sont-ils construits au Dévonien dans certaines zones linéaires et régions de la plate-forme continentale de l'Alberta? Pourquoi des intervalles ont-ils une bonne porosité à certains endroits et pas à d'autres, souvent adjacents ?

Ces questions sont d'une importance capitale pour l'industrie du pétrole et du gaz. L'écoulement des fluides de formation et leur composition chimique comptent parmi les

facteurs à considérer pour savoir où le **pétrole** et le **gaz** peuvent migrer et où la **porosité** a pu être augmentée ou diminuée par des processus de recristallisation des roches sédimentaires. Voilà pourquoi le LITHOPROBE suscite tant d'intérêt auprès des sociétés d'exploration pétrolière et gazière.

Mais l'objectif actuel est d'explorer le **socle**. De déterminer comment la mosaïque des unités crustales de divers âges et de différentes compositions s'est constituée et à quel moment. Les plus vieilles unités tectoniques que nous voyons sur la diapositive 28 sont figurées en rose et remontent à l'**Archéen**. Elles s'observent dans les parties sud-est (portion de la **Province de Hearne**) et nord-est de la carte (portion de la **Province de Rae**). Dans la partie ouest, il y a une entité dite de **Nova** qui est aussi associée à l'Archéen, laquelle pourrait cependant faire partie de la **Province des Esclaves** plus au nord.

Les unités au deuxième rang pour ce qui est de l'âge (**Protérozoïque précoce**) sont les **terrane accrés** de couleur bleu foncé, lesquels ont été arrimés à ce qui existait auparavant. Les creux magnétiques figurés par la couleur violet pâle sont du même âge, c'est-à-dire **2 400 à 2 000 Ma**. Viennent ensuite les terranes de couleur orange brûlé vieux de **2 000 à 1 800 Ma**, qui englobent des arcs magmatiques constitués là où les plaques s'emboutissent et se rupturent. C'était l'époque de l'activité tectonique sous sa forme la plus pure dans la région du socle albertain, mais aussi ailleurs le long de la partie ouest du Bouclier.

De façon très générale, on peut dire que le craton de **Hearne** dans la partie sud-est de la carte est entré en collision avec les terranes accrés et la **Province des Esclaves** (ou des portions de celle-ci) de la partie nord-ouest de la carte et, plus au nord, avec la **Province de Rae**. Un mouvement plus tardif vers le nord-est a réuni les provinces de **Hearne** et de **Rae**.

Et nous voilà encore une fois dans la région de l'imposante **zone tectonique de Snowbird (STZ)**, le long de laquelle l'épaule nord-ouest de la Province de Hearne et la partie sud-est de la Province de Rae se sont rencontrées pour éventuellement se souder. Souvenez-vous... L'**orogène trans-hudsonien (THO)** est le résultat de la collision entre, d'une part, les provinces de **Rae** et de **Hearne** accolées et,

d'autre part, la **Province du Supérieur** au sud-est. Vous savez donc maintenant pourquoi la **STZ** est un élément tectonique si imposant et persistant, constituant la ligne de faille le long de laquelle les provinces de **Rae** et de **Hearne** ont bougé l'une par rapport à l'autre.

À partir de l'orogène trans-hudsonien, en se déplaçant vers le sud-ouest le long de la **STZ**, on voit que cette dernière passe à la zone plus large formée par le **creux de Thorsby** (région violet pâle marquée d'un T sur la carte). Dans le centre de l'Alberta, les provinces de Hearne et de Rae ne sont pas adjacentes; il y a de l'espace entre elles. En fait, la Province de Rae s'est déplacée dans un mouvement à angle dans le sens des aiguilles d'une montre vers les portions plus septentrionales de la Province de Hearne. Et tant qu'à y être, allons jusqu'au bout de cette explication complexe, bien qu'il vaille peut-être mieux jeter d'abord un autre coup d'oeil au contexte plus large de toute l'Amérique du Nord. Avant de changer de diapositive, faisons-nous donc une image où il y a la Province de **Rae** au nord-ouest et celle du **Supérieur** au sud-est, la Province de **Hearne** venant se glisser entre les deux. Les provinces de **Hearne** et de **Rae** s'arriment au niveau de la **STZ** et, ensemble, édifient l'**orogène trans-hudsonien** en emboutissant la **Province du Supérieur**. Plus au sud, la Province de **Rae** au nord-ouest et celle de **Hearne** ne se sont pas soudées l'une à l'autre; il y a entre elles de la plaque océanique et d'autres morceaux de croûte. Il y a donc eu édification de montagnes à l'est des provinces de Rae et de Hearne (orogène trans-hudsonien) et à l'ouest de la Province de Hearne, en Alberta. C'est en partie le craton des **Esclaves** qui a poussé les unités vers le nord-ouest. Un peu à l'instar de ce qui s'est produit entre les provinces de Rae et de Hearne au nord, la Province des Esclaves s'est déplacée vers le nord-est par rapport à celle de Rae, pour éventuellement fusionner avec cette dernière. Ces mouvements de décrochement ont eu lieu le long d'une autre gigantesque zone de faille, la **zone de cisaillement du Grand lac de l'Ours (GSLSZ, diapositive 29)**. C'est le long de cette zone que l'épaule nord-ouest de la Province de Rae et la limite sud-est de celle des **Esclaves** sont entrés en collision.

Au risque d'offusquer les experts, nous allons revenir sur les récents tremblements de Terre de la **Californie**, ceux qui se sont produits le

long de la faille de San Andreas, une autre faille verticale de décrochement. Ce qui est semblable, c'est que la plaque Pacifique à l'ouest se déplace vers le nord le long du plan de faille et par rapport à la plaque nord-américaine. Une différence entre la **STZ** et la **GSLSZ** est qu'il y avait des **plaques continentales** qui se frottaient l'une à l'autre sur presque toute leur longueur, les Provinces de **Rae** et de **Hearne** s'éloignant l'une par rapport à l'autre au sud-ouest et les cratons des **Esclaves** et de **Rae**, dans leur mouvement de cisaillement, formant l'orogène de Thelon entre leurs limites.

Avec une bonne dose de courage, visionnons les prochaines diapositives qui représentent schématiquement ce que nous venons d'expliquer.

DIAPOSITIVE 29: Collision entre les provinces des Esclaves et de Rae.

Les méthodes de datation géochronologique permettent d'émettre une hypothèse séquentielle, qui remonte à il y a très longtemps. La diapositive 29 reconstitue ce qui s'est passé dans le coin nord-ouest de la diapositive 28. Ainsi, on voit que les plaques des **Esclaves** et de **Rae** se rapprochent l'une de l'autre, mais aussi commencent un mouvement de décrochement, qui se concentre le long de la zone de cisaillement du Grand lac de l'Ours (partie droite de la diapositive).

DIAPOSITIVE 30: Mouvements des cratons de Rae, du Supérieur et de Hearne les uns par rapport aux autres, principalement dans le domaine de l'orogène trans-hudsonien mais aussi dans certaines parties de l'Alberta.

Sur cette diapositive, nous nous trouvons plus au sud; il est cependant possible de reconnaître la **STZ**.

DIAPOSITIVE 31: Collision oblique entre les provinces de Rae et de Hearne.

Le présent schéma montre l'interaction entre les **provinces de Hearne** et de **Rae**. Dans la partie nord-est, elles sont adjacentes le long de la **STZ**, mais plus au sud, une ouverture se forme entre elles; les mouvements simultanés n'en sont pas moins obliques.

Quelques-unes des études menées dans la région du transect du **socle albertain** en sont à un stade avancé; il y a entre autres l'établissement des cartes magnétiques et gravimétriques, ainsi que les analyses géochronologiques et même les travaux sur les mouvements des fluides. Cependant, d'autres études en sont encore à leurs premiers balbutiements, le plus gros du travail étant à venir; c'est le cas entre autres des levés de sismique-réflexion profonde. C'est la raison pour laquelle nous avons des réticences à inclure plus de cartes, étant donné que plusieurs d'entre elles ne seront finalisées qu'au cours des années à venir.

Avant de quitter les Prairies, faisons un retour sur la carte des éléments tectoniques de notre continent, dans la région du transect dont nous venons de parler.

DIAPOSITIVE 32: Éléments tectoniques de l'Amérique du Nord.

Maintenant, nous devrions pouvoir reconnaître les deux grandes zones de failles, celles de **Snowbird** et du **Grand lac de l'Ours**. Après les grands épisodes d'accolement du **Protérozoïque précoce**, un **Bouclier canadien** beaucoup plus important a amorcé une longue période de relative tranquillité tectonique.

II.1.3 DERNIÈRE PHASE D'ASSEMBLAGE DE LA MOSAÏQUE DU BOUCLIER CANADIEN, IL Y A 1 000 Ma

Pendant la période de tranquillité, il n'y a eu, à vrai dire, qu'un seul épisode orogénique, celui que l'on peut étudier dans le transect des zones continentales et extracôtières de la partie est du Bouclier canadien (ECSOOT), qui a donné lieu à l'**orogène du Labrador** (il y a environ **1 700 à 1 650 Ma**); il s'agit donc du seul épisode d'édification de montagnes qui soit survenu avant que le **supercontinent**, résultant de l'accolement de microcontinents, ne soit encore embouti par une autre plaque géotectonique. Il y a donc eu de longs millénaires de relative paix tectonique en Amérique du Nord, en l'occurrence au moins 350 Ma, soit l'intervalle de temps qui sépare l'**orogène du Labrador** de l'**orogène de Grenville**. Pendant ces années, le magmatisme était essentiellement anorogénique ou non orogénique.

Mais après le calme, est survenue la plus grosse collision que la Terre ait connue, soit la formation de l'**orogène de Grenville**, édifié par le charriage de roches, auparavant enfouies profondément, sur le supercontinent; ce sont des continents ou des microcontinents venant du sud-est et d'affinité incertaine qui se sont accrétés au supercontinent. L'orogène de Grenville, bien que ce ne soit pas absolument certain, a été le plus grand système montagneux qui ait existé sur notre planète; son édification a mis un terme à l'assemblage principal du continent au Protérozoïque, qui après cela était un véritable supercontinent que l'on a appelé la Laurentie.

Pensez au processus de formation de l'Himalaya que nous pouvons observer aujourd'hui, le vieux craton de l'Inde s'enfonçant sous l'Eurasie. C'est la même chose qui s'est produite à ce moment-là, à l'endroit où aujourd'hui on observe la chaîne de montagnes la plus orientale de l'Amérique du Nord, à savoir l'orogène de Grenville. Nous ne prétendons pas connaître d'équivalent précambrien à l'Inde d'aujourd'hui; ce que nous savons, c'est qu'à cette époque, le résultat a été une chaîne de montagnes vraisemblablement plus imposante encore que l'Himalaya.

Sur la diapositive 32, jetez un coup d'oeil aux régions vert gazon figurant l'«**orogène de Grenville**». Le territoire couvert englobe toute la partie sud-est de l'Ontario (des endroits comme Parry Sound, London, Kingston, Toronto ou Ottawa) ainsi que la presque totalité du Québec (dont Montréal et Sept-Îles) et du Labrador. Tentez d'évaluer la distance que couvre cet orogène. Il s'observe sur quelque 5 000 km de longueur, depuis la partie nord du Mexique, à travers l'ensemble des États-Unis et toute la partie est du Canada, pour ensuite quitter la côte du Labrador et se poursuivre dans le sud de la Suède où on l'appelle la **Province sveconorvégienne**. Le chaînon manquant se trouve dans l'Atlantique, qui s'avère être un rift nouvellement formé. En fait, avant que le rifting à l'origine de l'Atlantique ne commence, un autre océan s'était ouvert et s'était refermé, donnant lieu à l'édification de l'orogène appalachien-calédonien que nous décrirons sous peu.

Essayez d'imaginer les hauteurs vertigineuses de l'orogène de Grenville et toutes les régions

qu'il pouvait occuper ... Même les vestiges que nous pouvons cartographier aujourd'hui à partir des données géologiques et géophysiques ne représentent qu'une partie de tout le territoire que ce système montagneux couvrait, avant que les impitoyables forces tectoniques de la Terre ne viennent le découper en morceaux.

Faites appel à votre imagination et essayez de voir dans votre tête des sommets très élevés comme ceux de l'Everest et des hautes terres glaciales balayées par les vents comme celles du Tibet à l'endroit où, aujourd'hui, la moitié des Canadiens vivent, là, au coeur même de l'orogène de Grenville. Les montagnes qui le formaient ont été érodées par la pluie, les rivières et les glaciers, chaque grain de ses pics majestueux ayant été transporté sur de grandes distances, quelques-uns même jusqu'à 3 000 km de leur source, dans l'archipel arctique. Les vestiges que nous observons aujourd'hui sont des roches qui un jour étaient enfouies jusqu'à 30 à 35 km de profondeur, comme en témoignent les mylonites qui affleurent sur les rives de la baie Georgienne; on peut marcher sur ces roches qui ont été charriées sur la Province du Supérieur quand le continent de Grenville a été découpé en tranches pour devenir de deux ou trois fois plus épais par l'empilement des écailles, lesquelles ont par la suite été partiellement érodées. Tout cela s'est passé il y a plus d'un milliard d'années. Il en a résulté une Amérique du Nord encore plus grande qui a été appelée la Laurentie. En passant, les mylonites sont des roches fortement déformées que l'on observe généralement là où il y a eu du chevauchement.

DIAPOSITIVE 33: Affleurement dans la baie Georgienne.

Ces roches photographiées sur la rive nord de la baie Georgienne se trouvaient un jour à de grandes profondeurs. Elles ont été charriées sur le craton nord-américain au cours de l'orogène de Grenville et témoignent aujourd'hui de cet événement qui est survenu il y a plus de **1 000 Ma**, c'est-à-dire plus d'un milliard d'années.

Les lignes qui précédaient constituent un exemple de ce qui peut ressortir de la cartographie géologique sur le terrain; elle permet de retracer des événements qui ont eu lieu il y a très longtemps et à diverses

profondeurs dans la croûte de la lithosphère. Parmi les données recueillies, il y a celles de **géochimie**, de **géochronologie** et de **pétrologie**, lesquelles donnent la possibilité de déterminer divers aspects des unités rocheuses affleurantes et des minéraux qui les composent, dont notamment leurs constituants (**source**), leur évolution (**époque** de formation) et la **profondeur** à laquelle elles se sont formées (température et pression).

Parmi les autres mesures qui peuvent être prises en **affleurement**, il y a l'orientation des **minéraux magnétiques**, lesquels minéraux fossilisent le champ magnétique à l'époque de leur solidification. (Nous avons déjà parlé de ce phénomène auparavant). L'orientation que les minéraux acquièrent dépend de leur position géographique (la latitude à laquelle ils se trouvent) au moment de leur aimantation. Ainsi, le concept même de la tectonique des plaques peut être mis à l'épreuve avec l'exemple de l'orogène de Grenville, étant donné que les unités rocheuses qui le composent ont été transportées à mesure que les plaques sur lesquelles elles se trouvaient ont bougé.

Il faut aussi juger de la position des unités rocheuses les unes par rapport aux autres, puisque les forces tectoniques ont déplacé certaines d'entre elles, comme c'est le cas de celles de l'affleurement de la diapositive 33. Toutes les données susmentionnées doivent donc être intégrées lorsque vient le temps de comprendre la position actuelle des roches observées.

Mais il ne faut pas oublier que notre but consiste à reconstituer ce qui se passe sous la surface de la Terre, dans les profondeurs de la lithosphère sur laquelle nous vivons.

Souvenez-vous de la coupe **sismique** de la côte de l'Atlantique? Des **ondes sonores** sont envoyées jusqu'aux grandes profondeurs de la lithosphère et reviennent à la surface sous la forme d'échos (**réflexions**) qui sont enregistrés à l'aide de **géophones**. Ultérieurement, nous vous décrirons plus en détail la **méthode de la sismique-réflexion** et vous verrez, c'est assez fascinant.

DIAPOSITIVE 34: Profil de sismique-réflexion profonde recoupant la zone tectonique du Front de Grenville.

*La coupe sismique sur la présente diapositive constitue une représentation cohérente du gigantesque **chevauchement** à l'origine de l'**orogène de Grenville**. Considérez cette coupe comme une immense image produite par rayons X ou, encore mieux, par ultrasons. L'affleurement que nous venons de visionner n'est qu'une très petite parcelle de cet ensemble composé de nombreuses unités rocheuses, dont l'épaisseur cumulative se chiffre à plusieurs dizaines de kilomètres. La poussée tectonique est venue de la droite de la coupe.*

DIAPOSITIVE 35: Position des profils de sismique-réflexion établis dans le cadre du GLIMPCE (Great Lakes International Multidisciplinary Program on Crustal Evolution).

La coupe sismique de la diapositive 34 (que nous venons de visionner) était une portion du profil J dans la partie nord du lac Huron; elle s'étend vers l'est de l'intersection du profil avec le Front de Grenville jusque dans la baie Georgienne.

DIAPOSITIVE 36: Dessin au trait constituant un modèle simplifié de la partie est du profil J, élaboré à partir de données de réflexion.

*Sur la présente diapositive, nous en voyons un peu plus de la même ligne sismique. La portion supérieure révèle les mêmes réflexions mais sous un jour simplifié. Il en ressort les mêmes plans de réflexion correspondant aux chevauchements (traits épais); au-dessus de la coupe, la zone frontale de faille qui existe aujourd'hui est identifiée. La portion inférieure de la diapositive est l'interprétation géologique de l'image sismique du haut; on y voit clairement comment le **Front de Grenville** recoupe et chevauche les autres unités en se servant de la rampe formée par la Province du Supérieur et le petit terrane sus-jacent, celui de Manitoulin. Mais avant que les roches de l'orogène de Grenville ne soient charriées sur la Province du Supérieur et sur d'autres roches, elles ont elles-mêmes été chevauchées par des microterranes se déplaçant vers le nord-ouest (par ex. le domaine de Britt); il en a résulté l'enfoncement des roches de Grenville jusqu'aux niveaux inférieurs de la croûte où elles ont été métamorphosées (soumises à des conditions de température et de pression élevées) pour devenir des roches dites «de grade élevé de métamorphisme». Par la suite,*

des mouvements de chevauchement vers le nord-ouest ont recoupé la croûte et transporté les roches de la zone tectonique du Front de Grenville jusqu'à la surface, comme le montre l'interprétation géologique.

DIAPOSITIVE 37: Éléments tectoniques de l'Amérique du Nord et position de chacun des transects du LITHOPROBE.

Avant de se pencher sur le plus grand rift jamais identifié sur la Terre, à savoir le **système de rift keweenawien** ou **SRK**, un autre coup d'oeil au coeur du Bouclier canadien s'impose. Il est à noter que le SRK est représenté par un figuré en vert recoupé de lignes et identifié par les lettres KR, à l'intérieur du polygone du transect du GLIMPCE (GL). À cet endroit nous sommes sur le vieux craton de la Province du Supérieur, le plus grand de tous les cratons **archéens** de la planète (1,6 million de kilomètres carrés). Nous y sommes parce que nous voulons en savoir plus sur les épisodes précoces de formation des premiers cratons, qui constituent le noyau du continent nord-américain.

La **Province du Supérieur** permet d'étudier de façon remarquable la formation de **croûte** à ses débuts. À cette province s'est greffé du matériel **juvénile** (roche nouvellement formée à partir de magma) sur une période s'échelonnant de l'**Archéen moyen** à l'**Archéen tardif** (environ 3 100 à 2 600 Ma). De plus, il ne faut pas oublier de parler de la sous-province d'**Abitibi**, le plus grand bloc de **croûte juvénile** qui ait été ajouté à la Province du Supérieur. Les données géochimiques indiquent que les roches de cette sous-province dérivent directement du **manteau** de l'**Archéen tardif**.

La présence de ces divers terranes très vieux comme éléments du craton archéen le plus important de la Terre s'avère une bonne raison d'étudier leur évolution interne, de tenter de déterminer comment ces différents types de terranes ont fini par s'accoler ou s'accréter. Le mécanisme était-il le même que celui que nous avons pu identifier en reconstituant les **processus** plus récents de la **tectonique des plaques**?

Voilà donc le but du nouveau secteur d'étude sur lequel des travaux du LITHOPROBE s'amorcent, à savoir le **transect de la partie ouest de la Province du Supérieur**. Ce dernier

fait suite à une étude détaillée de la zone structurale de Kapuskasing, qui a antérieurement été l'objet d'un transect dans le cadre du LITHOPROBE. Le territoire couvert par chacun des transects est indiqué sur la carte de la diapositive 37.

DIAPOSITIVE 38: Carte géologique de la partie ouest de l'Ontario, montrant la division en sous-provinces de la Province du Supérieur; sont également indiqués les levés sismiques qui devraient être faits.

Le craton du **Supérieur** possède quelques caractéristiques remarquables. Il présente entre autres une série de «**ceintures**» de **roches vertes et de granites**, formant des grandes zones d'orientation générale est-ouest qui mesurent entre 100 et 200 km de largeur. (Les granites sont des roches dérivant de la solidification de magma; quant aux ceintures de roches vertes, elles consistent en des entités à peu près linéaires composées essentiellement de roches volcaniques métamorphisées, d'où la couleur verdâtre, mais aussi d'une certaine quantité de roches plutoniques. Ces roches sont typiques des cratons archéens.) Les **ressources minérales abondantes** du Canada se concentrent dans ces ceintures, entre lesquelles s'intercale une série de sous-provinces sédimentaires. Ces entités ont leurs propres caractéristiques et se distinguent les unes des autres par leur lithologie (type de roches), leur âge et leur degré de métamorphisme (intensité de l'altération par la chaleur et la pression, qui augmente avec la profondeur d'enfouissement ou l'importance des contraintes tectoniques). Ainsi, on différencie plusieurs **sous-provinces** dans la Province du Supérieur. Quatre types primaires de ceintures ont été dégagés et on peut faire des parallèles avec les ceintures semblables découlant des mécanismes modernes de la tectonique des plaques.

Il y a premièrement les terranes **volcano-plutoniques** qui ressemblent aux arcs insulaires et qui, sur la carte de la diapositive 38, sont les ceintures de roches vertes et de granites figurées en vert et en rose. Pour expliquer ce qu'est un pluton, nous ferons appel à la notion de «volcan» que tout le monde connaît. Un **pluton** est une intrusion magmatique qui, au contraire d'un volcan, n'a pas atteint la surface. Il reste à élucider ce qu'est un «**terrane**». Il s'agit en fait d'un

morceau distinct de croûte qui présente une homogénéité quant au **style tectonique** et à **l'évolution**; il est séparé des terranes adjacents aux caractéristiques différentes par des discontinuités (par ex. des failles). Quelques complexes plutoniques pourraient être des petits morceaux dérivant de continents.

Il y a aussi, en deuxième lieu, quelques ceintures qui se composent essentiellement de roches plutoniques, c'est-à-dire de larges bandes de roches d'origine magmatique (en rose sur la carte).

Le troisième type est représenté par les ceintures **métasédimentaires** (en jaune sur la carte), composées de roches sédimentaires altérées par le métamorphisme et ressemblant aux prismes d'accrétion. (À l'origine, ces prismes étaient vraisemblablement de grandes masses sédimentaires recouvrant peut-être une plaque océanique en subduction, lesquelles masses ont été arrimées au craton par les forces tectoniques. C'est ce mécanisme qui, actuellement, permet à du nouveau matériel de s'ajouter à la côte ouest de l'île de Vancouver.) Ainsi, les prismes ont été altérés par des conditions de température et de pression élevées découlant de leur enfouissement.

Quant au quatrième type, il s'agit des complexes **gneissiques** fortement métamorphisés (teintes de violet et de gris). Les gneiss sont des lithologies rubanées soumises à un **métamorphisme** régional intense, les roches étant dans des conditions de pression élevée. Cela signifie probablement que ces complexes sont des portions plus profondes des divers autres terranes identifiés, ce qui les recouvrait ayant donc été érodé.

On observe une variation chronologique générale du nord au sud dans la Province du Supérieur, allant d'environ **3 100 à 2 650 Ma**, laquelle variation a été interprétée comme le résultat de l'accrétion tectonique de terranes d'arc insulaire de plus en plus jeunes. Une autre explication veut que l'évolution de la Province du Supérieur ait été dominée, il y a environ **2 730 Ma**, par une **zone de subduction** arquée à pendage nord et faisant face au sud-est, qui couvrait l'ensemble de la province. Après cette époque, l'évolution du craton du Supérieur a été principalement marquée par un mécanisme d'**accrétion** de fragments de **croûte océanique** et d'**arc insulaire**. Les dernières

collisions se sont produites entre **2 690 et 2 680 Ma**. Pour les besoins de notre présentation, il suffit de savoir que ces âges correspondent à **l'Archéen tardif**.

Nous vous avons déjà fait part de l'importance des ceintures de roches vertes pour l'industrie minière de notre pays; en fait, elles sont l'un des piliers de l'économie canadienne en matière de ressources.

DIAPOSITIVE 39: Position de la sous-province d'Abitibi, des sous-provinces avoisinantes et de la Province de Grenville, faisant toutes partie du Bouclier canadien.

Comme nous l'avons vu auparavant, la sous-province d'**Abitibi** est le plus grand bloc de **croûte juvénile** qui ait été ajouté à la Province du Supérieur. Les données géochimiques indiquent que les roches de cette sous-province dérivent directement du **manteau de l'Archéen tardif**. Il s'agit donc d'une jeune ceinture de roches vertes (par rapport aux autres), caractérisée par du magmatisme «**juvénile**», c'est-à-dire l'extrusion de magma «**originel**», de roches qui n'ont pas été refondues.

DIAPOSITIVE 40: Carte géologique schématique de la ceinture de roches vertes d'Abitibi et des éléments géologiques environnants. (Les numéros identifient des lignes de sismique-réflexion.)

La présente diapositive donne un aperçu de l'étendue de la **ceinture de roches vertes d'Abitibi**, la plus importante en son genre dans la Province du Supérieur. Cette ceinture est délimitée au sud-est par le **Front de Grenville** dont nous avons parlé il y a peu de temps. À l'ouest et au nord-ouest, c'est aussi une faille qui constitue sa limite et qui la sépare de la **zone structurale de Kapuskasing (KSZ)**. Comme en témoigne la légende, il y existe plusieurs types de roches. Les agglomérations identifiées sont des villes **minières** bien connues; en effet, il ne faut pas oublier que la ceinture de roches vertes d'Abitibi est le site de nombreuses grandes mines de métaux précieux et communs.

DIAPOSITIVE 41: Carte géologique généralisée de la zone structurale de Kapuskasing (KSZ) et des environs.

La petite carte dans le coin gauche supérieur de la diapositive montre la position de la grande carte par rapport aux sous-provinces de la Province du Supérieur. Les roches de la **zone structurale de Kapuskasing** sont figurées par la couleur magenta. Nous reviendrons à la présente diapositive dans une minute. Mais pour l'instant, nous nous concentrerons sur la ligne A-B-C-D, la trace de la coupe représentée à la diapositive 42. Il s'agit d'un exemple typique d'interprétation **multidisciplinaire** découlant de données géophysiques (sismique-réflexion, sismique-réfraction et autres), géochimiques, géochronologiques et géologiques. Voici donc la coupe en question.

DIAPOSITIVE 42: Coupe de la zone structurale de Kapuskasing.

Les **failles de chevauchement** à grande échelle peuvent, comme nous l'avons vu, charrier des écaillés de roches **crustales** profondément enfouies jusqu'à la surface. Un affleurement de **roches très vieilles** en provenance des **grandes profondeurs** s'observe dans la région du transect du LITHOPROBE consacré à la zone structurale de Kapuskasing (KSZ). Étant donné que cet affleurement nous permet de regarder très loin en arrière, les géologues l'appellent une «fenêtre».

Comme nous l'avons mentionné auparavant dans le texte, le **grain structural** de la Province du Supérieur est d'orientation est-ouest. La **zone structurale de Kapuskasing** recoupe obliquement ce grain et s'oriente vers le NE-SW sur au moins 400 km. Cette caractéristique est soulignée par des **anomalies** gravimétriques et aéromagnétiques (voir diapositive 43).

DIAPOSITIVE 43: Carte aéromagnétique au relief par ombres portées en couleurs, avec la source lumineuse placée dans l'axe des dykes de Matachewan pour en supprimer la signature et mettre l'accent sur le style structural à l'échelle locale.

Revenons donc à la diapositive 41.

DIAPOSITIVE 41: Carte géologique généralisée de la zone structurale de Kapuskasing (KSZ) et des environs.

La **zone structurale de Kapuskasing** est un bloc de lithosphère qui, un jour, se trouvait à 20 km sous la surface. En un ou deux

immenses soubresauts de la Terre, entre **2 600 et 1 900 Ma**, ces roches des profondeurs ont été charriées sur 70 km vers l'est et jusqu'à la surface de la planète, là où on les observe aujourd'hui.

La région cartographiée est traversée par une ancienne structure linéaire, la **zone de failles d'Ivanhoe Lake**, qui ressort très bien sur les cartes gravimétriques et aéromagnétiques. La ligne de faille s'observe du lac Supérieur jusqu'à la Baie James. C'est le long de ce plan de faille à pendage ouest que le **chevauchement de la zone structurale de Kapuskasing** a charrié des unités rocheuses fortement altérées des grandes profondeurs jusque sur les lithologies moins altérées de la sous-province d'Abitibi, à l'est.

DIAPOSITIVE 42: Coupe de la zone structurale de Kapuskasing.

Sur cette coupe, nous voyons aussi le plan de faille d'Ivanhoe Lake et pouvons constater qu'il est de plus en plus horizontal en profondeur, allant même éventuellement jusqu'à disparaître.

Les roches chevauchantes sont le témoignage d'une période critique de croissance continentale (**2 800 à 2 600 Ma**), marquée par la formation d'une grande partie du craton et son évolution jusqu'à un état stable. Maintenant soulevée, la **zone structurale de Kapuskasing** constitue une «fenêtre» à travers laquelle il est possible d'avoir un aperçu de l'architecture et de l'évolution de la vieille **croûte continentale de l'Archéen**. Lorsque des structures de ce genre ont atteint la surface, il est possible de les cartographier, mais aussi de mesurer directement les propriétés physiques et chimiques des roches affleurantes et de déterminer leur âge. Les méthodes à distance (indirectes), dont la sismique-réflexion, permettent aux scientifiques de suivre les unités cartographiées lorsqu'elles plongent dans les profondeurs de la lithosphère.

Jetez un coup d'oeil à la limite inférieure de la coupe. Il s'agit d'une discontinuité que l'on identifie à l'aide de la géophysique, à savoir la **discontinuité de Mohorovicic** ou, tout simplement, le **Moho**. [Dans le glossaire, à la fin du texte, le Moho est défini comme la profondeur à laquelle la vitesse des ondes sismiques augmente rapidement et passe à 7,8 km/s. Elle correspond à la **limite entre la**

croûte et le manteau, laquelle est déterminée à l'aide des levés de sismique-réfraction.]

*Le **Moho** a tendance à être à la même profondeur dans toutes les régions. Des exceptions existent parfois dans des secteurs structuraux critiques, comme c'est le cas ici sous la **zone structurale de Kapuskasing**, où la croûte (dont la limite inférieure correspond au Moho) atteint une épaisseur de près de 55 km, ce qui est 10 km ou plus que la moyenne régionale. [Auparavant, nous avons pu voir un approfondissement localisé du Moho sur la coupe de l'orogène trans-hudsonien.]*

Revenons pour un moment à la carte aéromagnétique de la zone structurale de Kapuskasing, sur laquelle les caractéristiques ressortent de façon exceptionnelle.

DIAPOSITIVE 43: Carte aéromagnétique au relief par ombres portées en couleurs, avec la source lumineuse placée dans l'axe des dykes de Matachewan pour en supprimer la signature et mettre l'accent sur le style structural à l'échelle locale.

La simulation d'une source lumineuse et l'ombre obtenue par calculs, comme si les valeurs de magnétisme étaient des reliefs plutôt que des couleurs, constitue une utilisation merveilleuse de la puissance des ordinateurs. Cette technique met en évidence les grandes orientations et les éléments qui caractérisent le style structural et la sédimentation. Sur la présente carte, l'expression des nombreux dykes d'orientation approximative nord-sud qui dominent le tableau structural dans la partie est de la carte a été atténuée en plaçant la source lumineuse imaginaire dans la même direction que les intrusions, de façon à ce qu'elles ne projettent pas une ombre trop importante.

*Il est possible de suivre la trace de la **zone de failles d'Ivanhoe Lake** du coin droit supérieur au coin gauche inférieur de la carte. Cette ligne constitue la trace en surface du **plan de faille à pendage ouest** le long duquel les roches à la gauche de la ligne ont été charriées sur celles à la droite. Comme nous pouvons le voir, il y a bien d'autres d'éléments qui ressortent de la carte aéromagnétique, sous la forme de différences dans l'intensité du magnétisme qui mettent en évidence les diverses failles et unités rocheuses de même*

que leur orientation. Pour identifier et comprendre tous ces éléments, il faut avoir étudié au niveau universitaire en géophysique.

Avant de laisser de côté le Précambrien, nous devons de parler d'un autre épisode tectonique aux forces titanesques, lequel a presque scindé notre continent. Son témoignage se trouve dans la partie sud du Canada, dans la région des Grands Lacs; il s'agit du **système de rift keweenawien**.

DIAPOSITIVE 44: Position des profils géophysiques établis dans le cadre du LITHOPROBE sur une carte géologique simplifiée de la région des Grands Lacs.

*Cette région est le point de jonction de plusieurs éléments tectoniques d'importance. À la droite, il y a la **Province de Grenville** et la **zone tectonique du Front de Grenville**; c'est le long de cette dernière que la Province de Grenville a été charriée sur la **Province du Supérieur** et a en même temps recoupé d'autres unités tectoniques existant à ce moment, dont notamment le **système de rift keweenawien** et la zone de plissement **pénokéenne**. L'érosion de la zone de plissement **pénokéenne** est encore plus importante que celle de l'orogène de Grenville, si on considère qu'elle est plus âgée, la période de 70 millions d'années au cours de laquelle elle s'est formée étant il y a entre **1 890 et 1 820 Ma**.*

*Le **système de rift keweenawien** remonte à une période d'extension qui a fait une cicatrice très profonde au continent, jusqu'à ses véritables racines crustales; il n'y a cependant pas eu rupture bien qu'on y était presque. Le **système de rift keweenawien** s'est formé sur un intervalle de 20 millions d'années, c'est-à-dire il y a entre **1 110 et 1 090 Ma**. Aujourd'hui, il se présente sous la forme d'une structure arquée qui s'étend sur une distance de 2 000 km; en partant du Kansas au sud, le système monte jusque dans la région du lac Supérieur et redescend en recoupant la partie nord du lac Michigan (dans l'état du même nom). Les roches keweenawiennes n'affleurent d'ailleurs que dans la région du lac Supérieur.*

Sur la diapositive 45, on peut voir de quoi a l'air cette énorme cicatrice de la croûte terrestre sur un profil de sismique-réflexion. Avant de visionner cette diapositive, identifiez la trace de cette coupe, la ligne F sur la carte

des Grands Lacs. Par la suite, nous étudierons un modèle établi à partir de données géophysiques complémentaires provenant de la ligne A, qui traverse aussi le lac Supérieur, un peu à l'ouest de la ligne F.

DIAPOSITIVE 45: Coupe sismique se limitant à la portion centrale de la ligne F. La stratification des roches sédimentaires déposées pendant la formation du rift ressort très bien entre 10 et 30 km de profondeur.

La sismique et les autres données ont maintenant prouvé que ce **rift** a été le **plus profond** de l'histoire de la planète. Mais jusqu'à quelle profondeur plongeait-il ? À certains endroits, la profondeur excédait les 35 km, tellement que l'Amérique du Nord a presque été scindée en deux continents. Une épaisseur surprenante de 20 à 25 km de coulées de laves interdigitées avec des sédiments dérivés des hautes terres environnantes est venue tapisser le fond de cette gigantesque vallée axiale. Ces lithologies ressortent sur la coupe comme des réflexions en couches qu'on observe au-delà de 10 km de profondeur. Ce n'est qu'une fois le rift entièrement formé qu'un autre 10 kilomètres et plus de sédiments ont été déposés.

Sous le rift, l'épaisseur de la **croûte** cristalline a été **réduite** à une valeur équivalant à peine au quart de ce qu'elle était. Cet amincissement a permis la montée de magma en provenance de profondeurs encore plus grandes, d'où l'imposant volume de roches volcaniques et peut-être la rupture complète de la croûte çà et là.

DIAPOSITIVE 46: Modèle simplifié des vitesses de propagation dans la croûte supérieure (profil A de la diapositive 44). HZ - zone de charnière; IRF - faille d'Isle Royale; KF - faille de Keweenaw; SS - hauts-fonds du lac Supérieur (exagération verticale de 3:1).

Ce modèle nous donne une meilleure vue en profil du rift, partiellement en raison de l'exagération verticale. (Toutes les valeurs sont triplées.) Regardez de plus près les lignes de faille, sans oublier les limites de la partie profonde, c'est-à-dire de la portion centrale du rift, qui bien sûr sont également des failles; c'est là la caractéristique principale d'un rift. À la différence du profil de la diapositive précédente qui découlait de données de

sismique-réflexion, le présent modèle a été élaboré à partir de données de **sismique-réfraction**, une technique de levé qui permet de mesurer la vitesse des ondes sonores à l'intérieur des formations. Ces deux méthodes seront décrites plus loin dans le texte.

D'autres méthodes géophysiques permettent de faire ressortir de façon remarquable la signature du système de rift keweenawien. Un coup d'oeil sur la carte gravimétrique de la région englobant le lac Supérieur vous en convaincra.

DIAPOSITIVE 47: Carte gravimétrique du lac Supérieur et des régions environnantes, sur laquelle ressortent les importantes valeurs positives associées à la vallée axiale par rapport à celles qui le sont aux roches adjacentes. La forte anomalie positive n'a pas trouvé explication avant l'obtention des résultats de nos travaux dans la région des Grands Lacs; elle est due à l'énorme volume de roches volcaniques de forte densité dans la vallée axiale. Compilation des données et mise en carte: Division de la géophysique de la CGC (Commission géologique du Canada).

La carte aéromagnétique est peut-être encore plus étonnante.

DIAPOSITIVE 48: Carte aéromagnétique du lac Supérieur et des régions environnantes. Compilation des données et mise en carte: Division de la géophysique de la CGC.

Encore une fois, il y a un grand contraste entre les unités de remplissage du rift (roches volcaniques et sédimentaires) et les lithologies des régions environnantes, tout à fait différentes du point de vue géologique. L'apparence plus lisse de la configuration dans le rift s'explique par l'effet atténuant des roches sédimentaires non magnétiques qui se trouvent au sommet.

II.2 L'AMÉRIQUE DU NORD DE PLUS EN PLUS JEUNE

Maintenant que nous avons reconstitué la mosaïque du Bouclier précambrien au Canada, l'orogène de Grenville ayant été le dernier ajout, il y a deux possibilités. Nous pouvons nous lancer dans une présentation sur les aspects théoriques et pratiques des diverses disciplines et des différents outils auxquels les géoscientifiques du LITHOPROBE ont dû

avoir recours pour percer les grands mystères de la plaque continentale. Nous n'en retirerions cependant qu'un changement de sujet, qui ne serait pas pour autant de tout repos.

Nous retournerons plutôt là où nous avons commencé, à savoir à l'étude d'un océan en expansion aux allures tranquilles, l'**Atlantique**, et d'un autre en rétrécissement entouré de sites propices aux tremblements de Terre et de volcans, en l'occurrence le **Pacifique** et sa ceinture de feu.

II.2.1 OUVERTURE, FERMETURE ET RÉOUVERTURE DE L'OCÉAN FORMANT LA PARTIE EST DU SUPERCONTINENT

À la suite de l'édification de l'orogène de Grenville, il y a environ un milliard d'années, l'Amérique du Nord semble avoir pris le temps de respirer un peu. Pour une période de presque 400 Ma, notre continent n'a pas été aussi actif qu'au cours des 400 Ma qui ont précédé. Cela ne signifie pas que tout était au beau fixe, mais seulement qu'il n'y avait pas d'événements de très grande échelle comme ceux que nous venons de décrire. Dans la partie est du continent, il y a environ 600 Ma, un rift continental s'est ouvert et un océan, le prédécesseur de l'Atlantique, a vu le jour. Après être devenu très vaste, cet océan a commencé à se refermer sous l'action d'autres forces tectoniques pour éventuellement disparaître. Et plus tard, à une certaine époque, un autre rift s'est formé, celui à l'origine de l'océan Atlantique que nous connaissons. Nous verrons plus en détail ces épisodes tectoniques, mais auparavant, faisons un petit retour en arrière.

DIAPOSITIVE 49: Carte simplifiée des éléments tectoniques de l'Amérique du Nord, avec en surcharge le contour des transects. Ces polygones délimitent les régions où les scientifiques du LITHOPROBE étudient quelques-uns de principaux éléments tectoniques dont nous avons parlé. Plus loin dans le texte, nous examinerons le transect de l'Est du Canada (LE).

Maintenant, cette diapositive des principaux éléments tectoniques de l'Amérique du Nord devrait vous être familière. Jetez encore un coup d'oeil à l'orogène de Grenville, ou plutôt aux vestiges de la plus vaste chaîne de

montagnes que la Terre ait connue après érosion de plusieurs milliers de mètres de matériel. En fait, ce sont les racines des sommets qui existaient auparavant que nous observons aujourd'hui et que les géoscientifiques peuvent décrire. Comme nous vous en avons déjà glissé un mot, ce qui reste n'englobe pas l'ensemble de l'orogène de Grenville, parce que la chaîne elle-même (ou la chaîne et quelques ajouts que nous ne connaissons pas) a été scindée.

*Imaginez au-delà de l'orogène, à l'est, une autre de ses parties ainsi qu'un autre continent, celui qui a poussé l'orogène à sa position actuelle. Toutes ces entités accolées s'étendaient loin vers l'est, beaucoup plus loin. De plus, placez quelques-uns des points chauds de la Terre sous la Province de Grenville (qui se poursuivait sur une assez bonne distance vers l'est à ce moment) et vous aboutirez à l'aube d'un **rift**, un grand fossé qui scinde la **croûte** jusqu'à ses racines. C'est ainsi qu'un **océan** s'est formé, il y a environ 600 Ma. Mais selon quel mécanisme?*

Peut-être bien selon un mécanisme semblable à celui que l'on observe aujourd'hui sur le plancher de l'Atlantique. Le long des dorsales médio-océaniques, la croûte est ouverte et du magma s'épanche, ajoutant du nouveau matériel au plancher, lequel matériel s'éloigne de la dorsale par l'action des courants de convection à l'intérieur de la Terre.

Tout cela est bien beau et est peut-être une notion que certains d'entre vous connaissez bien. Ouvrir un océan semble bien assez difficile, mais on peut en dire autant lorsque l'on pense à la rupture d'un continent. Il faudrait que beaucoup de chaleur soit produite par les courants de convection sous la croûte. Et c'est le cas.

Il est probable que ce qui participe à l'accumulation de chaleur sous la croûte continentale est le fait qu'elle est plus épaisse et plus légère que la croûte océanique; ainsi, elle constitue un meilleur isolant ou, en d'autres mots, elle bloque mieux la chaleur qui cherche continuellement à s'échapper de l'intérieur de la Terre, du milieu intra-terrestre (laquelle chaleur va dans l'espace bien sûr).

Beaucoup de magma s'épanche des dorsales médio-océaniques sur le plancher de nos grands

volumes d'eau salée. Mais, en retour, un volume prodigieux de matériel des plaques océaniques est subducté le long des bordures des océans qui se referment. Il est difficile d'avoir une idée de l'énergie nécessaire pour ces transferts massifs de volumes de magma et de croûte refroidie. En des termes simples, on peut dire que ce serait au-delà de la capacité de toutes les centrales énergétiques conventionnelles du monde entier, même si les centrales nucléaires étaient incluses. Mais nous arrivons enfin au mécanisme qui fait que les plaques tectoniques de la Terre se repoussent, entrent en collision, se soulèvent et s'affaissent.

PRODUCTION DE CHALEUR

Une question que les géoscientifiques amateurs posent souvent est la suivante: pourquoi notre planète devient de plus en plus chaude à mesure que l'on s'enfonce dans la croûte, à mesure que l'on descend dans une mine par exemple? Quelle est la source de cette chaleur? C'est l'**énergie atomique**, c'est-à-dire la désintégration des radioéléments (potassium, uranium et autres éléments radiogéniques). Quelqu'un pourrait affirmer, que ça nous plaise ou non, que notre planète est chauffée par l'énergie nucléaire et que c'est cette même énergie qui y maintient la vie. De plus, la chaleur accumulée dans les profondeurs de la Terre (dans le noyau externe composé de fer en fusion par exemple), la chaleur piégée au moment de la formation de notre planète il y a 4,6 milliards d'années, s'échappe lentement par les mécanismes de conduction et de convection dans le manteau et dans la croûte.

La **répartition inégale** de la production de chaleur à l'intérieur de la Terre ainsi que l'accumulation différentielle de chaleur selon le type de croûte génèrent les **courants de convection** qui sont le moteur de la **tectonique des plaques**, le mouvement des plaques crustales à la surface de la Terre (couche externe).

Nos chaînes de montagnes ne sont qu'un sous-produit de la production nucléaire de chaleur par la Terre. Mais comme on dit, c'est bien beau, mais aussi bien difficile à imaginer. C'est peut-être ce qui explique pourquoi les géoscientifiques sont si «spéciaux» (du moins c'est ce qu'ils se plaisent à penser).

Oui, l'énergie nucléaire a aidé à notre séparation du Gondwana. Les scientifiques ont appelé l'étendue d'eau salée en formation à cette époque l'**Océan Iapetus**. Comme nous l'avons déjà mentionné, cela s'est produit il y a environ **600 Ma**. L'Iapetus est devenu très vaste, comme il se doit pour un océan, et a eu ses moments de gloire au cours du **Cambrien** et de l'**Ordovicien**. Mais peu de temps après l'ouverture complète de l'océan, la contraction recommençait; comme vous l'avez deviné, un autre continent convergeait en refermant l'Iapetus et venait s'accoler à ce que l'ouverture de l'océan avait laissé de notre Laurentie.

II.2.2 LES APPALACHES, CES MONTAGNES TOUJOURS AUSSI BELLES

Il en a résulté l'édification des Appalaches, ces belles montagnes; et comme elles ne sont pas encore si vieilles, elles sont toujours au même endroit et nous inspirent par leur beauté. L'Iapetus s'est «refermé» ou s'est «resserré» entre **475 et 275 Ma**, ce qui signifie que ce processus a duré pendant 200 Ma. Comment cela s'est-il fait?

Il a fallu travailler fort; il a fallu une série d'orogènes distinctes (ou d'épisodes d'édification de montagnes) pour en arriver à déloger ce qui était là auparavant en bordure de l'océan et à avoir les deux continents convergents côte à côte.

Les épisodes d'édification de montagnes en question sont les suivants : l'orogène taconienne de l'**Ordovicien** moyen (env. **475 Ma**), l'orogène salinienne du **Silurien** (env. **420 Ma**), l'orogène acadienne du **Dévonien** (env. **380 Ma**) et l'orogène alléghanienne du **Permo-Carbonifère** (env. **280 Ma**). Prenons donc un moment pour associer les âges susmentionnés à l'ère à laquelle ils appartiennent sur notre échelle des temps géologiques.

DIAPOSITIVE 50: Échelle des temps géologiques.

Tous les âges cités dans le paragraphe précédent, à savoir (du plus vieux au plus jeune) l'Ordovicien, le Silurien, le Dévonien, le Carbonifère et le Permien sont des périodes du Paléozoïque. Quant au Paléozoïque, il correspond à la plus vieille ère du

*Phanérozoïque, laquelle division englobe tout ce qui vient après le Précambrien, c'est-à-dire d'il y a 570 Ma jusqu'à aujourd'hui. Au Précambrien, il y a eu formation complète du Bouclier canadien, y compris l'accrétion de l'orogène de Grenville. Les épisodes que nous décrirons dans les lignes qui suivent sont franchement dans le Phanérozoïque et nous n'avons pas fini notre voyage dans le temps puisque, par la suite, nous passerons à l'orogénèse la plus récente, qui a ajouté du matériel à la côte ouest au **Mésozoïque**. Et comme nous le savons depuis le début de toute cette aventure, ce processus se poursuit encore aujourd'hui, au **Quaternaire**, une division du **Cénozoïque**. Et voilà pour l'échelle des temps géologiques, que nous regardons pour une dernière fois avant de visionner à nouveau la diapositive 49.*

DIAPOSITIVE 49: Carte simplifiée des éléments tectoniques de l'Amérique du Nord.

L'orogène des Appalaches du Paléozoïque commence dans la partie sud des États-Unis et remonte, en suivant la côte est de l'Amérique du Nord, jusqu'à Terre-Neuve; de là, il faut sauter l'océan Atlantique (qui date du Mésozoïque) pour voir que le tout se poursuit en Grande-Bretagne et en Scandinavie, où on parle respectivement de la chaîne «calédonienne» et de la chaîne «hercynienne».

DIAPOSITIVE 51: Carte fondamentale des Appalaches à Terre-Neuve sur laquelle apparaissent la zonation tectonostratigraphique, la géologie simplifiée des unités de surface et les trois corridors de sismique-réflexion (lignes noires numérotées) du LITHOPROBE.

Il y a également une section des Appalaches en Afrique de l'Ouest, en l'occurrence la partie orientale manquante de Terre-Neuve, dont les affinités sont africaines. C'est le genre de scénario qu'on obtient quand on se lance dans les reconstitutions à l'échelle planétaire. En passant, la portion centrale de Terre-Neuve a une origine océanique (l'Iapetus, vous vous souvenez?) et le tiers ouest, nord-américaine.

DIAPOSITIVE 52: Dessin de l'interprétation que l'on fait de l'épisode final de collision entre la plaque laurentienne et la plaque gondwanienne.

*Sur ce dessin, il manque la partie océanique au centre, laquelle a été omise afin de mettre l'accent sur l'interprétation de ce qui est arrivé aux constituants des deux plaques continentales là où elles sont entrées en collision. L'hypothèse à la base de la présente interprétation veut que la plaque laurentienne ait été séparée en deux parties (supérieure et inférieure) le long de la discontinuité de Mohorovicic ou du **Moho**.*

Souvenez-vous des **points chauds** qui existent dans les profondeurs sous la croûte ? Les **supercontinents**, la Laurentie dont nous parlons s'étant enfoncée sous une autre masse continentale appelée la **Pangée**, ne sont pas voués à durer éternellement avec les points chauds alimentés par la convection qui dégagent de plus en plus de chaleur sous la couche isolante que forme la croûte continentale.

D'une façon ou d'une autre, la **Pangée** s'est scindée le long des lignes qui maintenant dessinent la dorsale médio-atlantique et ses prolongements décalés vers le nord-est et le nord-ouest. Mais cette fois-ci, la rupture a été différente de celle qui a scindé le supercontinent précédent pour aboutir à la formation de l'Océan Iapetus. Elle est apparue plus à l'est, laissant sur le côté nord-américain de l'Atlantique la majeure partie des Appalaches et même une petite portion du continent venu du sud-est.

L'**Atlantique** s'est ouvert il y a environ 180 à 90 Ma et continue son expansion, l'Amérique du Nord s'éloignant de l'Europe et la rupture du plancher océanique progressant vers le nord.

Les **Appalaches** existent encore aujourd'hui dans toute leur splendeur, leur portion la plus au nord-est étant sur le présent continent, sur l'île de Terre-Neuve; il s'agit probablement de l'endroit où il y a les meilleurs affleurements de cette chaîne de montagnes.

Déplaçons nous maintenant vers l'ouest pour notre dernier arrêt de cette visite d'un continent en entier, le système de la **Cordillère**, l'un des produits les plus récents de la tectonique des plaques. Il ne faut pas oublier que l'Ouest est encore en expansion, comme en témoigne la plaque Juan de Fuca qui plonge sous la plaque nord-américaine. Et quels sont les autres endroits où de la nouvelle croûte se forme ?

Vous avez mis le doigt sur la réponse; c'est là où les volcans font éruption et où des plutons font intrusion, mais aussi le long et au-dessus des zones de subduction.

II.2.3 L'OUEST EN EXPANSION

Des travaux intensifs sur la lithosphère de la partie ouest de la Cordillère nord-américaine sont menés dans le cadre du LITHOPROBE. Il s'agit de la première étude multidisciplinaire complète d'un système montagneux. Le territoire à l'étude va de la bordure est des Rocheuses jusqu'à la zone extracôtière à l'ouest de l'île de Vancouver. Il n'est donc pas surprenant que la portion canadienne de la Cordillère ait été le théâtre de l'élaboration de nombreux nouveaux concepts de tectonique globale.

Une coupe d'une longueur de 1 100 km est présentée sur le rabat de la pochette intitulée *Sonder la lithosphère* et donne un aperçu de ces nouveautés. Il est à noter que la coupe est à l'échelle, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'exagération verticale. Cette coupe constitue une première dans le monde scientifique; en effet, elle incorpore des données tectoniques et structurales qui sont utilisées dans le cadre de recherches menées, d'une part, sur d'autres systèmes montagneux tant de notre continent que d'autres continents et, d'autre part, sur des structures formées récemment mais aussi il y a belle lurette dans les temps géologiques.

Par exemple, les levés géologiques et géophysiques effectués dans la partie sud-ouest du Canada, particulièrement au cours des 25 dernières années, ont permis de déterminer que l'évolution de la lithosphère de la Cordillère a été marquée par divers épisodes: **rifting**, **expansion des fonds océaniques** et **séparation de plaque** (le long de failles transformantes), suivis de **subduction**, de **fermeture d'un bassin océanique** et de **accrétion** (accolement d'éléments divers au continent). Vous n'avez certainement pas oublié tous ces concepts. Nous venons tout juste de décrire les phénomènes de rifting et d'expansion des fonds océaniques dans la section sur l'Iapetus et l'Atlantique. Quant à la séparation de plaque, il s'agit d'un concept un peu nébuleux; en effet, le mécanisme peut donner lieu à plus qu'une simple séparation par rifting et inclure des mouvements d'une plaque par rapport à une autre **le long (selon l'orientation)** de l'élément

structural à l'origine de la rupture, en général une très grande faille. À titre d'exemple, on peut citer la faille de Reine-Charlotte immédiatement à l'ouest des îles du même nom, l'équivalent canadien de la faille de San Andreas. La subduction, comme celle qui fait que la plaque océanique Juan de Fuca glisse sous l'île de Vancouver, est un concept que vous connaissez déjà. Il ne reste que la fermeture d'un bassin océanique, un terme assez explicite, et l'accrétion que nous aborderons dans le paragraphe qui suit.

Le concept d'**accrétion de blocs crustaux (terrane)** venant de loin, dont notamment de fragments de plaques, d'arcs insulaires ou de microcontinents, a été élaboré en partie en étudiant la Cordillère canadienne. On l'utilise maintenant pour l'interprétation de liens géologiques établis dans plusieurs autres orogènes du monde.

Encore une fois, n'ayons pas peur des mots; l'essentiel de ce que les géoscientifiques font, c'est de décrire les choses et les événements. Lorsque vous mettez deux pâtés de boue côte à côte, il s'agit d'une accrétion. Selon la pression que vous mettez et ce que subissent les deux pâtés par la suite, il se peut qu'ils se soudent. Il peut donc y avoir accrétion d'arcs insulaires. Pensez aux Aléoutiennes, aux îles indonésiennes et aux Philippines; ou encore, dans un contexte très différent, aux îles hawaïennes. Vous pourriez argumenter qu'il s'agit d'un terme vague, bien que descriptif. Mais qu'avons-nous d'autre qui puisse s'accréter? Ah oui! Des microcontinents, c'est-à-dire de petites plaques continentales, dont nous avons déjà parlé amplement.

Mélangions donc tous ces éléments et préparons un «cocktail tectonique» à l'image du monde réel.

DIAPOSITIVE 53: Carte de la portion canadienne de la Cordillère nord-américaine, sur laquelle on peut voir la mosaïque des terranes accrétés.

Ne nous prononçons pas trop vite sur la présente diapositive. Tout y est tellement plus clair que de la boue. Voyez comme ces différents figurés et ces diverses couleurs (qui représentent chacun des terranes accrétés) rendent le tout d'une certaine clarté. Les spécialistes de la géologie et de la géophysique

ont d'habitude comme point de départ une espèce de bouillie et ils s'efforcent de tout démêler selon divers critères : les types de roches, leur position, leur âge, etc. Dans tous les cas, il en résulte une carte descriptive de ce qui, vraisemblablement, était une mosaïque désordonnée. La nature est ainsi faite. Mais d'un autre côté, pensez par exemple à l'ordre qui semble exister dans la distribution des grains de sable d'une plage. La présente mosaïque suit ou semble se conformer à un certain arrangement. Il ne faut qu'éclaircir le pourquoi et le comment de ce que nous observons.

Mais ce qui importe ici, c'est l'image globale, les couleurs, les limites. La grande surface rouge foncé représente le craton nord-américain sur lequel les Rocheuses, en rouge pâle (en provenance de l'ouest), ont été édifiées par la tectonique des plaques. La limite entre ces deux couleurs correspond à la bordure orientale du plan de la faille de chevauchement qui a servi de surface de glissement à la partie externe des montagnes, lesquelles ont été transportées sur le craton stable. (Et il y a d'autres plans de faille de ce genre plus à l'arrière et dans l'ensemble des Rocheuses, qui font en sorte que les montagnes consistent en un empilement d'écaillés imbriquées, composées de différents types de roches aux âges variables.) Sur la carte, il y a aussi du blanc et du vert pâle. Le blanc correspond à du territoire terrestre; le vert, à des îles et à une partie de la bordure est de la Colombie-Britannique. Ce sont deux **terrane**s **composites**, soit respectivement le **superterrane intermontagneux** et le **superterrane insulaire**. Nous revenons à nos pâtés avec l'adjectif «**composite**» qui, dans le cas présent, implique que ces terranes comprennent du matériel accréte provenant de sources non loin de la côte ouest mais aussi, vraisemblablement, d'origine beaucoup plus lointaine, le matériel ayant été formé sur la croûte océanique et transporté jusqu'à s'accoler à la côte ouest.

Allons y donc d'une définition plus détaillée de notre carte. Le vieux craton précambrien tout comme les Rocheuses sont des cas évidents. Quant aux portions les plus à l'ouest, celle non colorée et celle en vert pâle, elles sont constituées d'un assemblage de terranes accrétes. Les scientifiques et leur esprit curieux (qui doivent sûrement bien se débrouiller au cube Rubik) ont réussi à

identifier quels terranes accrétes ont été formés non loin de la côte ouest et les ont marqués d'une étoile. Par souci de clarté, les étoiles n'apparaissent que dans la légende.

Notre continent a donc grossi et progressé vers l'ouest par accréte de nouveaux terranes venant de proche et de loin. Mais il y a aussi eu (et il y a encore), comme il se doit, de l'érosion et de la sédimentation, ainsi que du volcanisme. Des sédiments, transportés principalement par les rivières, ont ainsi été ajoutés à mesure qu'ils atteignaient le rivage et ont ainsi été pris en serre entre le continent et l'un ou l'autre des terranes qui venaient s'accréter. La prochaine fois que vous passez en avion au-dessus du delta du Fraser, n'oubliez pas d'y jeter un coup d'oeil.

Les chercheurs ont évalué que, depuis le Précambrien, le continent s'est élargi de quelque 500 km, ce qui signifie une journée de plus de route pour les gens qui vivent dans les terres lorsqu'ils se rendent sur les plages de l'océan au cours de leurs vacances annuelles d'été. Ce processus s'est fait au rythme d'un peu moins de 1 km par million d'années. Il n'a cependant pas été uniforme et régulier, mais plutôt ponctué de périodes plus actives et plus calmes. La majeure partie de l'accréte est associée à l'intervalle compris entre **180 Ma** et **58 Ma**, c'est-à-dire entre le **Jurassique** et le **Tertiaire précoce**. Cette période de temps fait partie du Mésozoïque qui, du plus vieil âge au plus jeune, englobe le Trias, le Jurassique et le Tertiaire. Il ne faut pas oublier que le processus d'**accréte**, et le phénomène de **subduction** de plaque océanique active qui le sous-tend, se poursuivent encore aujourd'hui.

En effet, une caractéristique importante de la Cordillère est que son évolution est la même **aujourd'hui** que ce qu'elle a été au cours des derniers **200 Ma**; ainsi, il en ressort un «modèle actualisé» (donnez-nous une médaille pour ce beau terme tellement scientifique) ou, en d'autres mots, un modèle qui peut s'appliquer directement tant aux processus et aux déformations anciennes qu'actuelles.

Les limites du secteur d'étude ou du transect du LITHOPROBE dans cette région sont identifiées sur la carte. Le transect en question est celui de la Cordillère méridionale (SC); il constitue une chance unique d'étudier les **processus** à l'origine de la **croissance** vers

*l'ouest du continent, les phénomènes qui ont joué un rôle sur la **croûte** et la **lithosphère** avant l'accrétion des **terrane**s ainsi que les mécanismes qui ont été déterminants dans la **modification** subséquente de la Cordillère. Justement, cette modification sous-entend un ou plusieurs autre(s) processus, dont notamment l'«**extension**» lithosphérique observée dans le superterran intermontagneux (point qui, ultérieurement, sera traité plus en détail).*

Le principal cheval de bataille des travaux du LITHOPROBE dans la Cordillère méridionale est de réussir à **intégrer** l'ensemble des diverses **disciplines** des sciences de la Terre et leurs **méthodes**, de façon à ce que chacune fasse progresser l'autre et qu'il y ait une contrevérification mutuelle. L'approche **multidisciplinaire** du LITHOPROBE, garante de l'intégration, fait appel à la **sismique-réflexion**, à la **sismique-réfraction** et aux **levés électromagnétiques**, pour en arriver à reconstituer la **structure de la croûte et de la lithosphère** dans les grandes profondeurs. Ces travaux en **subsurface** sont menés de front avec ceux en **surface**, ces derniers permettant de mieux comprendre le **contexte géologique** et la **géochimie** des roches superficielles et d'établir le **paléomagnétisme**. Il reste le **champ de la pesanteur** et le **champ magnétique** qui font l'objet de levés aéroportés au-dessus de la région. Nous décrirons sous peu toutes ces méthodes. Ainsi, l'intégration de toute l'information recueillie nous aide à reconstituer la **croissance** vers l'ouest de notre continent, les mécanismes à son origine et la succession des **événements**. Ces connaissances peuvent par la suite être appliquées à d'autres régions.

DIAPOSITIVE 54: Subduction de la plaque océanique Juan de Fuca sous l'île de Vancouver.

Les travaux du LITHOPROBE dans la Cordillère méridionale ont débuté en 1984 avec la phase I du projet. Il en a ressorti des images sismiques et électromagnétiques de la plaque océanique Juan de Fuca qui s'enfonce sous l'île de Vancouver, mais aussi des portions sus-jacentes des plaques qui ont été ajoutées à la mosaïque de fragments lithosphériques accrétés de l'Ouest du Canada.

La présente diapositive fait de plus état de plus récentes découvertes. L'interprétation de la première coupe crustale établie à l'aide des

données de la phase I, qui recoupe l'île de Vancouver, indique l'existence d'**érosion tectonique** et de **sous-charriage** de subduction. Le premier processus est l'arrachement d'une partie de la vieille croûte inférieure qui est **recyclée** dans le **manteau**; le second, le sous-plaquage par subduction de roches nouvellement formées et plus jeunes, au niveau de la partie inférieure du continent. Ces deux **processus** importants méritent donc considération dans l'élaboration des **modèles** reconstituant l'évolution et la croissance des continents.

Les travaux de recherche, menés sur une base continue, ont fait ressortir des aspects importants de la Cordillère; la plupart d'entre eux sont résumés dans la grande coupe sur le rabat de notre pochette, laquelle représente la croûte sur 1 100 km, des plaines de l'Alberta à l'est en allant vers l'ouest jusqu'à la dorsale Juan de Fuca, à 200 km au large de l'île de Vancouver.

Les lignes qui suivent présentent brièvement quelques-unes des découvertes:

- ◆ Des **microcontinents** en provenance de l'ouest ont embouti notre continent et ont poussé d'épaisses séquences de roches (dont l'âge peut atteindre **600 Ma**) sur des distances de plusieurs centaines de kilomètres vers l'est, sur la marge occidentale du **socle albertain** (le craton nord-américain); il en a résulté les Rocheuses. Ainsi, dans l'Ouest, il n'y a pas eu de collision titanesque entre deux continents immenses, comme nous l'avons expliqué dans le cas de l'orogène de Grenville. Ces faits démontrent cependant à quel point ces processus de poussée peuvent être efficaces, même quand il s'agit de microcontinents.
- ◆ Ainsi, il y a eu une longue période de temps pendant laquelle des unités de roches, dont les très vieilles séquences sédimentaires qui affleurent dans les Rocheuses aujourd'hui, étaient transportées sur la partie ouest du socle albertain. Mais jusqu'où est allé ce processus? Peut-être très loin parce qu'il y a des indications comme de quoi certains plans de failles le long desquels a eu lieu ce processus s'observent au

niveau du fleuve Fraser. La coupe montre le socle (blanc tacheté de rouge) qui s'amincit et s'observe presque aussi loin que la faille du Fraser, mais aussi les roches sédimentaires et les autres lithologies sus-jacentes de l'Amérique du Nord pré-accrétionnaire, déformées et métamorphisées, qui se poursuivent jusqu'à la hauteur de la faille du Fraser.

- ◆ Les épisodes de collision et d'accrétion de terranes exotiques du Mésozoïque à la zone centrale de la Colombie-Britannique et à la chaîne Côtière remontent à une période comprise entre **180 et 58 Ma**, comme nous l'avons déjà mentionné.
- ◆ Par la suite, la convergence a été interrompue. Imaginez relâcher la pression latérale qui s'exerçait sur une structure aussi grande et lourde que des montagnes nouvellement édifiées, et vous comprendrez qu'il a fallu qu'il y ait des ajustements pour atteindre un nouvel équilibre. Ainsi, la **compression** a cédé le pas à la **tension** et de grandes structures ont été en partie défaites. Par exemple, des arches de compression ont été «**décoiffées**», c'est-à-dire qu'elles ont perdu une partie de leur toit par le glissement vers le bas de couches et de blocs.

DIAPOSITIVE 55: Partie centrale d'une coupe régionale de la Cordillère méridionale.

- ◆ Les arches en question sont les «**antiformes**» figurés sur la présente coupe, en l'occurrence ceux de Nicola et de Vernon. Ces structures de subsurface sont assez grandes, pouvant mesurer jusqu'à 25 km verticalement et 100 km horizontalement.
- ◆ Un peu partout, de grandes failles de décrochement (comme celle de San Andreas en Californie) ont découpé la croûte et transporté de ses morceaux vers le nord, aussi loin qu'en Alaska. La plus récente faille de ce type est celle de Reine-Charlotte dont nous avons déjà parlé; cependant, d'autres plus anciennes ont mis en morceaux la majeure partie de la Colombie-Britannique et le Yukon, ce qui fait

ressortir la bande d'orientation nord-sud que forme la Cordillère comme nous l'avons constaté sur la diapositive 53.

La grande coupe sur le rabat de la pochette recoupe la bande de montagnes mais se poursuit aussi vers l'ouest; ainsi, elle traverse la zone de subduction et se rend jusqu'à la dorsale Juan de Fuca. Au niveau de cette fosse linéaire, l'épanchement sous-marin de magma basaltique poursuit le processus de création de lithosphère nouvelle, qui vient ajouter du matériel, d'une part, à la plaque Pacifique (vers l'ouest) et, d'autre part, à la plaque Juan de Fuca (vers l'est). Voici d'autres découvertes qui ont été faites dans le cadre du LITHOPROBE :

- ◆ La coupe susmentionnée est en quelque sorte un voyage de découverte qui part de l'Alberta et se termine à l'ouest de l'île de Vancouver; elle explore les profondeurs sur une distance de 1 100 km, recoupant des roches et des formations empilées, tordues, charriées, remaniées et refondues.
- ◆ La limite du **Bouclier canadien** (blanc tacheté de rouge), notre craton précambrien, n'est pas le **socle albertain**, puisque ce dernier se poursuit immédiatement sous les montagnes et vers l'ouest, du moins jusqu'à la hauteur du lac Okanagan.
- ◆ Dans le centre de la Colombie-Britannique, entre le lac Kootenay et le fleuve Fraser, des structures à la dimension verticale très importante s'observent sous la surface. Elles se présentent sous la forme d'une série d'arches souterraines de très grandes dimensions, d'une hauteur pouvant atteindre 25 km. Le mont Everest pourrait facilement y passer.
- ◆ Les spécialistes de la géophysique divisent notre lithosphère en deux parties: l'une supérieure et l'autre inférieure, correspondant respectivement à la croûte et au manteau. Sur la coupe, le manteau continental est fuchsia et le manteau océanique, gris. Ces deux entités, caractérisées par des vitesses sismiques différentes, sont séparées par la **discontinuité de Mohorovicic** ou le

Moho. Voyez comme le Moho est uniforme. Étant donné que la topographie de surface varie beaucoup entre les Rocheuses et le détroit de Georgie, il est normal de penser que la base de la croûte, le Moho, présentera quelques irrégularités. Mais ce n'est pas le cas.

La discontinuité est remarquablement lisse. Cette **découverte** est **fondamentale** et signifie que les chaînes de montagnes résultant de collisions se sont formées **au-dessus de cette surface lisse**, un peu comme un tapis se plisse quand on le pousse sur un plancher uniforme.

- ◆ Le tout s'explique par le fait que les roches sous le **Moho** possèdent des propriétés différentes des unités sus-jacentes; elles sont entre autres plus denses et plus résistantes. Il ne reste qu'à essayer d'imaginer les forces à l'origine du plissement au-dessus du Moho, c'est-à-dire qui ont pu soulever les Rocheuses.
- ◆ Sur la côte ouest, nos levés sismiques ont permis d'identifier une structure géologique complexe sous la **chaîne Côtière**. Il s'agit d'un ensemble entremêlé constitué d'écaillles rocheuses qui ont été imbriquées et coincées quand les plaques océaniques et continentales sont entrées en collision. Il y a de plus eu la montée de magma par l'effet de la chaleur produite tant par la friction que par d'autres mécanismes, à l'origine de toutes les masses de granite de la chaîne Côtière et, bien sûr, des volcans comme le mont Garibaldi.
- ◆ Ainsi, sous l'île de Vancouver et dans la zone extracôtière, le processus de **collision** se poursuit. Nos téléimages nous ont permis de «voir» comment la lithosphère de la plaque Juan de Fuca, qui se déplace vers l'est, est **subductée** sous la plaque nord-américaine, qui elle bouge vers l'ouest. Nous avons réussi à suivre la plaque subductée jusqu'à une profondeur de 70 km sous la zone continentale du côté est du détroit de Georgie. L'analyse chimique des roches volcaniques nous a également appris

que celles-ci dérivent de la plaque subductée, qui devient magma à des profondeurs de 100 km et plus.

Et voilà où nous en sommes. Ces quelques lignes complètent notre voyage à la découverte du continent et de son évolution, qui nous a fait aller jusqu'à ses racines et revenir en arrière dans le temps jusqu'à ses premiers balbutiements. Il ne nous a fallu que quelques heures pour passer en revue l'évolution s'échelonnant sur plus de quatre milliards d'années de notre continent.

III. LES TRAVAUX MULTIDISCIPLINAIRES DU LITHOPROBE : EN QUOI CONSISTENT-ILS?

III.1 LEVÉS DE SISMIQUE-RÉFLEXION

La **sismique-réflexion** domine largement les travaux du LITHOPROBE parce qu'il s'agit de la méthode géophysique qui permet de déterminer avec le plus de précision les limites entre les unités rocheuses et d'obtenir les meilleures images des structures en subsurface. Ce type de levé est le plus utilisé par les intervenants de l'**industrie pétrolière** en vue d'identifier les pièges d'hydrocarbures, les endroits où le pétrole et le gaz se concentrent à l'intérieur des bassins **sédimentaires**. Nous n'avons pas le temps ici de passer en revue les techniques d'exploration pétrolière et gazière, bien que ce soit un autre sujet fascinant.

L'application de la sismique-réflexion à l'**exploration de la croûte profonde** a débuté dans les années soixante, mais ce n'est que depuis les années soixante-dix qu'elle en est devenue le principal outil.

DIAPOSITIVE 56: Illustration de la sismique-réflexion montrant la source des ondes sonores (vibrosismique) et l'arrangement des géophones.

Dans sa forme la plus simple, la sismique-réflexion est une méthode fonctionnant par écho comme le sonar. En effet, ce sont des ondes sonores qui, réfléchies à l'interface entre différents types de matériaux reviennent vers la surface; dans le cas du sonar, c'est entre l'eau et les sédiments du fond et, dans celui des études de la croûte, entre les unités rocheuses. Les données obtenues sont présentées sous une

forme similaire aux **coupes** géologiques et font l'objet d'une interprétation qui est justement **géologique**. Voilà entre autres pourquoi les géoscientifiques doivent travailler main dans la main, afin de fournir des interprétations complètes; et c'est de cette façon que les choses sont faites dans le cadre du LITHOPROBE.

L'application de la sismique-réflexion est extrêmement complexe; elle demande de faire appel à une équipe d'acquisition des données des plus qualifiées, sans oublier les millions de dollars d'**équipement** nécessaire, qu'il s'agisse d'un levé **sur terre** ou **en mer**. Comme dans l'industrie pétrolière, cette étape du LITHOPROBE est donnée à contrat à des compagnies spécialisées dans ce domaine.

Sur terre, les scientifiques du LITHOPROBE utilisent des **vibrateurs** mécaniques géants montés sur des camions pour créer les ondes sources (vibrosismique); cet équipement est le plus approprié et le plus sûr pour l'environnement dans les zones de roches dures où nous avons effectué des levés. Pour arriver à obtenir des images des unités sous la croûte, il n'a fallu utiliser la dynamite qu'une seule fois dans le cadre de travaux reliés à un transect; il se peut qu'on y fasse encore appel, tout comme c'est le cas parfois dans l'industrie. À toutes les fois cependant, l'ensemble des lois sur l'environnement sont respectées sans passe-droits et tous les permis nécessaires sont obtenus.

De nos jours, un levé régional typique compte 480 groupes de 9 à 12 **géophones**, les groupes étant espacés de 25 m les uns des autres sur une distance de plus de 12 km afin de capter les ondes envoyées par les unités de vibrosismique qui remontent à la surface. Les données captées par les géophones sont **enregistrées** sur un système informatique installé dans un camion.

De plus, des levés haute résolution ont été entrepris en collaboration avec l'industrie et des organismes des gouvernements des provinces. Ces levés très détaillés visent des cibles de la partie sommitale de la croûte, donc à des profondeurs auxquelles on peut envisager l'exploitation. Ils ont ainsi souvent pour objectif de déterminer le contexte géologique de corps minéralisés. Le détail est obtenu en diminuant la distance entre les 480 groupes de géophones, qui chute à une valeur comprise

entre 5 m et 10 m sur une distance de 2 km à 5 km.

DIAPOSITIVE 57: Équipe de levé au travail en Ontario (vibrosismique). En avant-plan, on voit quatre camions vibrateurs (source des ondes sonores) et, en arrière-plan, deux autres servant à l'enregistrement des données.

Ces gros camions travaillent à l'unisson. Chacun d'eux est soulevé sur une plaque vibratoire qui envoie des signaux sismiques choisis dans le sol; les ondes sont retournées par des réflecteurs des profondeurs et détectées par des géophones enfouis dans le sol ou à sa surface. À leur tour, les géophones font parvenir cette information à des amplificateurs puis à des ordinateurs qui enregistrent et stockent les données. Un journaliste à la télévision a qualifié ces gros camions d'«éléphants dansants».

Voici une photo de l'un d'entre eux.

DIAPOSITIVE 58: Camion vibrateur en action. Il est à noter que les roues ne touchent pas le sol et que tout le poids du véhicule est concentré sur la plaque vibratoire.

DIAPOSITIVE 59: Schéma d'un levé de sismique-réflexion en mer, avec coupe représentative à l'appui.

En mer, ce sont de grands réseaux de **canons à air** (sources mécaniques qui éjectent rapidement de l'air comprimé) qui produisent les **ondes sonores**. Ces dernières, à leur retour, sont détectées par une série d'**hydrophones**, lesquels font partie de la «**flûte**» multicanal (240 canaux) remorquée derrière le bateau, qui mesure généralement 3,5 km de longueur et environ 10 cm de diamètre. L'information recueillie par les capteurs et d'autres données essentielles sont enregistrées par un système informatique à bord du bateau.

Un **traitement informatique** sophistiqué des grandes quantités de données recueillies est nécessaire avant que l'on puisse obtenir les meilleures images possibles des structures géologiques en subsurface. La première étape de ce traitement se fait encore une fois par des entreprises spécialisées qui, après réponse à des appels d'offres selon des spécifications établies

par les sismologues du LITHOPROBE, décrochent les contrats.

Et ce n'est qu'après cette étape que les spécialistes se mettent vraiment au travail. Leur tâche est complexe; elle consiste en un «ajustement» très sophistiqué des **paramètres de traitement** et en une «manipulation» extrêmement soignée de plusieurs aspects du grand volume de données de sismique-réflexion. Ce travail minutieux intervient à différentes phases du traitement et peut faire en sorte que beaucoup plus d'information géologique et d'autre nature soit soutirée des données. La deuxième étape du traitement est un travail sur les aspects manipulés à la première étape; elle consiste en un **retraitement sélectif**.

Les personnes qui participent à l'étape décrite dans le paragraphe précédent proviennent principalement de la **LITHOPROBE Seismic Processing Facility** de l'Université de Calgary, des **Seismic Research Nodes** (établis dans neuf universités d'un bout à l'autre du pays), mais aussi de la **Commission géologique du Canada** à Ottawa, où il existe d'importantes installations, et de ses bureaux de la côte est et de la côte ouest, où les installations sont plus modestes.

DIAPOSITIVE 60: Scientifiques au travail à la LITHOPROBE Seismic Processing Facility.

Cette scientifique est en train d'interpréter des données sismiques en compagnie du directeur de la **LITHOPROBE Seismic Processing Facility**.

DIAPOSITIVE 61: Directeur du LITHOPROBE participant à un échange d'idées sur une coupe sismique avec des collègues de l'Université de la Colombie-Britannique.

Les équipes géoscientifiques du LITHOPROBE sont multidisciplinaires et mènent leur recherche en étroite collaboration; les gens qui y travaillent échangent continuellement leurs idées, tant à l'intérieur de petits que de grands groupes.

III.2 LEVÉS DE SISMIQUE-RÉFRACTION ET DE RÉFLEXION À GRAND ANGLE

Les levés de **sismique-réfraction** et de **réflexion à grand angle** sont un complément aux levés de réflexion profonde; ils sont essentiels. Au contraire des levés de sismique-réflexion où on enregistre des ondes réfléchies qui sont presque verticales, le présent type de levés repose sur le temps d'arrivée et les amplitudes des **ondes réfractées à travers les couches de la croûte** et **réfléchies à des angles obliques** aux interfaces des couches. Les **ondes sonores** générées par d'importantes sources explosives (200 kg à 3 000 kg) sont de forme **arquée** et se propagent essentiellement selon une trajectoire **horizontale** dans le cas des **réfractions** et **oblique** dans celui des **réflexions à grand angle**; l'enregistrement se fait à des distances variant de **quelques kilomètres à plusieurs centaines de kilomètres** du point d'émission.

DIAPOSITIVE 62: Schéma de la méthode de sismique-réfraction.

Les levés de sismique-réfraction et de réflexion à grand angle ont pour objectif d'obtenir de l'information sur la vitesse de propagation des ondes et la structure en profondeur, selon une résolution de l'ordre du kilomètre plutôt que de l'ordre de la centaine de mètres. Ils nous renseignent sur la **vitesse de propagation du son** dans les couches individuelles. Parce que les distances sont plus grandes en sismique-réfraction, cette méthode permet d'en arriver à une **vue d'ensemble ou un tableau régional**; quant à la sismique-réflexion, elle explore plus en détail dans des secteurs moins grands. Plus précisément, voici ce que les données de réflexion peuvent nous fournir :

- ◆ Une **évaluation quantitative** de la variation de la **vitesse** selon la profondeur, dont notamment des gradients de vitesse. Cette information est essentielle, d'une part, pour transformer les coupes tracées à l'aide des données de sismique-réflexion, qui sont graduées en unités de **temps**, à des coupes qui le sont en unités de **profondeur**. Pour ce faire, il faut connaître la vitesse de propagation du son dans les différentes couches qu'a traversé l'onde émise à la source. D'autre part, elle sert à déterminer la **composition** et l'**état de la croûte**.

- ◆ *La possibilité de cartographier des structures dans lesquelles la **vitesse de propagation varie latéralement**, sur de grandes régions et sans que cela ne coûte trop cher. Tout particulièrement, les données de haute résolution obtenues le long d'un profil bidimensionnel de réflexion peuvent être **extrapolées** d'un côté ou de l'autre de la trace du profil pour obtenir une véritable **image tridimensionnelle** de la section de croûte.*
- ◆ *La possibilité de cartographier la **topographie des principales discontinuités de vitesse** comme celles que l'on observe souvent dans la croûte et à sa base, en l'occurrence la **discontinuité de Mohorovicic** ou le **Moho**.*
- ◆ *Des lois de vitesse pour avoir un meilleur contrôle sur les routines de sommation et de migration lors des phases de **traitement des données** de réflexion, plus précisément au moment de l'**ajustement** précédant le **retraitement**.*

Les scientifiques du LITHOPROBE ont besoin d'**instruments** très spécialisés et, pour cette raison, ont été des **innovateurs** dans la mise au point de certains d'entre eux. Il en est de même des **méthodes d'interprétation** qui permettent la conversion de grands ensembles de données en des «modèles de vitesse» de la lithosphère. Voici deux diapositives montrant des instruments conçus spécifiquement pour effectuer une tâche. C'est décevant tellement ils ont l'air simples; mais n'ayez crainte, ce n'est pas le cas. Ils sont de plus très solides en vue d'une utilisation très intensive sur le terrain.

DIAPOSITIVE 63: Installation d'un instrument de sismique-réfraction (cylindre) et d'un sismographe dans le cadre d'un levé de terrain.

DIAPOSITIVE 64: Instrument de sismique-réfraction (portatif) et unité de terrain utilisée pour ajuster tous les paramètres d'enregistrement, récupérer les données en mémoire dans les sismographes, mais aussi analyser et visualiser les données de terrain. Une unité de terrain comprend généralement un ordinateur portatif, une imprimante et une

horloge mise à l'heure à l'aide des satellites; chacune peut être utilisée pour contrôler jusqu'à 30 instruments de sismique-réfraction.

Les levés de réfraction sont généralement à grand déploiement, comprenant de nombreux instruments et plusieurs personnes pour les faire fonctionner. Par exemple, pendant le levé de réfraction de 1993 dans la région de l'orogène trans-hudsonien, il a fallu installer 525 sismographes portatifs sur une distance totale de plus de 2 000 km (le long de trois lignes), dans le but d'enregistrer les ondes de plus de 40 tirs séparés; l'équipe de travail comptait 55 personnes qui utilisaient 30 camions, 2 hélicoptères et des wagons de chemin de fer.

III.3 LEVÉS GRAVIMÉTRIQUES ET MAGNÉTIQUES

Souvenez-vous comment les géoscientifiques utilisent les données **gravimétriques** pour établir des cartes qui peuvent en dire beaucoup sur les structures du sous-sol?

DIAPOSITIVE 65: Méthode gravimétrique d'exploration.

L'**intensité** du champ de la **pesanteur** à la surface de notre planète dépend de la **forme** et de la **rotation** de la Terre (**latitude**), de la distance d'un point par rapport au **centre** de la Terre (**latitude et altitude**) et des **variations de densité** des **roches** en subsurface. Les mesures de la **variation** spatiale de la pesanteur (d'un point à un autre) ainsi que la connaissance de la forme de la Terre et de la position exacte de l'instrument (pour effectuer des corrections de latitude et d'altitude) sont les informations essentielles qui peuvent permettre de **calculer** la répartition de la **densité** dans la lithosphère. Les interprétations de ces répartitions conjuguées à celles des données de sismique-réfraction et de sismique-réflexion constituent un outil puissant d'exploration; en effet, il y a une bonne correspondance entre la densité et la vitesse sismique des roches, ce qui permet d'obtenir des modèles selon l'une et l'autre méthode et de les vérifier mutuellement.

DIAPOSITIVE 66: Données de gravité mettant en relief les variations de densité dans la croûte.

Carte gravimétrique de la partie sud-ouest de la Colombie-Britannique et de la région extracôtière. Le rouge correspond aux valeurs élevées de pesanteur; le jaune, aux valeurs moyennes; le bleu, aux valeurs faibles. Voyez le contour de l'île de Vancouver qui ressort?

Des données gravimétriques de reconnaissance (espacement des stations de l'ordre de 6 à 8 km) sont disponibles pour la presque totalité du Canada; elles constituent la Base nationale de données gravimétriques de la Commission géologique du Canada (CGC). Les scientifiques du LITHOPROBE et d'autres chercheurs utilisent intensivement cette base de données, mais l'information ne s'avère pas adéquate pour la modélisation de détail. Dans le cadre du LITHOPROBE, il faut que les levés de sismique-réflexion se conforment aux spécifications de ceux de gravité, ce qui comprend la détermination de valeurs absolues à l'aide de SPG (systèmes de positionnement global). Dans ces conditions, il est possible de faire des levés gravimétriques le long des lignes sismiques avec un espacement des stations d'environ 1 km. Cela est maintenant chose courante le long des lignes de sismique-réflexion du LITHOPROBE, sans oublier que des mesures supplémentaires sont faites lorsque nécessaire ou possible. Les profils gravimétriques obtenus peuvent ainsi être interprétés en parallèle avec les données de réflexion.

DIAPOSITIVE 67: Méthode magnétique d'exploration.

Le **champ magnétique** mesuré à la surface ou au-dessus de la surface de la Terre dépend de la **magnétisation** et de la **teneur en fer** des roches dans la croûte. Les **anomalies magnétiques**, qui sont les données obtenues après soustraction des variations temporelles et du champ régional à grande échelle, peuvent être un outil d'interprétation puissant pour établir la **géométrie** et la **nature** des formations rocheuses en **subsurface**. Des données recueillies dans le cadre de **levés magnétiques aéroportés** et **en mer** ont été intégrées à la Base nationale de données magnétiques, compilée et gérée par la CGC. La majeure partie du Canada, mais pas tout son territoire, a fait l'objet de levés de ce type. Une entente entre la CGC, le LITHOPROBE et l'industrie a permis de combler un grand trou dans la base de données offerte au public dans les parties

centre et sud de l'Alberta; les levés ont été effectués dans le cadre du programme scientifique rattaché au transect du socle albertain.

Les **levés aéromagnétiques** ont été un **outil d'exploration** de premier ordre dans la presque totalité du Canada; ils sont d'une importance capitale puisqu'ils fournissent des **cartes** à partir desquelles il est possible d'établir la géologie lorsqu'il n'y a pas d'affleurements. Sur les cartes aéromagnétiques aux couleurs correspondant aux diverses intensités du champ, la **texture géologique** de toute région ressort en un coup d'oeil et les **discontinuités** majeures sont facilement identifiables.

DIAPOSITIVE 68: Carte aéromagnétique de la zone structurale de Kapuskasing.

Vous souvenez-vous de la diapositive 43 qui représentait la même région? Il y a cependant une différence puisque, ici, la source lumineuse simulée est orientée de façon à mettre en évidence les éléments d'orientation nord-sud. Ainsi, les structures linéaires qui ressortent correspondent à un essaim de dykes (voir le glossaire).

Les nouvelles percées technologiques en informatique, particulièrement la venue des stations de travail interactives et des écrans couleurs, ont facilité et amélioré l'utilisation des deux types de données de champs de potentiel. Le projet LITHOPROBE tire profit de ces percées, comme en témoignent les travaux récents dans la zone structurale de Kapuskasing (voir la diapositive 68), où certaines structures géologiques ont été mieux définies et d'autres prolongées au-delà de leur position sur la carte par le traitement des cartes gravimétriques et magnétiques. Sur le territoire couvert par le transect de l'Est du Canada du LITHOPROBE, il a été possible de prolonger des structures géologiques caractéristiques de Terre-Neuve jusqu'en Nouvelle-Écosse et jusqu'au Nouveau-Brunswick (après avoir traversé le Saint-Laurent), sur considération d'une analyse de données magnétiques recueillies dans le cadre de levés marins et aéroportés.

III.4 MÉTHODE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

DIAPOSITIVE 69: Les données électromagnétiques mettent en évidence les

couches en subsurface qui sont conductrices (jaune) et résistantes (vert).

La présente diapositive montre la répartition régionale de la résistivité (inverse de la conductivité) dans la partie sud de la Colombie-Britannique. La résistivité (ρ) s'exprime en Ωm (unité représentée par les couleurs). Les triangles pleins sur le dessus de la coupe correspond à la position des stations de mesure. Il est à noter qu'il y a une exagération verticale de 5:1.

Les scientifiques aiment contrevérifier leur travail et, généralement, essaient de le faire à l'aide de méthodes différentes de celle qui les a conduit à leurs conclusions. Pour illustrer ce fait, citons le cas d'un chimiste qui peut faire appel à une analyse chimique pour identifier un échantillon d'or pur par exemple. Eh bien ! Un physicien peut arriver au même résultat par une mesure précise du volume de l'échantillon et de son poids spécifique (selon le principe d'Archimède qui nous a été enseigné dans notre jeune temps, dans les cours de physique).

Ainsi, les scientifiques du LITHOPROBE qui étudient la croûte terrestre à l'aide des ondes sismiques et de leurs réflexions à l'interface des différentes couches vérifient leurs conclusions par des mesures tout à fait différentes. Les données gravimétriques peuvent servir à cette fin, mais le problème réside dans le fait qu'elles dépendent d'une propriété physique des roches, plus précisément de leur densité, qui modifie leur réponse sismique.

Les géophysiciens se tournent donc vers la méthode **électromagnétique (EM)** qui permet de reconstituer la structure en subsurface à partir de la **conductivité électrique** (ou son inverse, la **résistivité électrique**) des roches, une propriété physique **indépendante** des autres qui sont mesurées en sismique et en gravimétrie.

Pour la plupart, nous avons pu découvrir la conductivité électrique lorsque nous avons par mégarde pris le courant. Et nous savons que le choc est beaucoup plus important si, par malchance, nous touchons directement les fils et que nos mains sont mouillées ou que nous tenons une serviette humide. Ne faites surtout pas cette expérience et croyez-nous, le choc serait encore plus fort si le liquide sur nos mains était salé. Et si une personne cherchait à

nous aider et nous prenait la main à ce moment, elle deviendrait elle aussi conductrice. Il vaut donc mieux, dans ces circonstances, couper le courant que de tendre la main. C'est là une illustration de l'efficacité de la conductivité électrique.

De plus, la **conductivité électrique** varie beaucoup avec la **composition**, la **texture** et la teneur en **fluides** des roches de la lithosphère. Cela constitue une autre facette aux programmes **intégrés** d'étude de la croûte.

Dans la **croûte continentale**, l'eau salée qui remplit les **pores et les fractures** interconnectés est probablement la cause la plus fréquente des **fortes valeurs de conductivité électrique**. Parmi les autres explications possibles, il y a la présence de **graphite** ou de roches en **fusion partielle** (roches fondues), qui sont des matériaux conducteurs. Ainsi, les fortes valeurs de conductivité électrique peuvent être le signe de la présence de fluides dans les roches analysées, mais aussi de graphite ou de phases en fusion partielle. Toute cette information peut être recueillie sans même avoir à creuser un trou là où on enregistre ces valeurs de conductivité électrique.

Nous savons déjà que les **fluides** dans la croûte continentale sont d'une importance capitale tant en ce qui a trait au mode de déformation des roches qu'à la genèse des **gîtes minéraux**. Les changements découlant de la présence de fluides volatils dans la croûte sont abordés dans la sous-section intitulée «**Géochimie**».

Dans les régions actives du point de vue tectonique comme la Cordillère, à l'ouest des Rocheuses, d'autres fluides, en l'occurrence des roches silicatées en fusion partielle, peuvent être à l'origine de fortes valeurs de conductivité électrique dans la croûte inférieure et le manteau supérieur. Les roches en question sont composées d'un certain nombre de minéraux qui passent à l'état de fusion au-delà d'un intervalle de températures. Une phase en fusion partielle peut donc remplir les cavités de la matrice solide que forment les minéraux non fondus à une température à l'intérieur de l'intervalle. Étant donné que la plupart des silicates en fusion sont d'excellents conducteurs, une roche dans laquelle il y a un faible pourcentage de ceux-ci dans des cavités interconnectées peut s'avérer très conductrice dans l'ensemble. Voilà comment avec la

méthode électromagnétique, on peut arriver, dans les régions anomalement chaudes comme le long du transect de la Cordillère méridionale, à savoir où il y a de la fusion partielle et transférer cette information sur une carte.

Mais tout compte fait, d'où vient l'électricité dont nous avons expliqué la mesure dans les lignes précédentes? Nous savions bien que la question vous effleurait l'esprit. Nous donnerons une réponse très sommaire à cette question pour la simple et bonne raison qu'il s'agit d'un concept scientifique complexe, pour lequel il y a encore des points à éclaircir. Une explication plausible est la suivante : le noyau de la Terre, tout comme les courants de convection générés par la chaleur, tournent à des vitesses différentes de leur enveloppe, ce qui est à l'origine de friction et induit de l'électricité. Ce principe est celui d'une dynamo et on pense que de cette dynamo dériverait le champ électromagnétique ou la magnétosphère qui entoure la Terre. À son tour, la magnétosphère induit de l'électricité dans la croûte. Compte tenu du fait que la magnétosphère est soumise à des vents solaires (bombardements protoniques en provenance du Soleil), il y a des variations qui donnent lieu à toutes les possibilités de mesure. Finalement, d'où vient cette électricité? De la dynamo que forme le noyau de notre planète, de la magnétosphère induite autour de la Terre qui, à son tour, induit de l'électricité dans la croûte. Dans cette croûte, les différents types de roches et les teneurs variables en fluides sont à l'origine de toute la gamme des valeurs de conductivité; et c'est ce que nous pouvons mesurer. C'est pas mal, n'est-ce pas?

Les études électromagnétiques menées dans le cadre du LITHOPROBE reposent généralement sur deux types de levés de terrain. Le premier est le **sondage magnéto-tellurique (MT) par analyse tensorielle à bande large**, qui vise à mesurer le champ magnétosphérique de la Terre; le second, le **levé électromagnétique (EM)**, dont l'objectif consiste à mesurer les variations résultant d'un champ contrôlé induit par une unité émettrice.

Les **sondages magnéto-telluriques (MT)** font appel à des stations espacées de quelques kilomètres à des dizaines de kilomètres et aboutissent à une **couverture régionale**, le long des transects. Le but est de mesurer le champ

EM naturel qui varie avec le temps en raison des courants électriques dans la magnétosphère et l'ionosphère. Les mesures sont faites selon un vaste intervalle de fréquences, ce qui permet de dériver la répartition de la conductivité à des niveaux proches de la surface mais aussi à de grandes profondeurs (dans le manteau). Récemment, des scientifiques de la CGC ont conçu un appareil de mesure du magnéto-tellurisme à longue période, qui permet de déterminer la conductivité à des profondeurs supérieures à **500 km**, c'est-à-dire jusque dans la lithosphère sous-crustale et le manteau supérieur.

Quand des cibles géologiques précises ou d'autres caractéristiques d'intérêt ont été identifiées, les méthodes électromagnétiques à haute résolution et à source contrôlée sont utilisées pour mieux délimiter les **anomalies de conductivité** dans la croûte supérieure.

Des levés de reconnaissance et quelques projets spéciaux sont entrepris par des scientifiques des universités et de la CGC, où il y a l'équipement nécessaire. L'analyse des ensembles de données complexes obtenus et la présentation des résultats ont été grandement améliorées avec l'avènement récent des puissantes stations interactives de travail qui permettent de tout mettre en couleurs.

Les résultats du LITHOPROBE et d'études menées dans d'autres pays ont prouvé que, lorsque l'on veut sonder une croûte continentale où il y a beaucoup de fluides, la méthode électromagnétique, la sismique-réflexion et les levés de sismique-réfraction et de réflexion à grand angle fournissent beaucoup plus d'information **ensemble** qu'individuellement.

III.5 FLUX THERMIQUE ET GÉOTHERMIE

Nous avons déjà énoncé le fait que la Terre elle-même est la plus grosse centrale nucléaire qui existe. La **chaleur interne de la Terre** est le moteur des **processus tectoniques** et est en soit à l'origine de la formation des **gîtes minéraux** et de la **maturation des hydrocarbures** dans les bassins sédimentaires. Ainsi, toute étude de ces processus doit tenir compte de l'apport, tant dans le passé que dans le présent, du **flux thermique**. Dans la Terre, de la chaleur est générée par la désintégration des radioéléments naturels et par le manteau en

refroidissement. De nombreux processus tectoniques sont la cause de perturbations thermiques locales, comme en témoignent les volcans et les sources d'eau chaude.

Le **flux thermique** est généralement mesuré dans les trous de forage sur terre et en mer; dans le deuxième cas cependant, il peut aussi être évalué à l'aide de sondes spéciales placées dans les sédiments mous du fond marin. Certains trous sont forés spécifiquement en vue de mesures du flux thermique, mais bien des valeurs de cette variable sont déterminées à partir de forages existants. Il faut aussi établir les **gradients de température** et la **conductivité thermique** dans les roches pour arriver à calculer les valeurs de flux thermique. Les valeurs mesurées de production de chaleur et d'autres propriétés thermodynamiques permettent d'obtenir une **modélisation thermique** qui donne un aperçu des températures actuelles et anciennes.

Les propriétés **rhéologiques** modifiées par la température dictent les zones de force et de faiblesse dans la croûte et, par le fait même, les profondeurs auxquelles des mouvements tectoniques pourraient se produire. (L'adjectif «rhéologique» se rapporte à la déformation des roches; sur de longs intervalles de temps comme ceux considérés en géologie, des roches peuvent même aller jusqu'à fluer). Dans les bassins sédimentaires comme celui à l'est des Rocheuses, la circulation d'eau dans les roches modifie beaucoup les valeurs mesurées de flux thermique. Les études géothermiques de la migration des fluides sont précieuses parce qu'elles permettent d'évaluer des vitesses de déplacement de quelques centimètres par année, variable qui ne pourrait pas être mesurée autrement. Les scientifiques tant des universités que du secteur public ont l'équipement et les compétences nécessaires pour mener des études géothermiques; ils en sont d'ailleurs des acteurs importants dans le cadre du LITHOPROBE.

III.6 CARTOGRAPHIE GÉOLOGIQUE

DIAPOSITIVE 70: Les travaux géologiques sur le terrain sont le fondement de tous les autres types de levés effectués dans le cadre du LITHOPROBE.

La **cartographie géologique** est le **fondement** de tous les transects du LITHOPROBE. La

majorité des travaux de ce type à l'échelle de reconnaissance ont été terminés par l'intermédiaire des programmes de cartographie systématique relevant des gouvernements fédéral et provinciaux. Il faut cependant faire de la cartographie de terrain plus détaillée dans les secteurs couverts par les transects où cette information n'est pas déjà disponible. Des géologues de la CGC, des commissions géologiques provinciales et des universités unissent leurs efforts pour obtenir les données cartographiques de détail nécessaires pour chacun des transects.

La cartographie géologique est également utilisée après l'acquisition de données de sismique-réflexion le long d'un transect et leur interprétation provisoire. Les **résultats** obtenus par **déduction** à partir des coupes **sismiques** font ressortir les besoins de travaux supplémentaires de cartographie afin de lever des ambiguïtés d'**interprétation** ou de déterminer l'origine géologique de détails sismiques. La cartographie géologique a déjà été utilisée pour corroborer d'autres types de données dans les transects où il y a eu le plus de travaux.

DIAPOSITIVE 71: Carte géologique de la partie est du Labrador, sur laquelle sont figurées les provinces de Grenville et de Makkovik. Le carton du bas montre la relation entre les principales zones structurales et les autres transects du LITHOPROBE qui recourent aussi la Province de Grenville. Quant au carton du haut, il fait le lien entre la Province de Makkovik et la ceinture mobile kétilidienne au Groenland, son prolongement.

Laissons-nous donc imprégner des belles couleurs de la carte qui, en passant, feraient un imprimé bien plus attrayant que celui de nombreuses cravates. Ce qui ressort d'abord de la carte est l'opposition entre ses parties supérieure et inférieure. On peut y voir non seulement un contraste de couleurs mais aussi d'orientations; et voilà justement deux aspects importants d'une carte géologique. Les couleurs correspondent à deux caractéristiques des roches qu'elles figurent, à savoir leur **type** et leur **âge** (voir la légende). Quant aux linéations d'orientations opposées, qui se traduisent sur la carte par la juxtaposition de variations dans les couleurs et dans les directions, elles sont le reflet de la collision

entre deux grands cratons. Bien sûr, nous revenons à l'orogène de Grenville qui recoupe tout ce qui existait avant son charriage sur le Bouclier canadien. Cette ligne de chevauchement est celle qui délimite le Front de «Grenville», le long duquel s'observe ce changement drastique de style tectonique.

Nous pouvons admirer les géologues et les autres géoscientifiques qui ont contribué à l'élaboration de cette carte. Chacun et chacune a contribué à l'une ou l'autre des étapes (échantillonnage des différents types de roches, description des unités de chacun des types, attribution à leur milieu structural, détermination de leur orientation, datation des roches et, en dernier lieu, reconstitution de l'évolution dynamique sur considération de tous les éléments d'information). Remarquez, par exemple, comment le terrane de Groswater Bay (rouge) recoupe deux terranes beaucoup plus vieux (dont l'un rose) de la Province de Makkovik. Ou encore jetez un coup d'oeil aux jeunes «plutons de granite postérieurs à la collision», qui ont fait intrusion dans les roches plus vieilles du terrane de Pinware (que l'on peut voir aujourd'hui en raison de l'érosion subséquente). D'une façon ou d'une autre, ces quelques exemples nous donnent une idée de la quantité d'information que l'on peut soutirer d'une carte géologique; de plus, ils font la preuve qu'il faut plus d'une discipline pour reconstituer des contextes géologiques et tectoniques.

III.7 GÉOLOGIE STRUCTURALE

L'analyse **structurale** est probablement le type d'étude **géologique** qui est le plus souvent faite pour corroborer les résultats des méthodes indirectes de **géophysique**. En effet, les résultats des analyses structurales combinées aux données découlant de la sismique-réflexion et des autres méthodes géophysiques ont un apport direct à la compréhension des mécanismes d'épaississement ou d'amincissement de la croûte continentale. Il faut donc déterminer la **géométrie** et le **style** du **plissement** qui affecte des roches, mais aussi la géométrie et la nature des **failles** qui les recoupent et plus spécifiquement l'ampleur et la direction du mouvement le long des failles.

Parmi les structures observées, il y a les marqueurs de contraintes, notamment divers éléments déformés comme les cailloux, les

cristaux, les vacuoles (vides de forme irrégulière dans les roches) et les fossiles, ainsi qu'une variété d'indicateurs cinématiques, qui permettent de déterminer l'**intensité** des **déformations** et leur **orientation**. Ces informations servent à leur tour à émettre des hypothèses sur l'orientation des **paléocontraintes**, c'est-à-dire les contraintes auxquelles étaient soumises les roches au moment de leur déformation. En combinant les données recueillies à l'aide des marqueurs avec d'autres de **datation isotopique**, il est possible d'établir à quel **moment** il y a eu mouvement et ainsi déduire l'**âge** et la **durée** des **paléocontraintes**. On peut aussi évaluer les conditions de température et de pression (ce qui permet de déduire la profondeur) dans lesquelles les roches ont été déformées dans la croûte, et parfois même l'intensité des contraintes à l'origine d'une telle déformation, lorsqu'on observe certaines associations de minéraux métamorphiques qui coexistent dans les roches et pour lesquelles les températures et les pressions d'équilibre ont été déterminées en laboratoire.

DIAPOSITIVE 72: La géologie structurale met en évidence la dynamique d'un contexte géologique.

Sur la présente diapositive apparaissent deux blocs-diagrammes qui constituent une interprétation des éléments géologiques observés entre Montréal et Val d'Or (corridor central de Grenville). Sont figurés les principales limites de terrane, les écailles allochtones (masses de roches qui ont été charriées sur d'autres roches), les zones de cisaillement (le long desquelles il y a eu du mouvement) et les complexes intrusifs (plutons). Les traits rouges correspondent aux lignes sismiques qui ont fait l'objet de levés en 1993.

Peu importe le transect, l'**interaction** entre les **spécialistes de la géologie structurale** et les **sismologues** est fondamentale à l'obtention d'interprétations complètes et sensées des coupes sismiques.

III.8 PÉTROLOGIE DES ROCHES IGNÉES ET MÉTAMORPHIQUES

Les travaux de terrain visant à cartographier les roches ignées et métamorphiques ainsi que les analyses pétrologiques et minéralogiques des

ces unités ne suffisent pas; il faut de plus faire des travaux de géochimie des éléments majeurs et en trace et des analyses des isotopes traceurs (voir les sous-sections intitulées «Géochimie» et «Géochronologie») afin d'en arriver à une bonne description chimique des roches.

DIAPOSITIVE 73: Olivine en lame mince, l'un des principaux constituants du manteau supérieur.

Ces données supplémentaires permettent de caractériser la **géochimie** du **cadre tectonique** dans lequel les roches granitiques et volcaniques se sont formées. Il est particulièrement important de compter sur les affleurements de **roches de la croûte inférieure** pour mener les analyses **pétrologiques** et **géochimiques**; le but est de reconstituer la **pétrogenèse** de la croûte inférieure, c'est-à-dire le processus de formation des roches de cette partie de la lithosphère.

Quant aux données de pression et de température tirées des associations de minéraux métamorphiques et de leurs inclusions fluides, elles sont utilisées pour estimer les taux de soulèvement et d'érosion. Ces taux peuvent être évalués en comparant les données de **pression** et de **température** au moment où des roches ont été métamorphosées, d'une part, à celles quand ces mêmes roches se trouvaient à un niveau crustal plus élevé (déterminées, par exemple, d'après l'époque d'intrusion de plutons ou de dykes basiques dans ces lithologies) et, d'autre part, à celles quand elles étaient à la surface et étaient érodées. C'est compliqué ... N'est-ce pas? Mais ce genre d'information ne permet pas seulement d'évaluer le taux d'épaississement de la croûte et celui du soulèvement subséquent; il indique les pistes à suivre pour déterminer les étapes de subsidence des bassins sédimentaires où se déposent les produits de l'érosion après le soulèvement des terranes métamorphiques.

III.9 STRATIGRAPHIE ET SÉDIMENTOLOGIE

Les études des **bassins sédimentaires** que recoupent les transects visent à comprendre la nature, le mode de **formation** et le **cadre tectonique** de ces entités. Souvenez-vous quand nous avons parlé du BSOC? Oui! Oui! Le **Bassin sédimentaire de l'Ouest canadien** qui

recouvre le socle albertain et les régions adjacentes. Il vous revient à l'esprit maintenant?

Les questions auxquelles tentent de répondre les travaux de **stratigraphie** et de **sédimentologie** sont les suivantes : Quel était le taux de subsidence du bassin et jusqu'à quelle profondeur s'est-il enfoncé? Quels sont les processus sédimentaires à l'origine du remplissage du bassin? D'où viennent les sédiments qui ont été déposés dans le bassin? Pourquoi les bassins se sont-ils formés là où ils sont et quel est le lien entre leur évolution et la formation de la croûte continentale du Canada? Comment l'eau s'est-elle déplacée dans le bassin et a-t-elle entraîné la migration d'hydrocarbures dans les sédiments?

DIAPOSITIVE 74: Coupe stratigraphique expliquant la formation des bassins sédimentaires.

Une panoplie de méthodes **stratigraphiques** et **sédimentologiques** existent et peuvent être couplées aux données de **pression** et de **température** auxquelles les roches sédimentaires à l'étude ont été soumises. [Les données de pression et de température peuvent dériver de divers types d'analyse, notamment la **géochimie** des hydrocarbures dans les roches, la réflectance de la vitrinite dans les charbons, l'étude du kérogène de la matière organique, l'altération de la couleur des conodontes (type de fossiles), la datation par la méthode des traces de fission et la méthode $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (isotopes de l'argon) des composantes détritiques et authigènes (originales) des roches, ainsi que la minéralogie des argiles et d'autres associations de minéraux de faible métamorphisme. Comme vous le voyez, les méthodes sont légion.]

DIAPOSITIVE 75: Les forages des compagnies pétrolières ont permis d'obtenir un grand nombre de données sur le BSOC.

Parfois, les données peuvent être recueillies à même les affleurements (roches en surface). Cependant, dans le cas de la plupart des bassins sédimentaires au coeur du continent et dans les milieux actuels de marge continentale passive, l'information ne peut être obtenue qu'à partir des **forages** de l'industrie pétrolière ou des carottes échantillonnées dans le cadre de travaux d'exploration minière. Les études sur la

provenance des sédiments revêtent une importance particulière dans l'établissement des liens entre les terranes.

III.10 GÉOCHIMIE

Les mécanismes de formation et de modification de la croûte continentale (magmatisme, érosion, processus sédimentaires et évolution tectono-métamorphique) se traduisent par des **signatures chimiques** uniques. Ces signatures peuvent se présenter sous différentes formes, dont notamment des teneurs précises en éléments, la présence de systèmes d'isotopes ou une séparation des isotopes stables légers comme ceux de l'hydrogène, du carbone, de l'oxygène ou du soufre.

Les fragments de croûte accrétés à l'assemblage d'un continent transportent avec eux la **trace** de leur **évolution géochimique unique**. Il en ressort donc que la géochimie est un complément du paléomagnétisme, de la géochronologie et des analyses structurales, ce qui permet d'en arriver à une description plus complète des processus à l'origine de la formation de la croûte et de son évolution.

Il est maintenant bien établi qu'à toutes les étapes majeures du cycle de la tectonique des plaques, les **fluides** sont d'une importance capitale. Au niveau des dorsales océaniques, là où fait extrusion la lithosphère chaude nouvellement formée, l'eau de mer interagit avec les roches ignées; il y a donc modification, non seulement des roches, mais aussi de l'eau des océans. Quand du plancher océanique s'enfonce sous une autre plaque, des fluides circulent, servent de lubrifiants au niveau des chevauchements dus à la subduction et en viennent à catalyser la formation de produits volcaniques gazeux reliés à ce processus. Quand il y a collision entre des blocs continentaux (comme dans le cas de l'Himalaya et des Alpes), les grandes structures de chevauchement continental sont lubrifiées par l'extrusion de fluides découlant de la compression et de l'élévation de la température des roches qui sont transportées vers les grandes profondeurs.

Chaque fois qu'un fluide géologique se déplace, qu'il s'agisse de magma igné, d'un mélange métamorphique d'eau (H₂O) et de gaz carbonique (CO₂) ou des fluides d'un bassin

sédimentaire, il y a des **changements** isotopiques qui se produisent tout au long de son parcours. Le type de fluide peut souvent être identifié à partir des différents systèmes d'isotopes stables et de sa composition, découlant de l'analyse des petites inclusions fluides piégées dans la roche ou des changements chimiques le long du parcours de migration. Ainsi, les changements chimiques peuvent servir à décrire les processus tectoniques, tant du point de vue de leur échelle que de leur style.

La presque totalité des nos ressources en minéraux et en hydrocarbures ont un lien avec ces mouvements de fluides. Les sulfures de fer, de zinc, de cuivre et d'argent sont associés à l'eau de mer qui est chauffée dans la croûte océanique et refroidie à mesure qu'elle est expulsée au niveau des dorsales. Les gisements d'or, d'argent, de tungstène, de cuivre et de molybdène s'expliqueraient par des processus mettant en jeu les fluides au-dessus des zones de subduction. La plupart des grands gîtes aurifères du Canada semblent aller de pair avec les fluides profonds découlant des processus ignés et métamorphiques. Chaque fois qu'un processus tectonique est à l'origine d'une remobilisation de grands volumes de fluides, il se peut qu'il y ait une réorganisation des composantes chimiques qui, parfois, donne lieu à la formation de **gîtes minéraux** d'intérêt.

DIAPOSITIVE 76: Diagramme triangulaire (ou ternaire) servant à représenter les résultats d'analyse chimique des roches ignées.

Un diagramme de ce genre permet non seulement de déterminer la source d'un magma à partir duquel une roche a solidifié, mais donne aussi une bonne idée sur le comment. Encore une histoire de détective ... Sherlock Holmes aurait aimé. C'est cependant un travail très ardu, en dépit du fait que les principes sur lesquels cette démarche scientifique de détective reposent sont bien établis.

Commençons notre explication avec une bouteille de boisson gazeuse. Si nous l'ouvrons alors qu'elle est très froide, des bulles s'échapperont et nous observerons parfois la formation de mousse. Si nous l'ouvrons alors qu'elle est chaude, la même chose se produira mais de façon plus intense, parce que les bulles chercheront à sortir encore plus vite. Cet

exemple constitue une démonstration hors pair du contrôle qu'exercent la pression (le capuchon sur la bouteille) et la température sur l'équilibre du dioxyde de carbone (CO₂) en solution dans la boisson gazeuse. Dès que la pression ne s'exerce plus sur la solution, donc dès qu'on enlève le capuchon, les bulles ne peuvent plus demeurer en solution; elles sont «volatiles» et s'échappent. L'augmentation de la température fait qu'il y a plus de **constituants volatils** qui cherchent à sortir. C'est simple? Maintenant, il faut ajouter les «solides» qui, eux aussi, sont modifiés dans certaines conditions de pression et de température, comme le sucre ou le sel dans l'eau. En effet, tous les minéraux sont caractérisés par des intervalles de pression et de température auxquels ils vont soit fondre pour devenir un magma, soit précipiter à partir d'un magma.

Le magma à l'origine d'un type de roche peut dériver d'un nombre infini de lithologies et s'être formé dans une multitude de conditions. Il peut provenir du manteau, donc des grandes profondeurs sous la croûte, ou s'être formé par la fonte de roches de la croûte. Et encore. Il se peut que seulement certaines composantes aient fondu, mais aussi que toute la roche, sa majeure partie ou une partie infime soit devenue magma. Pendant la montée du magma, il se peut que certaines portions aient solidifié et que ce qui reste ait continué à monter étant par le fait même de composition chimique différente par la perte de ces constituants.

Il y a donc un nombre infini de possibilités, selon les conditions de pression et de température. On peut dissoudre seulement une certaine quantité de sucre dans une tasse de thé et lorsque le liquide refroidit, il y aura précipitation d'un peu de sucre (ou sédimentation).

Ce sont les principes élaborés dans les lignes précédentes qui sont le fondement de l'analyse scientifique d'une roche solidifiée. Les constituants chimiques de la roche peuvent indiquer au géochimiste les conditions de pression et de température sous lesquelles la roche s'est formée et de quel magma, de quel mélange distinct elle pourrait vraisemblablement dériver. Assez impressionnant.

Le diagramme triangulaire AFM de la diapositive 76 permet aux chercheurs de représenter différentes «séries» de roches ignées, qui décrivent le milieu de formation des lithologies (comme les conditions de pression et de température) et leur source. La lettre «A» est le pôle des alcalins, la lettre «F», celui des oxydes de fer (minéraux ferreux et ferriques) et la lettre «M», celui de l'oxyde de magnésium. L'endroit exact où sera placé chaque échantillon de roche sur le diagramme dépend du pourcentage en poids relatif de ces trois groupes d'oxydes.

Des échantillons de la ceinture volcanique de Garibaldi près de Vancouver apparaissent sur le diagramme essentiellement dans le champ des roches calco-alcalines. Les roches granitiques du Complexe plutonique côtier à l'ouest de la ceinture susmentionnée se concentrent dans le même champ. De façon contrastante, les roches nouvellement formées à partir du magma qui s'épanche de la dorsale Juan de Fuca, au large de l'île de Vancouver, ont une composition correspondant au champ tholéiitique du diagramme. Si de telles roches étaient par la suite charriées sur le continent (comme dans la partie ouest de Terre-Neuve), il serait possible de les différencier des roches volcaniques.

Le rôle de la géochimie dans le cadre du projet LITHOPROBE est double. Dans la reconstitution de la structure profonde de la croûte et des processus en jeu, elle sert en premier lieu à comprendre les conditions de **pression** et de **température** qui prévalent à ces grandes profondeurs et, en second lieu, à déterminer la composition des **fluides** qui s'y trouvent. Les conditions de pression et de température en profondeur peuvent être établies à partir de la répartition des éléments et des isotopes dans les roches qui aujourd'hui affleurent mais autrefois étaient enfouies, de même que par l'étude des éléments ou des inclusions contenus dans les roches intrusives qui ont cherché à atteindre la surface. La composition des fluides des profondeurs peut être déterminée par les traces chimiques qu'ils laissent derrière eux et par l'analyse des fluides qui s'échappent actuellement à la surface de la Terre.

De façon plus générale, on peut dire que l'une des façons de connaître l'évolution des roches est la détermination de la signature

chimique que les processus ignés, métamorphiques, érosionnels et sédimentaires y ont imprimée.

Par exemple, les fragments de croûte océanique et continentale qui ont été soudés à notre continent sont caractérisés par une évolution géochimique unique. La géochimie, avec ses outils multiples, constitue une discipline de plus permettant de contrevérifier l'information recueillie avec les autres méthodes, dont notamment la sismique, l'étude structurale, l'analyse tectonique, etc.

III.11 GÉOCHRONOLOGIE

La **géochronologie** est une branche de la géochimie qui se concentre sur la **physique des isotopes**; elle a pour objectif de déterminer l'époque de formation des roches, des minéraux et des fossiles. Les spécialistes de la géochronologie analysent des matériaux dont l'âge varie de quelques années à des milliards d'années. Pour évaluer leur âge, ils s'appuient sur le principe que les isotopes **radioactifs** qui existent au moment de la «naissance» ou de la formation d'un minéral **se désintègrent** à un taux fixe. La mesure de l'abondance relative des isotopes «père» et «fils» permet d'assigner un âge aux roches.

DIAPOSITIVE 77: Minéraux utilisés pour la datation géochronologique haute précision. Il y a de la biotite (mica noir) à gauche, des zircons (minéraux clairs) au centre et de la hornblende (verdâtre) à droite.

La datation uranium/plomb (U/Pb) sur **zircons** constitue un exemple d'une méthode qui fait appel aux **isotopes radiogéniques**. Les zircons s'observent en petites quantités dans de nombreuses roches crustales et contiennent un petit peu d'uranium qui se désintègre en plomb; leur demi-vie correspond à peu près à l'âge de la Terre, soit 4 500 Ma. Il est donc possible de dater les roches avec une **précision** de l'ordre de 2 à 5 Ma en mesurant l'abondance et les rapports isotopiques de l'uranium et du plomb dans les minéraux de zircon.

DIAPOSITIVE 78: Diagramme produit par ordinateur figurant les résultats d'analyses par la méthode U/Pb sur zircons extraits d'un granite de la partie nord du Labrador. Chaque ellipse correspond à une analyse et à son erreur associée.

Le diagramme fait ressortir deux âges de formation de différentes composantes du granite. Il est à noter que l'erreur sur la datation d'une roche de plus de 2 500 Ma n'est que de 3 à 5 Ma. Le diagramme dans le coin inférieur droit présente l'analyse d'une autre composante de la même roche; cela signifie que son «horloge» a été remise à zéro par un épisode de métamorphisme de haute température à $1\,311 \pm 8$ Ma.

Une deuxième méthode qui s'appuie sur les isotopes radiogéniques est celle du rapport **samarium/néodyme (Sm/Nd)** dans les granites de la croûte inférieure. Les granites dérivent principalement de la fonte de roches dans la croûte profonde, d'un magma qui cherche à monter vers la surface et qui est caractérisé par un rapport Sm/Nd et une composition en isotopes du Nd typique de sa source.

DIAPOSITIVE 79: Exemple de la méthode Sm/Nd (Terre-Neuve). Résultats d'analyses de plutons granitoïdes tardi-orogéniques et post-orogéniques. Les points jaunes identifient les plutons qui dérivent du manteau, donc de source très profonde, et les points noirs, ceux qui ont été formés par la fonte de roches crustales (source profonde) et supracrustales (source peu profonde).

Quand les circonstances s'y prêtent, on peut déterminer l'âge de la croûte profonde. Ces informations revêtent une importance particulière dans les régions de **géologie complexe**, où les parties supérieure et inférieure de la croûte ont pu évoluer indépendamment et être juxtaposées par des processus structuraux. De nombreux autres couples d'isotopes et d'autres méthodes de datation (comme par exemple celle des traces de fission) peuvent fournir des données chronologiques irremplaçables.

Un aspect économique important de la géochronologie et des isotopes radiogéniques réside dans la détermination du moment de formation des gîtes minéraux et des sources de leurs composantes chimiques.

DIAPOSITIVE 80: Un spectromètre de masse donne la possibilité d'identifier avec précision les isotopes présents dans les minéraux. Le rapport de ces isotopes permet d'estimer leur âge.

Le rôle de la géochronologie dans les travaux du LITHOPROBE est important; cette discipline permet d'évaluer avec précision l'âge des roches en surface et des intrusifs, un élément d'information essentiel pour en arriver à reconstituer leur évolution géologique à l'échelle locale. La datation isotopique s'avère d'une importance capitale là où il n'y a pas de matériaux organiques ni de fossiles (comme dans la plupart des milieux précambriens); elle constitue le seul moyen d'établir avec suffisamment de précision l'époque de mise en place des intrusions et les épisodes de métamorphisme, pour ensuite les associer à un événement tectonique.

La datation des roches qui affleurent est nécessaire pour faire le lien entre, d'une part, ce qui peut être observé directement et, d'autre part, ce qui ne peut l'être et doit donc être établi par les méthodes géophysiques indirectes (géométrie et domaines des grandes profondeurs).

Pour chaque transect, des analyses géochronométriques des isotopes sont prévues dans le but de dater la mise en place de toutes les suites granitiques et volcaniques d'importance, mais aussi pour déterminer quand elles ont été métamorphosées et déformées. Les âges sont calculés à l'aide de nombreuses méthodes, dont le comptage des traces de fission, pour établir l'époque de formation et le taux de soulèvement des roches métamorphiques et plutoniques ainsi que des lithologies déposées dans les bassins. Des installations de classe mondiale pour effectuer ce genre d'analyses existent dans de nombreuses universités canadiennes, à la CGC et au Musée royal de l'Ontario.

III.12 PALÉOMAGNÉTISME

Les techniques du **paléomagnétisme** visent à mesurer les directions de magnétisation «fossilisées» dans les unités rocheuses qui contiennent des quantités infimes de fer remontant au **moment** de leur **formation** (époque de solidification) ou à des périodes plus récentes si elles ont été chauffées à nouveau ou métamorphosées. Ainsi, les scientifiques peuvent calculer la **latitude** originale des roches en corrigeant de façon adéquate les mesures de l'attitude d'une formation rocheuse (sur considération du

plissement et du basculement) et en comparant le résultat avec le champ au moment de leur magnétisation, une donnée connue. La reconstitution du déplacement des terranes et des continents à travers les temps géologiques à partir de l'empreinte du champ géomagnétique dans les roches constituant ces unités est une démarche complexe. Malgré tout, les analyses paléomagnétiques ont été d'une utilité remarquable pour ce qui est de fournir des données fondamentales à l'évaluation de la **dérive des continents** et des déplacements des plaques tectoniques; elles ont contribué à étayer la preuve ultime que de tels mouvements ont eu lieu.

Récemment, un des apports importants du paléomagnétisme a été de permettre la reconstitution et la confirmation des processus complexes d'assemblage qui ont eu lieu dans la partie ouest de la Cordillère. On sait maintenant qu'il y a eu des mouvements latitudinaux majeurs (sur plusieurs milliers de kilomètres) et des rotations de blocs. Bien que la description des associations de fossiles et des faciès ait été importante pour ce qui est de fournir d'autres indications géologiques de ces mouvements, il n'en faut pas moins mentionner que le paléomagnétisme offre la possibilité d'effectuer des mesures directes. La détermination de la latitude d'origine des formations rocheuses et, en particulier, la reconnaissance que des roches aujourd'hui juxtaposées peuvent provenir de sources séparées par des centaines voire des milliers de kilomètres sont d'une importance capitale pour la compréhension des **épisodes géotectoniques** caractérisant un transect et, par conséquent, de l'**évolution** du continent.

Les travaux sur le terrain dans le domaine du paléomagnétisme supposent un échantillonnage de types de roches précis conjugué à un contrôle géologique serré (description des unités rocheuses, détermination de leur âge, mesures de leur attitude). L'assignation d'un âge aux roches, que ce soit à l'aide de la géochronologie ou des fossiles, est une étape importante. On note donc à quel point il y doit y avoir interaction entre les différentes disciplines pour obtenir de bons résultats.

III.13 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES ROCHES

Toutes les méthodes géophysiques sont reliées d'une façon ou d'une autre à une ou plusieurs propriété(s) physique(s) des roches. La sismique repose sur les vitesses de compression et de cisaillement; la gravimétrie, sur la densité; le magnétisme, sur la susceptibilité; l'électromagnétisme, sur la porosité et la conductivité électrique; la géothermie, sur la conductivité thermique et la production de chaleur; le paléomagnétisme, sur divers types de magnétisation associés aux roches. Quelques-unes de ces propriétés sont partie intégrante de la méthode, d'autres peuvent être déterminées indépendamment. Les données de géophysique dans les sondages que l'industrie minière rend disponibles peuvent fournir de l'information valable dans certains cas.

Il arrive souvent qu'il faille déterminer les propriétés physiques des roches *in situ*, c'est-à-dire dans les conditions de pression et de température où elles s'observent et avec les fluides qu'elles contiennent. Ce type de mesures fait appel à de l'équipement complexe et spécialisé que seulement quelques laboratoires universitaires possèdent. Les échantillons de roches à faire analyser sont généralement choisis avec la collaboration d'un géologue lors des travaux sur le terrain; ils peuvent aussi provenir des carottes ou des déblais récupérés des forages effectués par les compagnies minières ou pétrolières. L'établissement de liens entre, d'une part, des propriétés physiques des roches dérivées des sondages et, d'autre part, des données sismiques et électromagnétiques a obtenu un bon succès dans les régions minières.

Pour le LITHOPROBE et d'autres projets de recherche, l'accès à de l'information sur les propriétés physiques d'une grande variété de types de roches existant dans des conditions très variables est d'une valeur inestimable.

III.14 SURVOL DES DIVERSES DISCIPLINES DES SCIENCES DE LA TERRE

Maintenant que vous avez suivi un «cours-éclair» sur les méthodes utilisées en sciences de la Terre, vous avez une idée de tous les efforts qui doivent être déployés pour essayer de comprendre la structure et l'évolution du continent sur lequel nous vivons. À elle seule, aucune de ces méthodes ne fournit suffisamment d'information pour même en

arriver à une ébauche de théorie. C'est cependant en les réunissant toutes et en faisant appel aux connaissances des scientifiques qui les appliquent que des progrès réels peuvent être réalisés et que la lumière peut jaillir au bout du tunnel.

Nous espérons que vous avez été fascinés par notre histoire intitulée «Sonder la lithosphère» et que dans les lignes de ce texte, vous en avez appris un peu. Le LITHOPROBE est considéré comme le plus important programme géoscientifique multidisciplinaire qui ait été entrepris, tous continents et pays confondus. Les Canadiens peuvent être fiers de notre contribution aux sciences de la Terre et de nos efforts pour tenter d'élucider comment le territoire sous nos pieds a évolué.

Remerciements

Il ne faut pas passer sous silence le fait suivant : les données que les scientifiques du LITHOPROBE accumulent d'un bout à l'autre de notre pays et jusqu'aux plus grandes profondeurs de notre continent appartiennent à chacun de nous. C'est nôtre parce nous en payons tous et toutes une partie. Voici donc d'où viennent les fonds pour mener à bien le LITHOPROBE.

Notre première source de financement est le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG); la deuxième, la Commission géologique du Canada. Ces deux organismes sont les piliers du LITHOPROBE. Mais il y a d'autres sources de financement, en l'occurrence les contributions directes (en argent) et indirectes (en soutien et en services) des commissions géologiques provinciales et territoriales. Il est à noter que les compétences que les nombreux scientifiques ont mis ou mettent au service du LITHOPROBE sont fournies pour la plupart gratuitement, étant donné que leurs salaires sont payés par les universités et les commissions géologiques, ce qui veut dire en bout de ligne par les contribuables du Canada. Il y a aussi, en dernier lieu, les compagnies minières et pétrolières qui ont su reconnaître l'apport des études du LITHOPROBE pour leurs propres travaux. Ils participent donc en payant certains levés, de même qu'en fournissant des données, du temps et du savoir-faire.

Les connaissances acquises dans le présent texte ont donc une grande valeur et méritent d'être utilisées à bon escient. Qui sait? Si un tremblement de Terre fait tomber la porcelaine de votre vaisselier ou si une mine est démarrée dans votre coin, vous serez peut-être en mesure d'en expliquer le pourquoi? Et qui ne serait pas surpris d'apprendre que le vaste océan Pacifique rétrécit (il disparaît en partie sous le Canada) et que l'Europe s'éloigne de notre continent (ou plutôt que l'Europe et l'Amérique s'éloignent l'une de l'autre)?

Bon sondage de la lithosphère!