
SUMMARY

Adjacent to the south shore of Great Slave Lake in southern Northwest Territories, a Middle Devonian carbonate barrier complex called the Presqu'île barrier has been extensively dolomitized, and this complex hosts a large number of lead-zinc orebodies constituting the world-class Pine Point mineral deposit. The Pine Point ore deposit is classified as Mississippi Valley-type (MVT) indicating similar character to a number of lead-zinc deposits originally defined in the Mississippi River valley of central United States. MVT ore deposits are stratabound carbonate-hosted sulphide bodies dominantly composed of galena and sphalerite. These epigenetic deposits occur mainly in dolostone as open-space fillings in collapse breccias or less commonly as replacement bodies in high-grade zones. The ores originate from basinal brines at temperatures of between 75 and 200°C and are typically deposited in carbonate platform settings in relatively undeformed epicratonic sedimentary basins. The deposits occur as clusters and these areas of concentrated occurrence form MVT districts. Characteristically, deposits within districts exhibit remarkable similarities in mineral assemblage, isotopic composition, texture, and ore-control.

Throughout northern Alberta and southern Northwest Territories, numerous and extensive thick carbonate successions occur in the cratonic platform wedge of strata of the Western Canada Sedimentary Basin. These prospective host rocks were identified by federal, provincial, and territorial partners as strata of enhanced mineral potential and, consequently, required further evaluation. A Targeted Geoscience Initiative project was thus proposed to pursue an integrated and comprehensive study investigating the potential for MVT mineralization in the area. This volume reports on the various aspects and results of this project. The primary goal of the project was to delineate and evaluate the origin, distribution and potential of carbonate-hosted lead-zinc deposits in the region and develop an understanding of the relationships of fluid flow and ore deposition to the regional framework of stratigraphy, structure, and diagenesis. The source, flow-path, and timing of fluid movement and their relation to mineralization were important considerations. The relationship of stratabound MVT mineralization at Pine Point with the regional stratigraphic framework and the evaluation of the structural features critical for fluid migration and ore deposition are crucial attributes to consider when identifying regions or strata of enhanced mineral potential elsewhere in the project area.

At Pine Point, orebodies are generally restricted to zones of weakness or hinge lines where extensive

SOMMAIRE

Près de la rive sud du Grand lac des Esclaves, dans le sud des Territoires du Nord-Ouest, se trouve un complexe de barrières carbonatées du Dévonien moyen, appelé « barrière de Presqu'île »; ce complexe a été abondamment dolomitisé et renferme un grand nombre de corps minéralisés en plomb-zinc qui constituent le gisement de Pine Point de classe mondiale. Ce gisement est de type Mississippi-Valley, et il montre donc des similitudes avec un certain nombre de gisements de plomb-zinc définis à l'origine dans la vallée du fleuve Mississippi, dans le centre des États-Unis. Les gisements de type Mississippi-Valley sont des amas stratoïdes de sulfures encaissés dans des roches carbonatées et principalement composés de galène et de sphalérite. Ces gisements épigénétiques se retrouvent principalement dans de la dolomie, sous forme de matériaux de remplissage de cavités dans des brèches d'effondrement ou, moins couramment, comme corps de remplacement dans les zones de minerai à forte teneur. Les minerais émanent de saumures de bassin à des températures entre 75 et 200°C et se sont généralement accumulés dans des plates-formes carbonatées dans des bassins sédimentaires épicrotoniques relativement non déformés. Les gisements se présentent en groupes et ces zones d'occurrences concentrées forment des districts à minéralisations de type Mississippi-Valley. Les gisements trouvés dans ces districts présentent de manière caractéristique des similitudes saisissantes dans leurs associations de minéraux, leur composition isotopique, leur texture et leurs facteurs de minéralisation.

Partout dans le nord de l'Alberta et le sud des Territoires du Nord-Ouest, de vastes et nombreuses successions carbonatées épaisses sont présentes dans le biseau de strates de plate-forme cratonique du Bassin sédimentaire de l'Ouest du Canada. Ces roches encaissantes potentielles ont été identifiées par des partenaires fédéraux, provinciaux et territoriaux comme étant des strates offrant un potentiel minéral accentué et exigeant par conséquent une évaluation plus poussée. Un projet a donc été proposé dans le cadre de l'Initiative géoscientifique ciblée pour mener l'étude intégrée et exhaustive du potentiel en minéralisation de type Mississippi-Valley dans ce secteur. Le présent volume fait état des divers aspects et résultats de ce projet. Le but premier du projet était la délimitation et l'évaluation de l'origine, de la répartition et de la présence éventuelle des gisements de plomb-zinc encaissés dans des roches carbonatées dans la région, ainsi que l'établissement des relations entre l'écoulement des fluides et la mise en place du minerai, d'une part, et le contexte stratigraphique, structural et diagénétique régional, d'autre part. La source, le trajet d'écoulement et la chronologie des mouvements des fluides ainsi que leur incidence sur la minéralisation ont été des points importants à examiner. La relation entre la minéralisation stratoïde de type Mississippi-Valley à Pine Point et le contexte stratigraphique régional, ainsi que l'évaluation des caractéristiques structurales critiques pour la migration des fluides et la mise en place du minerai sont des facteurs primordiaux à prendre en considération lors de l'identification des régions ou des strates d'un plus grand un potentiel minier ailleurs dans la région du projet.

En général, à Pine Point, les corps minéralisés se rencontrent uniquement dans des zones de faiblesse ou dans des lignes charnières

networks of interconnected paleokarst developed. Within these paleokarstic networks, prismatic and tabular ore accumulations were deposited in hydrothermally derived dolomite breccias. The most typical host lithology for MVT orebodies at Pine Point is the coarse-grained, vuggy Presqu'île dolomite, an extensive secondary diagenetic dolomite facies that was deposited relatively late in the paragenetic history of the Presqu'île barrier complex.

A critical element in the study of MVT deposits in Western Canada and elsewhere is the role and importance that structure played in the formation and emplacement of the sulphide orebodies. Popular genetic models include compaction- and topographic recharge-driven migration of metal-bearing brine through aquifers in the Western Canada Sedimentary Basin and precipitation of the ore minerals in peripheral carbonate platforms. These hydrological models imply strong stratigraphic control with regard to sulphide emplacement and a relatively minor role for structures. In these models, faults may offset paleoaquifers or provide sites for fluid mixing.

In this volume, arguments for a direct relationship of MVT deposits and their closely associated hydrothermal dolomite with fault-zone processes throughout the Western Canada Sedimentary Basin are proposed. Geological observations of various Pb-Zn occurrences validated by geochemical and structural data suggest structural channelling of dolomitizing and mineralizing fluids into strained carbonate rocks. In the Rocky Mountain fold-and-thrust belt, radiogenic strontium and lead isotopes in sulphides indicate basement signatures. At Pine Point, radiogenic strontium in hydrothermal dolomite and a non-radiogenic lead isotope cluster in sulphides correspond directly with isotopic signatures observed in subsurface MVT occurrences overlying basement fault zones, possibly indicating a common basement source. The chemical and isotopic characteristics of MVT parent fluids are consistent with seawater and brine convection within fault-confined vertical aquifers, strong water-basement rock interaction, metal leaching from basement, and focused release of hydrothermal and metal-bearing solutions along linear zones of strained carbonate caprocks. These 'fault-zone' processes can explain the linear distribution of MVT occurrences locally and regionally and would be more effective in delivering solute to the overlying carbonate caprocks than a single flush through clastic strata as invoked by basinal fluid-flow models. If this hypothesis is correct, the identification of structural trends in the project area would have very useful predictive value with respect to MVT exploration.

où de vastes réseaux de paléokarsts interconnectés se sont développés. À l'intérieur de ces réseaux paléokarstiques, des amoncellements de minerais prismatiques et tabulaires se sont accumulés dans des brèches dolomitiques issues de l'hydrothermalisme. La lithologie encaissante la plus commune pour les corps minéralisés de type Mississippi-Valley à Pine Point est la dolomie vacuolaire à grain grossier de Presqu'île, un vaste faciès de dolomie diagénétique secondaire qui s'est accumulée relativement tardivement dans l'histoire paragénétique du complexe de barrières de Presqu'île.

Un élément critique de l'étude des gisements de type Mississippi-Valley dans l'Ouest du Canada et ailleurs est le rôle important joué par la structure dans la formation et la mise en place des corps minéralisés en sulfures. Les modèles génétiques répandus sont l'écoulement, engendré par la compaction ou par des zones d'alimentation, de saumures métallifères dans les aquifères du Bassin sédimentaire de l'Ouest du Canada, ainsi que la précipitation des minéraux métallifères dans des plate-formes carbonatées en périphérie. Ces modèles hydrologiques supposent un rôle important pour la stratigraphie dans la mise en place des sulfures et un rôle relativement mineur pour les structures. Dans de tels modèles, les failles peuvent décaler les paléoaquifères ou offrir des lieux de mélange des fluides.

Dans le présent volume, des arguments sont avancés en faveur d'une relation directe entre, d'une part, les gisements de type Mississippi-Valley et la dolomite hydrothermale à laquelle ils sont étroitement associés et, d'autre part, les processus dans les zones de failles dans tout le Bassin sédimentaire de l'Ouest du Canada. Des observations géologiques de divers indices de plomb-zinc, corroborées par des données géochimiques et structurales, donnent à penser qu'il y a eu canalisation structurale des fluides dolomitizants et minéralisateurs dans des roches carbonatées déformées. Dans la zone de plissement et de chevauchement des Rocheuses, les isotopes radiogéniques du strontium et du plomb dans les sulfures indiquent des signatures du socle. Au site de Pine Point, le strontium radiogénique dans la dolomite hydrothermale et un groupe d'isotopes non radiogéniques du plomb dans des sulfures correspondent directement avec les signatures isotopiques observées dans les indices subsuperficiels de type Mississippi-Valley sus-jacents à des zones de failles du socle, ce qui pourrait indiquer une même source dans le socle. Les propriétés chimiques et isotopiques des fluides parentaux des gisements de type Mississippi-Valley sont compatibles avec la convection d'eaux de mer et de saumures dans des aquifères verticaux limités par des failles, avec une forte interaction entre l'eau et les roches du socle, avec un lessivage de métaux du socle et avec la libération concentrée de solutions hydrothermales et métallifères le long de zones linéaires de terrains de couverture carbonatés déformés. Ces processus dans les « zones de failles » peuvent expliquer la répartition linéaire des indices de type Mississippi-Valley aux échelles locale et régionale et auraient plus efficacement distribué les solutés dans les terrains de couverture carbonatés qu'une unique chasse à travers les strates clastiques, comme le proposent les modèles d'écoulement des fluides de bassin. Si cette hypothèse s'avère juste, l'identification des tendances structurales dans la région du projet aura une valeur prévisionnelle très utile dans le cadre des travaux d'exploration à la recherche de gisements de type Mississippi-Valley.

In accordance with this structural discourse, a series of subsurface structure and isopach maps in the project area reveal abrupt inflections of contours coincident with previously identified faults and fault zones. Significantly, new features were revealed by this mapping exercise and often correlate with subvertical faults interpreted from seismic and aeromagnetic data. Seismic interpretation confirms a regionally extensive orthogonal pattern of structures in the area that greatly influenced Middle Devonian facies development and the orientation of the carbonate bank edge. The seismic work also revealed a close association of hydrothermal dolomite distribution with structural features in the region.

The strong association of certain dolomite types to MVT mineralization at Pine Point led to a series of papers in this volume dealing with dolomite varieties, their characteristics and distribution, as well as their geochemical and isotopic properties. Detailed study of the petrography, geochemistry, and fluid inclusion microthermometry of various dolomite types, carbonate cements, and sulphide minerals provide useful information with respect to characteristics of the parent fluids and the paleoenvironmental conditions during deposition. Pre-ore carbonate phases consist of early, fine-crystalline matrix dolomite and later medium-crystalline matrix dolomite. Geochemical analysis of these pre-ore carbonate phases reveals that early dolomite formed, at or just below the seafloor, from Middle Devonian seawater. During medium-crystalline dolomitization, shallow burial conditions prevailed. A strong associate of MVT mineralization at Pine Point is the diagenetic facies called *Presqu'île* dolomite, a coarse-crystalline vuggy dolostone with vugs partly or completely occluded with saddle dolomite cements. This ore-stage matrix dolomite along with secondary saddle dolomite cements and sphalerite and galena sulphides are characterized by depleted oxygen-18, slightly depleted carbon-13 and similar strontium ratio isotopic values at Pine Point. The depleted oxygen-18 isotope signature indicative of higher precipitation temperatures is confirmed by elevated fluid inclusion homogenization temperatures. Also, final melting temperatures of these inclusions establish that the dolomitizing fluids were hypersaline brines, and the eutectic or initial melting temperatures suggest that they were fluids derived from the NaCl-CaCl₂-H₂O salt system. Thus, derivation from deeply buried basinal fluids affected by low-temperature diagenetic processes is suggested for ore-stage minerals. Chemical analyses of fluid inclusions in sphalerite and dolomite indicate that the transporting fluid consisted of dense brines. These brines were bromine-enriched compared to seawater, which suggests the parent fluids evolved from highly evaporated seawater rather than common seawater. Dominant cations in the inclusions are calcium and sodium. These Ca-

Dans l'optique de ce discours, une série de cartes des structures subsuperficielles et des isopaches de la région du projet révèlent d'abruptes inflexions des isopaches correspondant avec des failles et des zones de failles reconnues préalablement. Il est important de souligner que cet exercice de cartographie a révélé l'existence de nouvelles entités qui sont souvent en corrélation avec des failles subverticales dont l'existence a été déduite à partir de données sismiques et aéromagnétiques. L'interprétation des données sismiques confirme l'existence d'un vaste réseau orthogonal de structures qui auraient fortement influencé l'évolution des faciès au Dévonien moyen et l'orientation du rebord du banc carbonaté. Les levés sismiques ont en outre révélé une étroite association entre la répartition de dolomite hydrothermale et les entités structurales dans la région.

L'étroite association de certains types de dolomite avec la minéralisation de type Mississippi-Valley au site de Pine Point fait l'objet d'une série d'articles dans le présent volume sur les variétés de dolomite, leurs caractéristiques, leur répartition et leurs propriétés géochimiques et isotopiques. L'étude détaillée de la pétrographie, de la géochimie et de la microthermométrie des inclusions fluides des différents types de dolomite, des ciments carbonatés et des sulfures a fourni des informations précieuses sur les caractéristiques des fluides parentaux et sur les conditions paléoenvironnementales qui régnaient pendant le dépôt. Les phases carbonatées antérieures à la minéralisation consistent en une dolomite matricielle précoce à cristaux fins et en une dolomite matricielle tardive à cristaux de taille moyenne. Les analyses géochimiques de ces phases carbonatées révèlent que la dolomite précoce s'est formée au niveau du fond océanique, ou juste en dessous, à partir d'eau de mer du Dévonien moyen. Des conditions d'enfouissement à faible profondeur ont dominé pendant la dolomitisation en cristaux de taille moyenne. Au site de Pine Point, un faciès diagénétique appelé « *dolomie de Presqu'île* » est étroitement associé à la minéralisation de type Mississippi-Valley; il s'agit d'une roche vacuolaire à gros cristaux dont les vacuoles sont remplies partiellement ou entièrement par des ciments de dolomite en forme de selle. Cette dolomite matricielle de la phase de minéralisation de même que des ciments de dolomite secondaire en forme de selle et des sulfures de sphalérite et de galène se caractérisent par un appauvrissement en oxygène 18 et un léger appauvrissement en carbone 13; ils présentent des rapports des isotopes du strontium similaires à ceux observés au site de Pine Point. La signature isotopique appauvrie en oxygène 18, qui est un indice de précipitation à des températures plus élevées, est corroborée par des températures élevées d'homogénéisation des inclusions fluides. De plus, les températures de fusion finales de ces inclusions indiquent que les fluides dolomitizants étaient des saumures hypersalées alors que les températures eutectiques ou températures de fusion initiales portent à croire que ces fluides seraient dérivés du système salin NaCl-CaCl₂-H₂O. Ainsi, les minéraux de la phase de minéralisation seraient dérivés de fluides de bassin qui étaient enfouis en profondeur et soumis à des processus diagénétiques à basse température. Les analyses chimiques des inclusions fluides dans la sphalérite et la dolomite indiquent que le fluide porteur était composé de saumures denses. Ces dernières étaient enrichies en brome comparativement à de l'eau de mer, ce qui fait penser que les fluides parentaux se seraient formés à partir d'eau de mer fortement

and Na-rich brines are similar to oilfield brines. However, K/Na values in MVT deposits are greater than ratios found in oilfield brines indicating that MVT ore fluids are more evolved from seawater or partly composed of interstitial fluids from evaporite beds enriched in residual potassium. The deposition of ore-stage dolomite postdated deep burial. Evidence for dolomitization after burial includes crosscutting relationships of the dolomite with depositional fabrics, formational boundaries, and unconformities. Ore-stage dolomite also replaces blocky sparry calcite previously formed in the subsurface, crosscuts stylolites, exhibits greater depleted oxygen-18 isotope values meaning higher precipitation temperatures, and contains two-phase fluid inclusions and fluorescent petroleum inclusions, all indicating deep burial. Fluid inclusion microthermometry measurements in ore-stage dolomite and sphalerite reveal that fluid-filling temperatures are too high to be solely attributed to burial, suggesting that thermal anomalies are necessary in regions of enhanced MVT mineral potential. Investigation of thermal maturity of organic matter at Pine Point discloses a substantial contrast between thermally immature indigenous organic matter in country rock carbonate rocks and mature to overmature bitumens and pyrobitumens proximal to or within orebodies.

Brine springs sampled in northern Alberta are characterized by compositions dominated by NaCl with high levels of sulphate and calcium. Water samples in the Wood Buffalo region are saturated with respect to halite and gypsum whereas Fort McMurray area brines are typically undersaturated in these minerals, consistent with the lack of evaporate deposits in the latter area. Significant differences with respect to Devonian formation waters in northern Alberta and Pine Point are evident in these modern springwater samples. The range of the conservative ion ratio Br/Cl measured in Devonian formation waters indicate original seawater evaporating past halite saturation, thereby producing a bromine enrichment. The springwaters, however, have low Br/Cl values suggesting derivation by dissolution of halite.

Thermal anomalies are confirmed in the northern portion of the study area by the measurement of anomalous heat flows greater than 90 m/Wm^2 . The anomaly is most likely related to enhanced heat generation from zones in basement rocks that are relatively rich in radiogenic minerals in the upper crust. Basement heat flow is greater than the average Precambrian basement heat input and it explains the elevated maximum burial temperatures obtained from homogenization temperatures of saddle dolomite.

évacuée et non pas d'eau de mer ordinaire. Les cations dominants dans les inclusions sont le calcium et le sodium. Ces saumures riches en calcium et en sodium sont similaires aux saumures des champs de pétrole. Toutefois, les rapports K/Na sont plus élevés dans les gisements de type Mississippi-Valley que dans les saumures des champs de pétrole, ce qui indique que les fluides minéralisés des dépôts de type Mississippi-Valley sont davantage dérivés de l'eau de mer ou sont composés en partie de fluides interstitiels provenant de couches d'évaporites enrichies en potassium résiduel. Le dépôt de la dolomite de la phase de minéralisation est postérieur à l'enfouissement en profondeur. Les indices d'une dolomitisation postérieure à l'enfouissement comprennent les relations de recoupement de la dolomite et des fabriques sédimentaires, les limites de formations et les discordances. En outre, la dolomite de la phase de minéralisation remplace la sparite en blocs antérieurement formée dans la subsurface, recoupe des stylolites, est plus appauvrie en oxygène 18 – ce qui témoigne de températures de précipitation plus élevées – et renferme des inclusions liquides biphasées et des inclusions de pétrole fluorescentes, qui dénotent tous un enfouissement en profondeur. La microthermométrie des inclusions fluides dans la sphalérite et la dolomite de la phase de minéralisation révèle que les températures de remplissage par des fluides sont trop élevées pour être uniquement attribuables à l'enfouissement; la présence d'anomalies thermiques serait donc nécessaire dans les régions dont le potentiel en minéralisation de type Mississippi-Valley est plus élevé. L'étude de la maturité thermique de la matière organique au site de Pine Point révèle un contraste marqué entre la roche organique indigène thermiquement immature dans les roches carbonatées encaissantes et les bitumes et pyrobitumes matures à hypermatures adjacents ou inhérents aux corps minéralisés.

Des échantillons d'eau de source saumâtre prélevés dans le nord de l'Alberta se composent principalement de NaCl avec des concentrations élevées de sulfates et de calcium. Des échantillons d'eau prélevés dans la région de Wood Buffalo sont saturés en halite et en gypse, alors que des saumures provenant de la région de Fort McMurray sont en général sous-saturées en ces minéraux, ce qui n'est pas étonnant vu l'absence de dépôts évaporitiques dans cette région. D'importantes différences entre les eaux de formation dévoniennes dans le nord de l'Alberta et celles de Pine Point sont évidentes dans ces échantillons d'eau de source contemporaine. La plage de rapports des ions persistants Br/Cl dans les eaux de formation dévoniennes indique que l'eau de mer d'origine se serait évaporée au-delà de la saturation en halite, donnant ainsi lieu à un enrichissement en brome. Par contre, les eaux de source présentent de faibles rapports Br/Cl, ce qui suggère qu'elles sont dérivées de la dissolution de halite.

La présence d'anomalies thermiques dans la partie nord de la région à l'étude est confirmée par des mesures de flux thermiques anomaux qui dépassent 90 m/Wm^2 . L'anomalie est très probablement reliée à des zones de dégagement accru de chaleur par des roches du socle qui sont relativement riches en minéraux radiogéniques dans la croûte supérieure. Le flux thermique dans le socle est plus important que l'apport moyen de chaleur dans le socle précambrien et explique les températures d'enfouissement maximales élevées obtenues à partir des températures d'homogénéisation de la dolomite en forme de selle.

Previous studies defined a broad westward decrease of oxygen-18 isotope value with the associated increase of homogenization temperature, as well as an increase in strontium isotope ratio in ore-stage carbonate phases along the Presqu'île barrier from Pine Point in southern Northwest Territories to northeastern British Columbia. These geochemical spatial trends were attributed to higher temperature dolomitizing fluids and the influence of siliciclastic sources, respectively. Data from this volume challenge these identified trends and display instead rather variable and inconsistent spatial distributions of stable and radiogenic isotope signatures. The nonmineralized sulphide-free dolomite does not show a westward decrease in oxygen-18 values and mineralized dolomite actually shows a westward increase. This highly variable arrangement of isotopic signature contests the paleohydrological models which infer appropriate uniform spatial trends. Blotchy cathodoluminescence was observed in much dolomite in the study area suggesting recrystallization of the dolomite during progressive burial. Varying geochemistry and nonuniform petrographic characteristics even within individual boreholes suggest recrystallization during progressive burial was inconsistent and may be ultimately more influenced by precursor rock textures than by geographic location.

Evidence presented in this study suggests that ore-stage dolomitization may be related to fluid circulation through extensional faults and karstic pore systems that developed in the Presqu'île barrier. These systems may have facilitated the establishment of crossformational fluid flow and the development of extensive convection cells resulting from spatial variations in relatively high basal heat flow. Continuous recycling of magnesium-rich seawater-derived connate brines by thermal convection flow provides a feasible mechanism for extensive and regional development of hydrothermal dolomite in porous limestone overlying dense dolostone. Stratiform dolomite-cemented breccias or tabular paleokarst form in the upper subhorizontal portions of the convective cells. In areas of upward fluid movement possibly associated with fault zones, chimney-like dolomite bodies extend upward from tabular horizons to levels beneath overlying impermeable siliciclastic rocks, forming prismatic paleokarst. The variability in isotopic data, even at a borehole scale, can be attributed to temporal or spatial variation in heat flow or the degree of recrystallization as a function of fluid-rock interaction.

A significant increase of the radiogenic strontium isotope proximal to the Great Slave Shear Zone suggests a key role attributable to fluid movement through the zone. Radiogenic strontium indicates derivation from basement rocks and the shear zone provided a favourable site for the upward circulation of hydrothermal fluids from basement and precipitation of

Des études antérieures ont décrit une diminution générale en direction de l'ouest des concentrations d'oxygène 18 avec l'augmentation associée des températures d'homogénéisation, de même qu'une augmentation du rapport des isotopes du strontium dans les carbonates de la phase de minéralisation le long de la barrière de Presqu'île depuis Pine Point dans le sud des Territoires du Nord-Ouest jusqu'à dans le nord-est de la Colombie Britannique. Ces tendances géochimiques spatiales ont été attribuées respectivement à des fluides dolomitizants de température plus élevée et à l'influence des sources silicoclastiques. Les données du présent volume remettent en question ces tendances et indiquent plutôt une répartition spatiale assez variée et irrégulière des signatures des isotopes stables et radiogéniques. La dolomite non minéralisée et dépourvue de sulfures ne présente aucune diminution vers l'ouest des concentrations d'oxygène 18 alors que la dolomite minéralisée présente en fait une augmentation vers l'ouest de ces concentrations. Cet agencement très variée des signatures isotopiques remet en question les modèles paléohydrologiques qui proposent des tendances spatiales uniformes appropriées. Une cathodoluminescence marbrée a été observée dans une bonne partie de la dolomite de la région à l'étude, ce qui porte à croire qu'il y a eu une recrystallisation de la dolomite lors de l'enfouissement progressif. Des caractéristiques géochimiques et pétrographiques variables, même à l'emplacement de forages individuels, donnent à penser que la recrystallisation lors de l'enfouissement progressif a été erratique et pourrait avoir été davantage influencée par les textures préexistantes de la roche que par l'emplacement géographique.

Les observations présentées ici suggèrent que la dolomitisation pendant la phase de minéralisation pourrait être associée à la circulation des fluides dans des failles de distension et des réseaux karstiques interstitiels qui se sont développés dans la barrière de Presqu'île. Ces réseaux pourraient avoir facilité l'écoulement de fluides à travers les formations et la formation de vastes cellules de convection résultant des variations spatiales du flux thermique de base relativement élevé. Le recyclage continu, par des flux de convection thermique, des saumures connées riches en magnésium et dérivées d'eau de mer représenterait un mécanisme possible menant à la formation régionale et répandue de dolomite hydrothermale dans du calcaire poreux sus-jacent à de la dolomie dense. Des brèches stratiformes à ciment dolomitique ou un paléokarst tabulaire se forment dans les parties subhorizontales supérieures des cellules de convection. Dans les zones de mouvement ascendant des fluides, qui peuvent être associées à des zones de failles, des corps de dolomite en forme de cheminée s'étendent vers le haut depuis des horizons tabulaires jusqu'à des niveaux sous des roches silicoclastiques imperméables sus-jacentes, formant ainsi un paléokarst prismatique. La variabilité des données isotopiques, même à l'échelle du forage, peut être attribuée à une variation temporelle ou spatiale du flux thermique ou au degré de recrystallisation en fonction de l'interaction fluide-roche.

Une augmentation importante en isotopes radiogéniques du strontium à proximité de la zone de cisaillement du Grand lac des Esclaves donne à penser que les mouvements de fluides dans la zone auraient joué un rôle clé. La présence de strontium radiogénique témoigne d'une dérivation à partir des roches de socle; la zone de cisaillement s'est avérée propice à la circulation ascendante des fluides hydrothermaux depuis le socle et à la

hydrothermal dolomite and sulphides in overlying porous carbonate successions.

A distinct, homogeneous, nonradiogenic lead isotope signature characterizes the sulphides in the Pine Point district as well as in sulphide samples collected proximal to the Great Slave Shear Zone in northwestern Alberta and within the Cordova Embayment. This lead isotope cluster, dissimilar to the radiogenic isotope signature found in Cordilleran carbonate deposits, was not expected to be present near the Shear Zone and in the Embayment. The homogeneous nonradiogenic signature suggests either a single source for the lead, or thorough mixing after extraction from several sources.

Post-ore calcite displays depleted oxygen-18 and carbon-13 isotope signatures compared to pre-ore calcite. The higher precipitation temperatures associated with depleted oxygen-18 can be attributed to burial. The fluid inclusion melting temperatures of these burial calcites indicate a less saline parent fluid of dissimilar brine composition ($\text{NaCl-H}_2\text{O}$) to earlier carbonate phases. Homogenization temperatures in late-stage calcite are generally cooler than those of saddle dolomite. Cooler filling temperatures and reduced salinity may have been brought about by later introduction and mixing of meteoric water.

Exploration methods for MVT deposits in the project area include mapping of favourable geological features, surficial geochemical surveys, and geophysical surveys. Diagnostic geological features established during extensive exploration at Pine Point should be applicable for MVT exploration elsewhere in the project area. Such geological features include carbonate platform successions on the flanks of large and deep sedimentary basins, unconformities, paleokarsts, arching or flexing of underlying basement that may define zones of enhanced fluid movement, basement faults, dolostone successions associated with evaporitic strata and organic matter, highly permeable and porous zones, white sparry dolomite, and collapse breccias. Most MVT deposits have minor geochemical signature because of limited primary dispersion of the elements bounded in sphalerite or galena into the surrounding carbonate rocks. However, when sufficient weathering of sulphides occur, soil and stream sediments proximal to sulphide deposits may contain anomalous concentrations of Pb, Zn, or Fe. At Pine Point, zinc anomalies are prominent in lake sediments and soils, but not all zinc anomalies are associated with an orebody. Major organic-rich shale units give zinc background values similar in magnitude to anomalies associated with orebodies. Commonly, the same shale has low lead content. Therefore, areas of composite lead-zinc anomalies may indicate MVT sulphide mineralization. Regional geophysical techniques such as seismic,

précipitation de dolomite hydrothermale et de sulfures dans les successions carbonatées poreuses sus-jacentes.

Une signature distinctive et homogène en isotopes non radiogéniques du plomb caractérise les sulfures du district de Pine Point tout comme les échantillons de sulfures recueillis à proximité de la zone de cisaillement du Grand lac des Esclaves, dans le nord-ouest de l'Alberta et à l'intérieur du rentrant de Cordova. La présence de ce groupe d'isotopes de plomb, dont la signature est différente de celle des isotopes radiogéniques dans les roches carbonatées de la Cordillère, n'avait pas été prévue près de la zone de cisaillement et dans le rentrant. La signature non radiogénique homogène fait penser qu'il y a eu une source unique de plomb, ou encore un mélange complet après l'extraction depuis plusieurs sources.

La calcite formée après la minéralisation, contrairement à celle formée avant, présente des signatures appauvries en oxygène 18 et en carbone 13. Les températures de précipitation plus élevées associées à l'appauvrissement en oxygène 18 sont attribuables à l'enfouissement. Les températures de fusion des inclusions fluides dans cette calcite enfouie indiquent un fluide parental de salinité moindre et dont la composition des saumures est différente ($\text{NaCl-H}_2\text{O}$) de celles des phases carbonatées antérieures. Les températures d'homogénéisation dans la calcite de formation tardive sont généralement inférieures à celles de la dolomite en forme de selle. Des températures de remplissage moins élevées et une salinité réduite pourraient avoir été causées par l'apport ultérieur d'eaux météoriques et le mélange avec ces eaux.

La cartographie des entités géologiques favorables, les levés géochimiques en surface et les levés géophysiques sont des méthodes d'exploration des gisements de type Mississippi-Valley dans la région du projet. Les entités géologiques caractéristiques identifiées au moment de l'exploration à fond du site de Pine Point devraient pouvoir servir pour l'exploration à la recherche de gisements de type Mississippi-Valley ailleurs dans la région du projet. Elles comprennent les successions de plates-formes carbonatées sur les flancs de grands bassins sédimentaires profonds, les discordances, les paléokarsts, le bombement ou la flexion du socle sous-jacent pouvant définir des zones de mouvements accrus de fluides, les failles du socle, les successions de dolomie associées à des strates d'évaporites et à de la matière organique, les zones hautement perméables et poreuses, la dolomite spathique blanche et les brèches d'effondrement. La plupart des gisements de type Mississippi-Valley ne présentent qu'une signature géochimique mineure en raison d'une dispersion primaire restreinte dans les roches carbonatées environnantes des éléments liés dans la sphalérite ou la galène. Toutefois, lorsqu'il y a altération suffisante des sulfures, les sols et les sédiments des cours d'eau à proximité des gisements de sulfures peuvent contenir des concentrations anormales de plomb, de zinc ou de fer. Au site de Pine Point, les anomalies en zinc sont importantes dans les sédiments lacustres et les sols mais ne sont pas toutes associées à des corps minéralisés. Les unités majeures de shale riche en matière organique ont des concentrations de fond de zinc d'un même ordre de grandeur que les anomalies associées à des corps minéralisés. Généralement, le même shale présente de faibles concentrations de plomb. Ainsi, les zones d'anomalies composites de plomb-zinc peuvent indiquer la

gravity, and magnetic surveys have been successful in identifying basement highs and subsurface faults. Property-scale techniques are limited because of the open-space filling nature of MVT ore, where gangue minerals and sphalerite interrupt conducting paths between conducting minerals, thereby limiting the usefulness of self-potential and electromagnetic surveys. However, at Pine Point, induced polarization proved to be a powerful tool for finding new orebodies, but only when sufficient conducting minerals are present. If an orebody dominantly consists of sphalerite with low quantities of galena, marcasite, or pyrite, the induced polarization signal is too weak for positive identification of an orebody. Gravity methods have been proven to be useful as a complementary tool with induced polarization surveys in locating sphalerite-rich orebodies at Pine Point, because of the significant contrast in density between sphalerite and the country rock.

Mineral prospectivity mapping for MVT deposits in the Pine Point district was conceptually evaluated by applying critical genetic features to empirical evidence of mineralization, such as orebodies, visible sulphide occurrences in outcrop and core, and anomalous geochemical zones. Critical components of a regional-scale MVT system are all related to fluid flow during dynamic basin evolution. The five critical components describing a regional hydrothermal system include energy, ligand source, metal source, transport pathways, and trap zones. The first three components cannot be predicted because of the unresolved controversy of these sources in the various genetic models. Transport pathways and trap zones, however, can be predicted, and these components are related to specific structural and stratigraphic features associated with MVT deposition. Such features include major basement lineaments and faults, carbonate aquifers, basement highs, fluid outflow or discharge sites, and alteration zones.

présence de minéralisations en sulfures de type Mississippi-Valley. Les méthodes géophysiques appliquées à l'échelle régionale comme les levés sismiques, gravimétriques et magnétiques ont permis d'identifier des hauteurs du socle et des failles subsuperficielles. Les méthodes appliquées à l'échelle de la propriété sont d'une utilité limitée en raison de la tendance du minerai de type Mississippi-Valley à remplir des cavités, là où des minéraux de gangue et la sphalérite tronquent le passage de courant entre minéraux conducteurs, limitant ainsi l'utilité des levés de potentiel spontané et des levés électromagnétiques. Toutefois, la polarisation provoquée s'est avérée être un outil efficace dans la recherche de nouveaux corps minéralisés à Pine Point, mais uniquement lorsque qu'il y a une présence suffisante de minéraux conducteurs. Si un corps minéralisé contient principalement de la sphalérite avec de faibles quantités de galène, de marcasite ou de pyrite, le signal de polarisation provoquée est trop faible et ne permet pas l'identification certaine d'un corps minéralisé. La prospection gravimétrique s'est avérée utile comme outil complémentaire à la polarisation provoquée pour la détection des corps minéralisés riches en sphalérite à Pine Point en raison du contraste important entre les densités de la sphalérite et de la roche encaissante.

La cartographie du potentiel minier en gisements de type Mississippi-Valley du district de Pine Point a été évaluée sur le plan conceptuel par l'application d'entités génétiques critiques à des indications empiriques de minéralisation comme les corps minéralisés, les indices de sulfures visibles dans les affleurements ou les carottes ou la présence de zones d'anomalies géochimiques. Les éléments critiques d'un système de type Mississippi-Valley d'échelle régionale sont tous associés à l'écoulement de fluides durant l'évolution dynamique des bassins. Les cinq éléments essentiels qui caractérisent un système hydrothermal régional sont l'énergie, une source de ligand, une source de métaux, des voies de cheminement et des zones pièges. On ne peut prévoir l'existence des trois premiers éléments en raison de la controverse entourant ces sources dans les différents modèles génétiques. Toutefois, il est possible de prévoir les voies de cheminement et les zones pièges, ces éléments étant reliés à des entités structurales et stratigraphiques spécifiques associés à la mise en place des gisements de type Mississippi-Valley. Parmi ces entités on compte les failles et les linéaments majeurs du socle, les aquifères carbonatés, les hauteurs du socle, les sites de débit ou de déversement des fluides et les zones d'altération.