# Université du Québec INRS-ETE

# Analyse intégrée de données géophysiques et géologiques, Nord-Est de la Gaspésie : nouvelle avenue pour l'exploration minière et pétrolière

Par Christine St-Laurent

# Mémoire présenté Pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.) en Sciences de la Terre

# Jury d'évaluation

Président du Jury et examinateur interne

Examinateur externe

Directeur de recherche

Codirecteur de recherche

Sébastien Castonguay

Pierre Keating

Daniel Lebel Commission géologique du Canada

Michel Malo INRS-ETE

© droits réservés de Christine St-Laurent, 2003

# Résumé

Dans la région de Gaspé, les relations entre la zone de Humber, la zone de Dunnage et la couverture sédimentaire siluro-dévonienne de la ceinture de Gaspé sont complexes. Malgré quantité d'études réalisées sur la géologie de cette région, des incertitudes demeurent quant à la compréhension de celle-ci. Il est donc opportun de se tourner vers de nouvelles méthodes de recherche et d'exploration. Le but de la présente étude est d'analyser l'utilité de données aéromagnétiques de haute résolution combinées aux informations géologiques et géophysiques connues pour améliorer la carte géologique de la région de Gaspé et d'obtenir une nouvelle interprétation de la géologie de surface et des structures profondes de l'Est de la Gaspésie.

Cette analyse a été réalisée en intégrant les données et connaissances géologiques et géophysiques provenant de différentes sources. Le gradient vertical a été calculé à partir du levé aéromagnétique de base afin de mettre en évidence les anomalies magnétiques générées près de la surface. Les informations cartographiques structurales et stratigraphiques ont été superposées afin de faire une interprétation préliminaire du levé magnétique. Celle-ci a permis d'identifier dans la couverture sédimentaire siluro-dévonienne plusieurs signatures magnétiques associées à la géologie de surface. De grandes anomalies de forte importance et de formes ovoïdes sont associées au soubassement de la couverture siluro-dévonienne, car aucune unité de cette couverture n'est compatible avec une telle signature.

Le passage du levé magnétique dans des filtres passe-haut et passe-bas a permis de clarifier certaines signatures magnétiques et de confirmer que les anomalies ovoïdes prennent source en profondeur. L'association du levé passé au filtre passe-bas au levé gravimétrique de la région montre que la plus importante des anomalies ovoïdes est associée à une anomalie gravimétrique. Des sources d'anomalies magnétiques et gravimétriques importantes sont présentes en profondeur sous la couverture silurodévonienne et sont vraisemblablement associées à des roches ultramafiques ou volcaniques. Ces anomalies pourraient refléter un équivalent en profondeur des lithologies du Complexe de Lady Step, du Groupe de Shickshock ou du Complexe du

I

Mont Albert. Afin de tester cette hypothèse, des modélisations magnétique et gravimétrique en 2<sup>1</sup>/<sub>2</sub> dimensions ont été réalisées.

L'association de la géochimie de ruisseau avec le levé aéromagnétique haute résolution ainsi que la superposition du même levé passé au filtre passe-haut sur un modèle d'élévation numérique sont des techniques qui ont également été utilisées mais qui n'ont pas donné de résultats concluants pour la région de Gaspé. Cependant, il n'est pas exclu que ces méthodes soient utiles dans un autre cadre géologique que celui de la région de Gaspé. Un levé bathymétrique, doublé d'un levé magnétique sous-marin effectués au large de la région de Gaspé ont également été étudiés. L'étude de la topographie du fond marin au large de la région de Gaspé a permis d'associer celle-ci à certains éléments structuraux connus. Le levé magnétique fait de concert avec le levé bathymétrique a mis en évidence certains traits magnétiques concordants avec le levé magnétique terrestre.

Le levé magnétique haute résolution combiné aux informations géophysiques et géologiques connues a permis de mieux positionner des structures et des éléments stratigraphiques connus. L'utilisation combinée de différents outils d'exploration dans la région de Gaspé et la compilation des données ainsi obtenues ont permis de mettre en évidence des éléments de la géologie qui n'apparaissent pas en surface. L'usage d'outils d'exploration géophysique est donc un complément précieux pour raffiner la cartographie traditionnelle et l'exploration. Ces outils ainsi que le traitement et la compilation des données sur un support informatique sont appelés à prendre de plus en plus de place dans le travail des géologues car ils permettent une meilleure compréhension de la disposition de la géologie de la région, autant en surface qu'en sous-surface.

Christine St-Laurent Étudiante

Daniel Lebel Directeur de recherche

Π

# Remerciements

Je tiens à remercier mon directeur de maîtrise, Daniel Lebel, pour ses précieux conseils et sa patience, ainsi que mon co-directeur de maîtrise, Michel Malo pour son support et son intérêt dans mes travaux. Je tiens également à remercier Denis Lavoie qui m'a été d'une aide inestimable pour la logistique de terrain, sur le terrain même et dans la rédaction de l'article du chapitre 3. Le levé aéromagnétique haute-résolution qui a servi de base à ce projet a été gracieusement fourni par Fugro Airborne Surveys Quebec, par le biais de Camille St-Hilaire que je remercie pour sa collaboration et son intérêt pour mes travaux. Les levés bathymétrique et magnétique faits au large de la péninsule gaspésienne ont été exécutés et fournis par Bob Courtney, de la Commission géologique du Canada (Atlantique). Je remercie Daniel Brisebois du Ministère des Ressources naturelles, Faune et Parcs pour m'avoir fourni une version informatisée à jour de ses travaux dans la région de Gaspé. Les travaux de terrain auraient été beaucoup plus ardus sans la présence de Johanne Paradis, assistante de terrain, qui a su se rendre indispensable durant cette période. J'aimerais également exprimer ma gratitude à André Chagnon qui m'a aidée et conseillée en ce qui a trait au traitement des échantillons et aux travaux de laboratoire. Finalement, j'aimerais étendre mes remerciements à Kathleen Lauzière et Christine Deblonde pour leur support technique et leur disponibilité, à Pierre Keating, Régis Dumont et Warner Miles pour le traitement du levé à un moment ou un autre du projet ainsi qu'à tout le personnel et à mes collègues étudiants du Centre géoscientifique de Québec.

# Table des matières

RésuméI
Remerciements III
Table des matières
Liste des figuresVII
Liste des tableauxIX
Introduction
Chapitre 1 : Problématique, objectifs et méthodologie de la recherche
1.1 Problématique2
1.2 Objectifs de la recherche
1.3 Méthodologie de la recherche
1.3.1 Travaux de terrain
1.3.2 Travaux de laboratoire
1.3.3 Intégration de données7
Chapitre 2: Géologie de la région de Gaspé
2.1 Géologie structurale
2.1.1 Faille du Bassin Nord-Ouest
2.1.2 Faille du Troisième Lac10
2.2 Stratigraphie10
2.2.1 Groupe de Shickshock
2.2.2 Complexe de Lady Step11
2.2.3 Groupe de Matapédia12
2.2.4 Groupe de Chaleurs 12
2.2.5 Calcaires supérieurs de Gaspé15
2.2.6 Grès de Gaspé
Chapitre 3 : Integration and spatial analysis of high-resolution physical and geological
data, Eastern Gaspé Peninsula
3.1 Introduction
3.2 Geological setting
3.2.1 Humber Zone

3.2.2 Dunnage zone	. 27
3.2.3 Silurian-Devonian sedimentary cover and related structures	. 27
3.3 Methodological approach	. 30
3.3.1 Processing method	. 30
3.3.2 Magnetic grid preliminary data treatment	. 31
3.3.3 Field surveys	. 33
3.4 Data integration	. 33
3.4.1 Vertical gradient geophysical analysis	. 33
3.4.2 Data filtering	. 35
3.4.3 Gravimetric analysis	. 39
3.4.4 Field survey results	. 41
3.4.5 Laboratory results	. 43
3.5 Interpretation	. 46
3.6 Discussion	. 51
3.7 Conclusions	. 55
Chapitre 4 : Autres analyses et résultats	. 57
4.1 Analyse des données géochimiques de ruisseau	. 57
4.2 Analyse de la relation entre la topographie et les anomalies magnétiques	. 57
4.3 Résultat des levés bathymétrique et magnétique	. 59
4.3.1 Levé bathymétrique	. 59
4.3.2 Levé magnétique	. 61
Chapitre 5 : Modélisation magnétique et gravimétrique	. 64
5.1 Méthodes	. 64
5.2 Présentation des résultats	. 70
5.3 Analyse des résultats	. 71
5.3.1 Modélisation magnétique	. 72
5.3.2 Modélisation gravimétrique	. 74
5.4 Pertinence des modèles	. 76
Conclusion	. 78
Références	. 81



# Liste des figures

Figure 1: Colonne stratigraphique des secteurs de Gaspé et de l'anticlinal de la rivière St-
Jean
Figure 2 : Simplified geological map of the Gaspé Peninsula, Québec Appalachians 22
Figure 3 : Detailed geological map of the Town of Gaspé area
Figure 4: Diagram showing the methodology used to process and analyze the different
type of data
Figure 5: Total residual magnetic field
Figure 6 : Vertical gradient map derived from the original aeromagnetic survey
Figure 7 : Vertical gradient map superposed over the geological map of Gaspé area 35
Figure 8: Example of the effects of high-pass and low-pass filters over the original
magnetic signal
Figure 9 : High-resolution magnetic map after a low-pass filter run at 3200 metres 37
Figure 10 : High-resolution magnetic map after a high-pass filter run at 3200 metres 38
Figure 11 : High-resolution magnetic map after a high-pass filter run at 2000 metres 39
Figure 12 : Contoured Bouguer anomaly map
Figure 13 : Regional Gaspé Peninsula Bouguer anomaly map
Figure 14 : Stratigraphic - magnetic column from magnetic susceptibility data collected
during the field survey
Figure 15: Backscattered electron image showing the most common minerals found in
the Battery Point magnetic sandstones
Figure 16: Map showing the near-surface anomaly traces derived from the vertical
gradient and high-resolution magnetic map after high-pass filter runs at 2000 metres
Figure 17 : Contoured Bouguer anomaly map draped on the 3D magnetic model
Figure 18 : Schematic structural cross-sections
Figure 19 : Rendu en 3D de la superposition des données filtrées à 3200 m sur le modèle
d'élévation numérique de la topographie de la région de Gaspé

Figure 20: Levé bathymétrique effectué le long de la péninsule de Forillon et dans
l'embouchure de la Baie de Gaspé60
Figure 21: Partie sud du levé bathymétrique
Figure 22: Levé magnétique marin de la pointe de Forillon et de la Pointe St-Pierre 63
Figure 23: Localisation des coupes utilisées pour la modélisation gravimétrique
superposée au levé régional de l'anomalie de Bouguer67
Figure 24: Localisation du profil géophysique pour le levé magnétique haute résolution et
l'anomalie de Bouguer
Figure 25: a) Profil de l'anomalie gravimétrique accompagné de l'anomalie régionale
estimée
Figure 26: Polygones utilisés dans le cadre des modélisations magnétique et
gravimétrique
Figure 27: Profil magnétique accompagné des trois courbes modélisées
Figure 28: Profil gravimétrique accompagné des trois courbes modélisées
Figure 29: Profils magnétique et gravimétrique superposées

# Liste des tableaux

Table 1: aerial survey parameters
Table 2 : Heavy minerals neutron activity analysis results for two of the high-magnetic
susceptibility samples
Table 3 : Trace and Rare Earth Elements geochemical results for both the high- and low-
magnetic susceptibility samples
Table 4: Average magnetic susceptibilities of some minerals 45
Tableau 5 : Paramètres utilisés dans les modélisations magnétique et gravimétrique 65

# Introduction

La région de Gaspé se situe à l'extrémité nord-est de la péninsule gaspésienne. Elle se trouve à cheval sur la zone de Humber, la zone de Dunnage et la couverture silurodévonienne des Appalaches. C'est une région-clé dans la compréhension de la géologie de l'est de la péninsule gaspésienne pour mieux cerner l'évolution des déformations, reconnaître des failles majeures et comprendre le cadre stratigraphique et sédimentologique régional.

C'est pour ces raisons qu'un grand nombre d'études, de travaux cartographiques, de levés sismiques et de forages se sont succédés dans cette région depuis plus de 100 ans. Malgré tous ces travaux, il demeure des lacunes importantes dans les connaissances et l'interprétation de la géologie de cette région. La présente étude vise à combler certaines de ces lacunes grâce à l'utilisation de levés géophysiques, l'intégration de ceux-ci avec les données géologiques disponibles et l'interprétation de la synthèse des données ainsi obtenue. Cette étude fait partie du projet *Évolution de la marge laurentienne au Paléozoïque: les ponts géologiques de l'Est du Canada (CARTNAT)* de la Commission géologique du Canada, qui a pour objectif de reconstruire l'évolution et l'architecture de la marge continentale orientale de Laurentia au Paléozoïque.

Ce mémoire de maîtrise comporte 5 chapitres: le chapitre 1 porte sur la problématique et les objectifs de la recherche et sur la méthodologie utilisée. Le chapitre 2 est consacré à l'article *Integration and spatial analysis of high-resolution geophysical and geological data, Eastern Gaspé Peninsula*, qui a été soumis pour publication dans le Journal canadien des sciences de la Terre. Le chapitre 3 est consacré à la présentation et l'analyse des résultats qui n'ont pas été inclus dans l'article du chapitre 2. Le chapitre 4 porte sur la modélisation magnétique et gravimétrique. Finalement, le chapitre 5 porte sur la géologie de la région de Gaspé et est un complément aux éléments géologiques décrits dans le chapitre 2.

# Chapitre 1 : Problématique, objectifs et méthodologie de la recherche

# **1.1 Problématique**

L'est de la Gaspésie est une région qui a fait l'objet de l'attention de plusieurs générations de géologues. Un grand nombre d'études gouvernementales, académiques et industrielles se sont succédées dans la région de Gaspé depuis plus de 100 ans. En effet, les affleurements côtiers sont particulièrement bien exposés et on y retrouve la présence d'huile dans la succession siluro-dévonienne (Lavoie et Bourque, 2001) ainsi que de gaz (champ gazier Galt, Lavoie et al., 2001). Sans faire un inventaire exhaustif, mentionnons: les rapports géologiques de Béland (1980), Berger et Ramsay (1993) et de Brisebois (1981), la carte à l'échelle 1 :250 000 de la Gaspésie (Brisebois et al. 1991), les travaux liés à l'exploration pétrolière ainsi que les nombreux travaux universitaires et de la Commission géologique du Canada. Cependant, la cartographie géologique conventionnelle a atteint ses limites sans apporter de nouveaux éléments à notre compréhension, puisque tous les affleurements accessibles ont déjà fait l'objet d'études. Afin de combler les lacunes qui demeurent dans les connaissances et l'interprétation de cette région, il faut donc se tourner vers d'autres outils et méthodes pour acquérir de nouvelles données sur les différents aspects de la géologie de la région.

En 1997, SIAL Géosciences Inc. (maintenant Fugro Airborne Surveys Quebec) a réalisé un levé magnétique aéroporté de haute résolution de tout le secteur Nord-Est de la péninsule gaspésienne à l'aide d'un avion Piper Navajo PT-31 et d'un magnétomètre à vapeur de césium Geometrics G822-A. Ce levé a été fait dans le but d'offrir un nouvel outil d'exploration aux géologues et aux prospecteurs qui oeuvrent en Gaspésie. Dans le but de démontrer l'utilité d'un tel levé, SIAL a fourni à la Commission géologique du Canada une partie des données du levé magnétique. La région de Gaspé a semblé être l'endroit tout désigné pour ce genre d'exercice puisqu'elle se trouve à la rencontre de la zone de Humber, de la zone de Dunnage et de la couverture siluro-dévonienne du synclinorium de Connecticut Valley-Gaspé. De plus, elle est traversée par deux failles qui ont une orientation semblable, soit du nord-ouest au sud-est. Il s'agit de la faille du Bassin Nord-Ouest et de la faille du Troisième Lac, toutes deux de décrochement dextre. C'est une région à la géologie complexe dont l'architecture de sous-surface, malgré les forages qui ont été faits dans le cadre de l'exploration pétrolière, reste assez mal définie.

# **1.2** Objectifs de la recherche

Le but principal de la présente recherche est d'analyser l'utilité de données aéromagnétiques de haute résolution pour améliorer la carte de la région de Gaspé, les connaissances géologiques et les modèles d'exploration pour la Gaspésie, à partir d'une zone cible complexe.

L'interprétation des données géophysiques et géologiques de la région de Gaspé devrait permettre une nouvelle interprétation de la géologie de surface et des structures profondes de l'Est de la Gaspésie.

L'élaboration d'une méthode d'intégration des données géologiques et géophysiques sera également abordée dans cette étude. La grande quantité et la diversité des données qui sont intégrées dans cette étude rendent essentiel l'utilisation d'un protocole d'analyse, ceci afin de tenir compte des nombreuses facettes géologiques et géophysiques de la région.

# **1.3 Méthodologie de la recherche**

Ce projet de recherche, démarré en 2000, a comporté des travaux de terrain, de laboratoire, des compilations de données et finalement l'analyse intégrée des données recueillies. Les méthodes de recherche employées sont décrites sommairement ci-après.

#### 1.3.1 Travaux de terrain

Dans le cadre de ce projet, des travaux de terrain ont été effectués. Ceux-ci ont été réalisés en deux volets. Dans un premier temps, un levé bathymétrique doublé d'un levé magnétique a été réalisé aux abords de la région de Gaspé. La seconde partie a consisté en des travaux de terrain au cours desquels la susceptibilité magnétique des différentes formations de la région de Gaspé a été relevée.

3

## 1.3.1.1 Travaux en mer

Les levés bathymétrique et magnétique qui ont été réalisés aux abords de la péninsule de Forillon, à l'embouchure de la Baie de Gaspé et aux abords de la Pointe St-Pierre par une équipe dirigée par Robert Courtney, géologue à la Commission géologique du Canada, division Atlantique. Dans le cadre de la présente recherche, ces levés visaient à déterminer comment les structures et formations qui croisent la côte et se poursuivent au large de celle-ci.

Ces levés ont été effectués au cours du mois de juillet 2000 et se sont échelonnés sur une semaine. Ils ont été réalisés à bord du bateau de la Garde côtière du Canada, le Frederick G. Creed, qui est un navire de 20 mètres de long. L'équipement utilisé dans le cadre de ces travaux comprenait une torpille servant au levé magnétique et un système bathymétrique multifaisceaux Simrad EM 1000. Ce dernier est un échosondeur multifaisceaux de 95 kHz capable de cartographier le plancher marin à une profondeur variant entre 3 et 1000 mètres sous le transducteur.

# **1.3.1.2 Travaux sur terre**

Les travaux de terrain ont été effectués au cours du mois d'août 2000. Ils avaient pour but de déterminer la susceptibilité magnétique des roches des différentes formations de la région de Gaspé et de déterminer quelle était la source de l'anomalie magnétique au niveau des grès des formations de Battery Point et de York River. L'appareil utilisé pour déterminer la susceptibilité magnétique de la roche est un susceptibilité mètre KT-9 de la compagnie Exploranium. Une collecte d'échantillons représentatifs des lithologies de la région a été réalisée. De même, des échantillons de roche présentant une susceptibilité magnétique notablement plus élevée que les roches de même type à l'intérieur d'une même formation ont également été prélevés pour examen ultérieur et éventuellement, analyses en laboratoire. Les levés ont été en grande partie faits le long de routes, rivières et de la côte.

L'utilisation du susceptibilité mètre sur le terrain ne s'est pas fait sans problèmes. En effet, suite à un bris de l'appareil, les mesures ont été prises avec le « pin » (petit embout de caoutchouc dont la fonction est de créer un espace constant entre la roche et l'appareil) alors que seule la fonction sans « pin » était disponible, fonction nécessitant que l'appareil soit collé à la roche pour prendre les mesures. Ce problème a entraîné la prise de mesures plus basses qu'elles n'auraient dû l'être. Il a été corrigé par la multiplication des données recueillies par un facteur de 2.39, qui est le ratio entre les deux facteurs de calibration des modes « pin » et sans « pin ».

La susceptibilité magnétique est définie comme étant une mesure de la facilité avec laquelle on peut aimanter un matériau par induction. Elle dépend de facteurs tels que la présence de minéraux magnétiques, la forme et la taille des grains et la température de formation. Elle varie considérablement entre différents minéraux et roches. De plus, elle est variable à l'intérieur d'un même type de roche. La susceptibilité magnétique (k) est dérivée du rapport

## k = I/H

où I est l'intensité de l'aimantation induiteet H représente le champ magnétique (variables mesurées en Ampère / mètre). La susceptibilité magnétique k ne possède pas d'unités. L'aimantation induite est la force du champ magnétique généré par le matériel magnétique en présence du champ inducteur (Goodacre et al., 1997).

# 1.3.2 Travaux de laboratoire

Le but premier des travaux de laboratoire était de déterminer quelle est la relation entre la pétrographie des grès de Gaspé et leur susceptibilité magnétique. Deux approches ont été utilisées pour aborder ce problème. Dans un premier temps, une analyse des minéraux lourds a été réalisée afin de déterminer quelle était la relation entre ceux-ci et la susceptibilité magnétique. Dans un deuxième temps, les échantillons possédant une susceptibilité magnétique plus élevée ainsi que des échantillons-type ont subi une analyse

chimique de la roche totale afin de déterminer la relation entre le contenu total de la roche et sa susceptibilité magnétique. Ces deux méthodes d'analyses ont été réalisées dans le but de déterminer s'il existait des associations intéressantes, directes ou indirectes, entre la susceptibilité magnétique et la teneur des minéraux contenus dans les échantillons. Cette approche pourrait devenir une avenue intéressante pour, par exemple, repérer des paléoplacers en repérant des anomalies magnétiques sur un levé du même type que celui qui est étudié dans le présent travail. En complément de ces analyses, des examens des minéraux opaques au microscope optique et au microscope à balayage électronique ont été réalisés.

#### **1.3.2.1 Analyse des minéraux lourds**

Deux échantillons de grès provenant d'emplacements où la susceptibilité magnétique était la plus élevée ont été broyés puis envoyés dans un laboratoire spécialisé (Actlabs) pour séparer et analyser les minéraux lourds présents dans la roche. La séparation des minéraux lourds puis la mesure de masse des fractions obtenues a permis de déterminer la proportion de minéraux lourds dans les échantillons analysés. L'analyse des minéraux lourds à l'aide de la méthode d'activation neutronique a permis de déterminer la quantité d'une vaste gamme d'éléments présents dans ces mêmes minéraux.

# 1.3.2.2 Géochimie

Huit échantillons ont été sélectionnés puis broyés pour être analysés en géochimie. Deux de ces échantillons provenaient de la même source que ceux dont les minéraux lourds ont été analysés par activation neutronique et possédaient une susceptibilité magnétique similaire. Ils ont été analysés à des fins de comparaison. Deux autres échantillons ont été sélectionnés en raison de leur susceptibilité élevée. Quatre des six autres échantillons constituent deux paires d'échantillons provenant de deux affleurements différents. Dans chaque paire, un échantillon possède une susceptibilité magnétique élevée et l'autre une susceptibilité faible. L'analyse de ces paires avait pour but de déterminer la relation entre le contenu d'un échantillon et sa susceptibilité magnétique. Les deux derniers échantillons sont de faible susceptibilité magnétique et proviennent d'affleurements différents.

L'analyse géochimique de tous les échantillons avait pour but de déterminer la relation entre la géochimie totale d'un échantillon et sa susceptibilité magnétique.

## **1.3.2.3** Examen au microscope de lames minces

Six des huit échantillons dont la composition géochimique a été analysée ont été sélectionnés pour la fabrication de lames minces. Les deux échantillons qui ont été exclus présentaient une faible susceptibilité magnétique. Les lames minces ont été examinées afin de déterminer quels sont les minéraux susceptibles d'influencer la susceptibilité magnétique et quels sont les assemblages minéralogiques associés à ceux-ci. Deux autres lames minces ont été fabriquées à partir de concentré résultant de la concentration des minéraux lourds en provenance de chez Actlabs. Ces lames ont également fait l'objet d'une étude à la microsonde afin de déterminer avec plus de précision la nature des minéraux lourds ainsi que leurs proportions dans les lames.

#### **1.3.3 Intégration de données**

Étant donné la complexité et la quantité de données à traiter dans le cadre de cette recherche, une méthode d'analyse et de traitement a été mise au point. Cette méthode consiste essentiellement à traiter un type de données à la fois en combinaison avec le gradient vertical. À chaque répétition, ou itération, une nouvelle couche de données est ajoutée (figure 4). En plus d'être analysée et interprétée en fonction du levé magnétique, cette couche est également analysée en fonction des autres couches de données. Cette approche permet d'évaluer de manière critique le modèle élaboré à chaque étape et de rechercher une nouvelle source de données qui permettrait de combler adéquatement les lacunes du modèle en cours, ceci jusqu'à ce que le modèle soit satisfaisant. L'outil de cartographie et de compilation Mapinfo a été utilisé pour associer le levé aéromagnétique, le levé gravimétrique, la carte géologique de la région, une carte topographique, un modèle d'élévation numérique, un levé de susceptibilité magnétique ainsi que les cartes des cours d'eau et des routes de la région. Ce programme permet de superposer et de comparer les différents types de données. Vertical Mapper, un outil de modélisation de

données, a été utilisé pour traiter les grilles de données et concevoir des cartes de contour, des modèles en trois dimensions et des coupes à partir de celles-ci.

# Chapitre 2: Géologie de la région de Gaspé

Ce chapitre se veut un complément aux éléments de la géologie qui sont exposés au chapitre 3, dans le cadre de l'article scientifique. Puisque la zone de Humber externe y est traitée, il n'en sera pas fait mention ici. L'accent sera plutôt mis sur la couverture silurodévonienne, la zone de Humber interne et la zone de Dunnage.

# 2.1 Géologie structurale

La région de Gaspé se trouve sur le flanc nord du synclinorium de Connecticut Valley-Gaspé, à cheval sur les zones de Humber et de Dunnage. Cette région possède deux réseaux de failles qui ont une orientation semblable, soit du nord-ouest au sud-est. Il s'agit de la faille du Bassin Nord-Ouest et de la faille du Troisième Lac (figure 2).

#### 2.1.1 Faille du Bassin Nord-Ouest

Selon les travaux de Berger et Ramsay (1993), la faille du Bassin Nord-Ouest est une faille de décrochement dextre acadienne superposée à une cassure profonde taconique. Ces chercheurs suggèrent que le Complexe de Lady Step aurait d'abord été amené en surface à une époque pré-acadienne, à la faveur d'un mouvement inverse à forte composante horizontale le long d'une cassure majeure, modérément ou fortement inclinée. Le dernier mouvement le long de cette faille serait un mouvement dextre transpressif ayant occasionné un déplacement de l'ordre de 10 kilomètres. Ce mouvement se serait produit lors de la dernière phase de l'Orogénie acadienne (Dévonien moyen) La faille du Bassin Nord-Ouest est également caractérisée par une extension antérieure à ce déplacement (Silurien précoce-Dévonien précoce), comme le souligne des travaux d'analyse de faciès (Bourque, 1990, 2001; Lavoie, 1992b) et de sismique (Rocksandic and Granger, 1981). Cette phase a été assignée à l'orogénie (?) salinique (Bourque *et al.*, 1995). Cette extension précoce dans le nord de la péninsule gaspésienne a été proposée comme étant le résultat d'un affaissement distal de l'avant-pays, résultant de l'empilement tectonique qui se faisait à ce moment à la limite du reentrant de Québec

(Malo, 2001; Kirkwood *et al.*, 2002, sous presse). De plus, Béland (1980) avance que cette faille serait la issue de la réactivation d'un plan de faille plus ancien, d'âge taconien.

# 2.1.2 Faille du Troisième Lac

La faille du Troisième Lac est une zone de faille qui traverse le coin SO de la zone à l'étude. Elle recoupe l'anticlinal de la rivière St-Jean, le synclinal de la rivière Malbaie et les plis intermédiaires. Elle met en contact des roches très plissées. Celles-ci possèdent même localement un clivage (Formation de Fortin), au SO, avec des strates à pendages relativement faibles au NE. Le déplacement le long de cette faille serait dextre (Brisebois 1981).

# 2.2 Stratigraphie

La région de Gaspé est composée d'un ensemble de roches sédimentaires et volcaniques qui ont été mises en place dans des environnements variés, ce qui explique la diversité des roches présentes dans cette région. Cette section regroupe cinq grands ensembles qui ont déjà été brièvement décrits dans le chapitre trois: le Groupe de Shickshock (zone de Humber interne), le Complexe de Lady Step, le Groupe de Chaleurs, les Calcaires supérieurs de Gaspé et les Grès de Gaspé.

# 2.2.1 Groupe de Shickshock

Le Groupe de Shickshock n'est présent que dans une toute petite portion de la région de Gaspé, sous forme de petits affleurements de basalte le long de la rivière Dartmouth, qui n'ont été attachés à aucune partie du Groupe de Shickshock en particulier. Le Groupe de Shickshock se trouve principalement au sein de la nappe du mont Logan, à l'exception du faciès du lac Matapédia et des quelques affleurements de la région de Gaspé. Ce groupe fait partie de la zone de Humber interne et a été subdivisé en quatre assemblages distincts : Lac Guelph, Bras au Saumon, Lac Matapédia et Lac Cascapédia. L'assemblage de Lac Guelph est à prédominance de roches métasédimentaires; l'assemblage de Bras au Saumon consiste essentiellement en roches métavolcaniques; et l'assemblage de Lac

Matapédia est caractérisé par une alternance de roches sédimentaires et de roches volcaniques (Hibbard *et al.* 1995).

## 2.2.2 Complexe de Lady Step

Cette unité (anciennement série de Lady Step) affleure le long de la faille du Bassin Nord-Ouest à environ 20 km au NO de la ville de Gaspé. Elle est composée d'un assemblage de roches intrusives et volcaniques cambro-ordoviciennes métamorphisées au faciès des schistes verts. Selon Berger et Ramsay (1989), le Complexe de Lady Step correspond à une séquence ophiolitique démembrée obductée en surface le long d'une paléosuture (Ligne Baie Verte-Brompton).

Le Complexe de Lady Step a été séparé en trois lithodèmes informels par Berger et Ramsay (1989). En effet, en raison du fait que les contacts entre les lithodèmes n'ont pu être observés directement, les relations entre les unités demeurent incertaines. Les unités sont :

1) La serpentinite de la mine :

celle-ci est composée de roches ultramafiques serpentinisées, notamment des dunites, des wherlites, des webstérites et des hazburgites.

2) Le basalte de Blanchet :

cette unité est composée de basalte schisteux vert, métamorphisé au faciès des schistes verts et composé en grande majorité d'actinote.

3) La tonalite de Salmon Hole :

c'est une roche quartzo-feldspathique contenant une foliation définie par l'alignement de grains de chlorite et de biotite. La roche a été faiblement chloritisée, épidotisée et séricitisée par un métamorphisme au faciès des schistes verts.

# 2.2.3 Groupe de Matapédia

# 2.2.3.1 Formation de White Head

Les plus anciennes roches de la couverture siluro-dévonienne dans la région appartiennent à la Formation de White Head. Dans la région, celle-ci se retrouve dans la zone axiale de l'anticlinal de la rivière Saint-Jean. Elle est divisée en deux membres (Bourque, 1977), soit un membre inférieur constitué de mudstone vert sombre et un membre supérieur composé de calcilutite grise à gris brunâtre en couches minces avec interstrates de shale renfermant des unités de clayshale locales (Bourque *et al.*, 1995).

# 2.2.4 Groupe de Chaleurs

Ce groupe a été mis en place au Silurien-Dévonien basal et regroupe des faciès de plateforme continentale peu profonde à profonde. Dans le secteur nord de la région de Gaspé, le Groupe de Chaleurs est représenté par une succession incomplète, les formations de West Point, de Roncelle et d'Indian Point (Bourque, 2001), reposant en discordance sur les unités plus anciennes de la zone de Humber (Figure 1).

Dans les environs de l'anticlinal de la rivière Saint-Jean, le Groupe de Chaleurs repose plutôt sur la Formation de White Head et est composé des Formations de Burnt Jam Brook, de Laforce et de St-Léon, qui représentent la partie inférieure du Groupe de Chaleurs (Figure 1). À noter que les Formations de Burnt Jam Brook et de Laforce se retrouvent uniquement dans le segment central de la péninsule gaspésienne (Bourque *et al.*, 1995, 2001).

12



Figure 1: Colonne stratigraphique des secteurs de Gaspé et de l'anticlinal de la rivière St-Jean

# **Formation de Burnt Jam Brook**

La Formation de Burnt Jam Brook repose sur la Formation de White Head. Elle est composée de claystone vert à gris verdâtre en couches très épaisses et d'une faible quantité de mudstone et de siltstone (Bourque *et al.*, 1995).

#### Formation de Laforce

Cette formation consiste en des calcaires de plate-forme et d'eau profonde (Bourque 2001). Elle est composée de calcarénites et de calcirudites lithoclastiques à lamination parallèle et oblique, disposées en couches moyennes à épaisses, renfermant jusqu'à 50 % de grains grossiers de quartz grossiers bien arrondis, de même que d'une faible quantité de conglomérat calcaire (Bourque *et al.*, 1995).

#### Formation de St-Léon

La Formation de St-Léon est composée de diverses roches silicoclastiques à grain fin. Dans l'anticlinal de la rivière St-Jean, la partie inférieure de la formation consiste en grès fins à lamination parallèle disposés en couches minces et renfermant des graptolites, avec, plus haut dans la formation, un conglomérat distinctif, soit le Membre d'Owl Capes. Celui-ci est un conglomérat polygénique grossier formant des couches très épaisses. Il est composé de particules de quartz et de fragments de calcaires divers, de coraux, de stromatopores, de wackes feldspathiques et de roches volcaniques baignant dans une abondante matrice argileuse (Bourque *et al.*, 1995).

#### **Formation de West Point**

La Formation de West Point est un complexe récifal composé de mudstone calcareux contenant des lithofaciès variés. Dans la région de Gaspé, elle consiste en unités de calcarénite et de calcirudite riches en fossiles et bien stratifiées, en biostromes à cladoporides et, localement, en biohermes à stromatopores de petites dimensions, dont l'épaisseur varie entre 4 et 40 m.

Le Membre de Griffon Cove River se situe à la base de la Formation de West Point. C'est un ensemble qui repose en discordance sur les roches du Supergroupe de Québec et dont l'épaisseur varie. Il comprend deux faciès principaux, soit un faciès de conglomérat polygénique à cailloux et à galets de quartz, de chert, de roches extrusives mafiques et felsiques, et de diverses roches sédimentaires, et un faciès local de roches silicoclastiques à grain fin (Bourque *et al.*, 1995). Ces conglomérats sont associés à la discordance salinique, qui est le résultat d'un basculement de bloc et d'une baisse eustatique du niveau marin (Bourque *et al.*, 2001).

## **Formation de Roncelles**

La Formation de Roncelles se situe juste au-dessus de la formation de West Point. Elle est composée de mudstone silicoclastique très calcareux de couleur grise disposé en couches épaisses, avec par endroits, des calcaires argileux fossilifères et des mudstones noduleux. (Bourque *et al.*, 1995)

# **Formation d'Indian Point**

La Formation d'Indian Point est composée de grès et de siltstones. Elle est composée de quatre membres, soit les membres de Rosebush Cove, de Petit Portage, de Quay Rock et de Cape Road. Le Membre de Rosebush Cove est composé de mudstone vert massif ou en couches épaisses avec, par endroits, des mudstones rouges. Le Membre de Petit Portage est une unité turbiditique de mudstones verts et de grès à grain fin interstratifiés. Le Membre de Quay Rock est composé de calcaire boueux à grain fin. Le Membre de Cape Road est une unité turbiditique de mudstone et de grès fins (Bourque *et al.*, 1995).

## 2.2.5 Calcaires supérieurs de Gaspé

Les Calcaires supérieurs de Gaspé recouvrent en continuité la Formation d'Indian Point, à laquelle ils succèdent graduellement. Les formations présentes sont les formations de Forillon, de Shiphead, d'Indian Cove et de Cap Bon Ami, cette dernière se retrouvant exclusivement dans le secteur de l'anticlinal de la rivière St-Jean. Il est important de noter que la Formation du Cap Bon Ami fait partie d'une nomenclature plus ancienne que celle utilisée pour les autres formations des Calcaires supérieurs de Gaspé. Une partie de la Formation de Cap Bon Ami et la Formation de Grande-Grève ont été redivisées dans la Bande du Nord par Lespérance (1980) pour créer les Calcaires de Gaspé. La Formation de Cap Bon Ami par les formations de Shiphead et de Forillon. Cependant, sur la carte géologique de la région de Gaspé (Brisebois, 1981), l'ancienne nomenclature est encore

utilisée par endroit. Sur la carte géologique de la présente étude (Figure 3), la Formation d'Indian Cove remplace la formation de Grande-Grève. Cependant, la Formation de Cap Bon Ami demeure puisque aucun travail n'a été fait pour la diviser dans les environs de l'anticlinal de la rivière St-Jean.

## Formation de Forillon

La Formation de Forillon surmonte en concordance la Formation d'Indian Point. Cette formation est une séquence monotone de calcilutite plus ou moins argileuse, dolomitique et siliceuse, ou de mudstone calcaire (Bourque *et al.*, 1995).

# **Formation de Shiphead**

La Formation de Shiphead possède une composition silicoclastique plus importante que la Formation de Forillon. Elle consiste en des calcaires et mudstones siliceux et dolomitiques en couches minces à très épaisses, avec, en faibles quantités, des couches de calcarénite, de grès et de bentonite (Bourque *et al.*, 1995).

# Formation d'Indian Cove

La Formation d'Indian Cove est une unité homogène de cacilutite cherteuse à siliceuse ou silteuse en couches minces à moyennes. Quelques calcarénites et calcirudites sont disséminées partout dans la séquence. Des grès et des siltstones sont dispersés dans la partie supérieure de celle-ci (Bourque *et al.*, 1995).

## Formation de Cap Bon Ami

La Formation de Cap Bon Ami consiste en une séquence monotone dont la composition va des calcilutites dolomitiques et siliceuses à composante argileuse aux shales calcareux et dolomitiques avec, dans la partie supérieure un horizon bien visible de calcarénites et de grès quartzeux (Bourque *et al.*, 1995).

# 2.2.6 Grès de Gaspé

#### **Formation de York Lake**

L'unité basale des Grès de Gaspé est la Formation de York Lake, qui est une unité de transition entre les Formations d'Indian Cove et de York River, composée d'une alternance de couches gréseuses et calcareuses (Bourque *et al.*, 1995). C'est une formation qui est pratiquement absente de la région de Gaspé, à l'exception d'un petit affleurement.

#### **Formation de York River**

La Formation de York River est composée, dans sa partie inférieure, d'un assemblage de mudstone-siltstone-grès avec quelques calcarénites. Cet assemblage passe, dans sa partie supérieure, à un grès avec une quantité moindre de mudstones (Bourque *et al.*, 1995).

#### **Formation de Battery Point**

La Formation de Battery Point peut être divisée en quatre divisions informelles. La première division, l'assemblage inférieur, est composée de séquences positives superposées de grès conglomératique, de grès à grain moyen à grossier et, en faibles quantités, de siltstone et de mudstone. Il est surmonté d'un second assemblage de séquences positives riches en mudstone et en siltstone rouges. Le troisième assemblage ressemble au premier, les faciès étant cependant plus grossiers et les séquences positives moins bien définies (Bourque *et al.*, 1995).

# <u>Chapitre 3 : Integration and spatial analysis of high-resolution physical</u> <u>and geological data, Eastern Gaspé Peninsula</u>

Ce chapitre contient un article scientifique qui fait la synthèse des principales observations, analyses et conclusions de la présente étude. Cet article a été soumis pour publication dans un numéro spécial du Journal canadien des sciences de la Terre.

La première version de cet article est entièrement le fruit de mon travail. Par la suite, celle-ci a bénéficié des corrections successives et des commentaires de Daniel Lebel, Sébastien Castonguay, Denis Lavoie, Michel Malo et Camille St-Hilaire. L'approche méthodologique, l'intégration de données et la majeure partie des interprétations ainsi que des conclusions apportées dans cet article sont le résultat de mes travaux. De même, j'ai personnellement réalisé tous les tableaux et figures qui sont présents dans cet article.

# INTEGRATION AND SPATIAL ANALYSIS OF HIGH-RESOLUTION GEOPHYSICAL AND GEOLOGICAL DATA, EASTERN GASPÉ PENINSULA

Christine St-Laurent<sup>1</sup>, Daniel Lebel<sup>2</sup>, Denis Lavoie<sup>2</sup>, Michel Malo<sup>1</sup> and Camille St-

# Hilaire<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institut National de la Recherche Scientifique – Eau-Terre-Environnment

880 Chemin Sainte-Foy, Bureau 840, Québec, G1S 2L2

<sup>2</sup>Geological Survey of Canada – Québec Division

880 Chemin Sainte-Foy, Bureau 840, Québec, G1S 2L2

<sup>3</sup>Fugro Airborne Surveys Quebec

5610 Chemin Bois-Franc, St-Laurent, Montréal, H4S 1A9

# RÉSUMÉ

Dans la région de Gaspé, les relations entre la couverture sédimentaire siluro-dévonienne de la ceinture de Gaspé, et les zones de Humber et de Dunnage sont complexes. Notre niveau de connaissance est bonifié grâce à l'utilisation d'un levé aéromagnétique de haute résolution combiné aux informations géologiques et géophysiques connues. L'interprétation de la géologie de surface et des structures profondes de l'Est de la Gaspésie est améliorée de façon significative. Le gradient vertical a été calculé à partir du levé aéromagnétique afin de mettre en évidence les anomalies magnétiques générées par des sources près de la surface. Les informations cartographiques, structurales et stratigraphiques ont été superposées à la carte du gradient vertical afin de proposer une interprétation préliminaire du levé magnétique. Plusieurs signatures magnétiques associées à la géologie de surface ont été identifiées dans la couverture sédimentaire siluro-dévonienne. Le traitement des données a permis de faire ressortir les conglomérats à fragments magnétiques surmontant la discordance salinique du Silurien tardif, fournissant ainsi un outil cartographique pour l'identification de cette discordance critique pour l'exploration des hydrocarbures dans des secteurs à faible densité d'affleurements. De grandes anomalies ovoïdes d'intensité importante localisées dans la couverture silurodévonienne n'ont pu être associées à aucun élément géologique connu. Le passage du levé magnétique dans des filtres passe-haut et passe-bas a permis de mieux cerner certaines signatures magnétiques et de déterminer que les anomalies ovoïdes prennent source en profondeur, sous la couverture siluro-dévonienne. L'association du levé passé au filtre passe-bas au levé gravimétrique régional montre que la plus importante des anomalies ovoïdes est associée à une anomalie gravimétrique. Il est proposé que ces anomalies géophysiques soient vraisemblablement associées à des roches ultramafiques ou volcaniques corrélatives en profondeur des lithologies connues en affleurement des unités cambro-ordoviciennes du Complexe de Lady Step ou du Groupe de Shickshock.

#### **ABSTRACT**

In the vicinity of the Town of Gaspé, the relationships between the Silurian-Devonian sedimentary succession of the Gaspé Belt and the Humber and the Dunnage zones are complex. Our state of knowledge is enhanced through the use of a high-resolution aeromagnetic survey combined with geological and other geophysical information. The interpretation of surface geology and deep-seated structures in Eastern Gaspé Peninsula is significantly improved. The vertical gradient has been derived from the aeromagnetic survey in order to image anomalies associated with near-surface features. Cartographic structural and stratigraphic information is superimposed on the vertical gradient map in order to propose a preliminary interpretation of the aeromagnetic survey. Several magnetic signatures associated to the surface geology are identified in the Silurian-Devonian sedimentary cover. The treatment of the data helped in the recognition of the conglomerate with magnetic fragments, which overlies the Upper Silurian Salinic Unconformity, therefore providing a mapping tool for the recognition of that critical unconformity for hydrocarbon exploration in low-density outcrop areas. Large ovoid anomalies of significant intensity located in the Silurian-Devonian sedimentary cover area could not be associated to any known geological feature. The interpretation of the highpass and low-pass filtered aeromagnetic survey indicates that the ovoid anomalies have deep sources, below the Silurian-Devonian cover sequence. The combined low-pass filtered data with the regional gravimetric survey shows that the most significant of the ovoid anomalies is associated with a gravimetric anomaly. It is proposed that these geophysical anomalies are probably associated with ultramafic or volcanic rocks correlatives in the subsurface with outcrops of the Cambrian-Ordovician lithologies of the Lady Step Complex or the Shickshock Group.

# **3.1 Introduction**

The Town of Gaspé and the surrounding area overlap segments of the intensely faulted and folded Cambrian-Ordovician units of the Humber and Dunnage zones of the Québec Appalachians (Fig. 1; Williams, 1995). Both zones are partly overlain by the lessdeformed Silurian-Devonian Gaspé Belt (Bourque *et al.*, 1995). Complex relationships exist between these various zones affected by numerous episodes of deformation, magmatism and metamorphism (Malo, 2001; Pincivy *et al.*, 2003). The eastern segment of the Gaspé Peninsula has attracted generations of field geologists because of its exquisite coastal exposures and because of known oil seeps in the Silurian-Devonian succession (Lavoie and Bourque, 2001) and natural gas production (Galt field, Lavoie *et al.*, 2001).



Figure 2 : Simplified geological map of the Gaspé Peninsula, Québec Appalachians with main tectonostratigraphic divisions discussed in text. Box locates Figure 3. BBL=Baie Verte-Brompton Line, BNOF=Bassin Nord-Ouest Fault. Modified from Malo (2001).

Conventional regional field geology has practically reached its limit with no significant increase in our understanding expected from revisiting the well-known classical outcrops of this area. Various geophysical surveys represent the next tools critical for improving our knowledge of the architecture and geological evolution of this area. Some of the outstanding issues may be solved through a better integration and interpretation of the various geophysical and geological data sets, such as 1) the nature and 3D geometry of the Humber-Dunnage zone boundary, 2) the documentation and timing of deformation events (Taconian, Salinian and Acadian), 3) the possible occurrence of Acadian deformation within the Humber Zone, and 4) the nature and geometry of the basement underlying the Silurian-Devonian cover.

In the recent years, a private high-resolution aeromagnetic survey was flown over eastern Gaspé Peninsula and the Ministère des Ressources Naturelles du Québec has acquired over 400 km of new seismic data over the entire peninsula. An integration of geoscience data is presented in this contribution which uses the new high-resolution aeromagnetic survey together with available gravimetric and geological data to improve our knowledge of the geology of this segment of the Gaspé Peninsula.

# **3.2 Geological setting**

The Taconian-deformed Cambrian-Ordovician units of the Humber and Dunnage zones, two of the five tectonostratigraphic zones of the lower Paleozoic Appalachian orogen (Williams, 1979), are present in the Gaspé Peninsula (Figure 2). These two zones are locally unconformably overlain by the Silurian-Devonian succession of the Gaspé Belt (Figure 2; Bourque *et al.*, 1995). The Gaspé Belt has been shaped by long-lasting deformation that started in Early Silurian times (Bourque *et al.*, 1995, 2000, 2001; Malo, 2001) and culminated with the classical Middle Devonian Acadian Orogeny. In the Gaspé Peninsula, the Gaspé Belt consists of three major tectonostratigraphic features; these are, from north to south: the Connecticut Valley-Gaspé synclinorium, the Aroostook-Percé anticlinorium and the Chaleurs Bay synclinorium (Figure 2).

23

This study focuses on the Cambrian-Ordovician units found in both the Humber and Dunnage zones as well as on the Silurian-Devonian successions found in the easternmost extension of the Connecticut Valley – Gaspé synclinorium (Figure 2).

## 3.2.1 Humber Zone

The Humber Zone comprises the rocks of the ancient continental slope and rise of Laurentia. These were deposited during the first cycle of opening and partial closure of Iapetus and thus comprises lower Paleozoic rift and drift as well as foreland basin rocks (Lavoie et al., 2003). The three major divisions of the Humber Zone are present in eastern Gaspé Peninsula (Figure 3). These comprise the Foreland Fold and Thrust Belt, the allochthonous thrust nappes domain of the external Humber Zone, which are separated by the Logan's Line (St-Julien and Hubert, 1975), and the internal nappes representing the hinterland of the Humber Zone. The Foreland Fold and Thrust Belt is composed of foreland basin turbidites (Upper Ordovician Cloridorme Formation; Slivitzky et al., 1991). The allochthonous nappes domain is broken up into three structural units, each with its own stratigraphy: the Middle-Upper Ordovician Cap-Chat Mélange (Cap-Chat Mélange lithosome), the Rivière Sainte-Anne nappe (Lower-Middle Ordovician Tourelle, Rivière Ouelle and Romieu formations) and the Marsoui nappe (Upper Ordovician Des Landes Formation). The Cap-Chat Mélange consists of blocks of variable size (up to 1 km) embedded in an argillaceous matrix. The blocks are mostly composed of lithologies correlative to the Rivière Ouelle, Tourelle and Des Landes formations (Cousineau, 1998). The Cloridorme, Tourelle and Des Landes formations are made of syn-orogenic flyshes (Prave et al., 2000). The Rivière Ouelle and Romieu formations are mostly composed of a monotonous sequence of mudstone, limy mudstone and limestone interstratified with sandstone and limestone conglomerate. Lavoie et al. (2003) have argued against the use of the Romieu Formation. The Proterozoic (?) – Lower Cambrian Shickshock Group is found in the internal nappe domain (Lavoie et al., 2003). It is poorly represented in the Gaspé area, only as a few basalt outcrops found along the Dartmouth River (Slivitzky et al., 1991).




	 Paint	
48° 50'	49° 00'	
	×	

From a structural point of view, the Humber Zone is characterized by in-sequence stacked nappes (Slivitzky *et al.*, 1991) with the oldest units at the top of the thrust wedge. Recent seismic surveys and reinterpretation of existing lines (Morin and Laliberté, 2002) document a complex faulting pattern and the presence of detached slabs of the deeply buried St. Lawrence platform. The Shickshock Sud Fault is the major structural lineament of this area (Figs. 2 and 3; Sacks *et al.*, this issue). It is interpreted as a dextral strike-slip fault of unknown displacement, which is recognized south of the Shickshock Mountains, and is thought to extend across the Humber Zone (Slivitzky *et al.*, 1991) merging with an unnamed fault that cuts through the Rivière Sainte-Anne nappe. In the study area, the fault marks the northern limit of the Cap Chat Mélange (Fig. 3).

#### 3.2.2 Dunnage zone

The Dunnage zone comprises Lower Paleozoic Iapetus oceanic units. In the study area, it is represented by the Lady Step Complex (Fig. 3). The Lady Step Complex (sometime referred to as the Mont Serpentine inlier; Malo, 2001) is located along the SW side of Bassin Nord-Ouest Fault. The complex is made of greenschist-grade intrusive and volcanic rocks (Berger and Ramsay, 1993).

## 3.2.3 Silurian-Devonian sedimentary cover and related structures

The Silurian-Devonian sedimentary cover in the Gaspé area (Fig. 3) unconformably overlies the Cambrian-Ordovician units (Bourque *et al.*, 1993). It is composed of the Chaleurs Group, the Upper Gaspé Limestones and the Gaspé Sandstones (Brisebois, 1981). As defined by Bourque (1975), the Chaleurs Group is made of Lower Silurian to basal Devonian shallow to deep continental shelf facies. In the northern sector of the study area, the group is represented by an incomplete succession of three Upper Silurian to basal Devonian formations: West Point, Roncelles and Indian Point (Bourque, 2001). The lower section of the Chaleurs Group has been eroded during the global Late Silurian sea level lowstand that resulted in the development of the Salinic Unconformity in that segment of the depositional belt (Bourque, 2001; Lavoie and Asselin, this issue). The

deposition of the upper part of the Chaleurs Group was controlled by combined collapse along some faults (see later in text) and global eustatic sea level rise (Bourque, 2001). In the Rivière Saint-Jean Anticline, in the southern sector of the study area (Fig. 3), the Upper Ordovician-Lower Silurian White Head Formation (Matapédia Group) and the lower part of the Chaleurs Group (the Lower-Upper Silurian Burnt Jam Brook, Laforce and St-Léon formations) are also present (Bourque, 1977). The Burnt Jam Brook and Laforce formations are deep marine units only found in the central segments of the Gaspé Peninsula (Bourque *et al.*, 1995, 2001).

The Upper Gaspé Limestones (Forillon, Shiphead, and Indian Cove formations; Lespérance, 1980) conformably overlie the Chaleurs Group. They are composed of Lower Devonian proximal to distal outer shelf limestones (Lavoie, 1992a, 1992b). The shelf is progressively deeper southwesterly and synsedimentary collapse (see later in text) controlled the nature and extension of the depositional belts (Lavoie, 1992b).

The Gaspé Sandstones (York Lake, York River, Battery Point and Malbaie formations; McGerrigle, 1950) are conformably overlying the Upper Gaspé Limestones. They are composed of Lower to lowermost Middle Devonian shallow marine to terrestrial facies (Rust, 1981, 1984; Desbiens, 1991). The sedimentation and facies pattern of these sandstones were controlled by the ongoing Acadian Orogeny (Rust, 1981, 1989). Overall, the Gaspé Sandstones were deposited during a general, tectonically-controlled relative regressive sea level (Bourque, 2001).

Vertical diabase dykes crosscut Silurian and Devonian sedimentary rocks (Brisebois, 1981). Bédard (1986) recorded a total of eleven dykes, approximately oriented E-W. Dykes are associated with local faults, breccia and shear zones. The dykes are undated, although they are often assumed to be Permo-Carboniferous (Bédard, 1986).

The mapping of structural elements in the Gaspé area goes back to the pionner work of McGerrigle (1950). Recent summaries of evolving intepretations for the tectonic evolution of the Gaspé Belt are provided by Bourque *et al.* (1995, 2001), Malo (2001) and

28

Kirkwood *et al.* (in press). Two major NW-trending faults occur in the study area (Fig. 3). The composite Bassin Nord-Ouest Fault and Belle Anse Fault, and the Troisième Lac Fault. The last movement along these faults is dextral strike-slip with total displacement in the order of 10 km that occurred in the late phase of the Middle Devonian Acadian Orogeny (Kirkwood, 1999; Bourque *et al.*, 2001). However, these faults are also characterized by earlier (Early Silurian-Early Devonian) extension as indicated by facies analysis (Bourque, 1990, 2001; Lavoie, 1992b) and supported by seismic imaging (Rocksandic and Granger, 1981). This earlier phase was ascribed to the Salinic Disturbance (Bourque *et al.*, 1995). This early tectonic extension in northern Gaspé is proposed to result from Acadian distal foreland collapse from the ongoing tectonic loading of the Acadian orogenic wedge at the outer limit of the Quebec Reentrant (Malo, 2001; Kirkwood *et al.*, 2002, in press). Moreover, from detailed field work, Béland (1980) even argued that these faults represent reactived older Taconian thrust planes. As observed in seismic profiles (Rocksandic and Granger, 1981), the listric nature of these faults supports this scenario.

The Paleozoic successions in eastern Gaspé peninsula has undergone several tectonic events. First, the Humber Zone and Dunnage Zone were deformed and metamorphosed during the Middle Ordovician Taconian Orogeny (St-Julien and Hubert, 1975; Pincivy *et al.*, 2003, Sacks *et al.*, this issue). Tectonism resumed in Early Silurian times, as expressed by extensional faulting recorded by the Chaleurs Group (Bourque *et al.*, 1995, 2001; Malo, 2001). In the study area, evidence for extension along the Bassin Nord-Ouest and Troisième Lac faults is recorded in the upper part of the Chaleurs Group and in the Upper Gaspé Limestones (Lavoie, 1992b; Achab *et al.*, 1997). Over the years, this extensional phase was ascribed to the Salinic Disturbance (Malo, 2001), hence following the proposition of a significant Silurian orogenic event recognized in adjacent Newfoundland (Cawood *et al.*, 1994) and New Brunswick (van Staal and de Roo, 1995). However, for the latter two localities, this event is compressive. A recent research scenario suggests that in Gaspé, the Silurian-Early Devonian extension and early folds represent an initial distensive phase of the Acadian orogeny (Kirkwood *et al.*, 2002; in press). Finally, in Middle Devonian, the final stage of the Acadian Orogeny resulted in

the bulk of the regional folding, reverse faulting and late strike-slip faulting observed in the Gaspé Basin (Kirkwood, 1999; Bourque *et al.*, 2001; Malo, 2001).

# **3.3 Methodological approach**

### 3.3.1 Processing method

Given the diversity and the amount of data analysed through this study, and the complexity of the relationships within and between the various datasets, an integration method to sequentially process and analyse the data was developed (Fig. 4). Because the primary objective of the study was to draw new interpretations from high-resolution aeromagnetic data, particular attention was put to combine and analyse each type of data in combination with the magnetic vertical gradient. With each data set, such iteration has revealed new elements of interpretation. Improvement consisted in the recognition of new geological elements. Each of these elements was adjusted or validated through each iteration. The resulting interpretation layer was analyzed with other layers of available geoscience data (geochemical, structural, stratigraphic data). This approach allowed us to cross-evaluate the interpretation and to propose a geological model at each stage. Eventually, new data from other sources were sought to address unsolved questions.



Figure 4 : Diagram showing the methodology used to process and analyze the different type of data.

To achieve the elaboration of the geological model, data sets were first imported into the GIS software Mapinfo<sup>TM</sup>. Hence, we linked and combined along the method described above, the georeferenced aeromagnetic, magnetic susceptibility and gravimetric surveys, the topographic and geological maps of the area, and a digital elevation model. Vertical Mapper<sup>TM</sup> was used to process the data grids, to design contour maps, three-dimension models and outline rough cross-sections.

## 3.3.2 Magnetic grid preliminary data treatment

Data were collected during fall 1997 in the northeastern part of the Gaspé Peninsula on a constant ground-aircraft spacing flight. These data were pre-processed by Fugro Airborne Surveys Quebec to eliminate temporal magnetic variations and to reduce positioning and elevation errors. The survey parameters are listed in table 1. The raw data were corrected for the diurnal drift, leveled and micro-leveled. For an optimal positioning, the GPS data

were post-processed using a base station. Then, the IGRF (International Geophysical Reference Field, 1997.5) was subtracted to obtain the residual field.

Flight height	90 m
Line spacing	400 m
Line orientation	North-South
Tie-line separation	2 km
Magnetometer used	Geometrics G-822A Caesium Vapour Magnetometer

Table 1: Aerial survey parameters

Once the basic data pre-processing was completed, the vertical gradient was calculated from the total magnetic field. The resulting map provides an enhanced view of the signal of surface or near-surface sources (Goodacre *et al.*, 1997). For the total residual magnetic field, high amplitude anomalies can easily be identified but subtle anomalies of geological significance are hard to distinguish (Fig. 5). In order to enhance the low amplitude anomalies, a shading effect was added to the vertical gradient (Figure 6).



Figure 5: Total residual magnetic field

## 3.3.3 Field surveys

A field survey was carried out to determine the magnetic susceptibility of the rock units of the study area as well as the source of the magnetic anomalies. The device used to measure the rock magnetic susceptibility was a KT-9 susceptibility-meter from Exploranium (Exploranium, Mississauga, Ontario).

# **3.4 Data integration**

# 3.4.1 Vertical gradient geophysical analysis

All positive and negative anomalies have been outlined on the Figure 6. There are three major kinds of anomalies: the large ovoid, the narrow linear, and the pinpoint anomalies. Within the second category of anomalies, we recognized (1) elongated, low to medium and medium to high intensities anomalies, and (2) short and sinuous anomalies.



Figure 6: Vertical gradient map derived from the original aeromagnetic survey. The high intensity anomalies are red and pink whereas the most intense ones are shown in dark green. The low intensity anomalies are in blue. Key to legend: A=Ovoid anomalies, B= Long, low to medium intensity

anomalies, C=Shorter, less uniform and medium to high intensity anomaly, D=Short and sinuous anomalies, E= Long, straight, medium to high intensity anomalies, F= Cultural anomalies

Preliminary interpretation on the vertical gradient anomalies (Figure 6) is rather straightforward. The elongated linear anomalies with variable intensities likely correspond to mafic dykes. Some weak regularly spaced linear anomalies could correspond to magnetic sedimentary layers, dykes, mafic sills or to volcanic layers interstratified with sedimentary rocks. The large ovoid anomalies could correspond to plutons, batholiths or layers of magnetic rocks. Point anomalies were easily identified as cultural noise (generated by near surface man-made objects; Hassan *et al.*, 1998). A few are easily associated with well known man-made elements (Figure 6): the Gaspé harbor, the town of Gaspé, the Rivière-au-Renard marine radio center and the Sandy Beach railroad bridge.

The basic geological knowledge of the area provides indications on how to correlate many of the anomalies with known stratigraphic and structural elements. Figure 7 presents the anomalies over the geological map background. The dyke outcrops are all situated over conspicuous linear anomalies. Four are located over shorts, sinuous, medium to intense anomalies along the north shore of Baie de Gaspé. Four other dikes are located on linear, medium to high intensity linear anomalies in the south part of the region. The Bassin Nord-Ouest Fault follows closely two segments of linear, less uniform anomalies in its NW extension. The field outcrops of the Lady Step Complex overlap the important ovoid anomaly present in the NW corner of the survey area. The NW-trending long, low to medium intensity anomalies in the central sector of the survey area (north of Baie de Gaspé; Figure 7) correspond to rock stratification of the Gaspé Sandstones. Similar but less intense anomalies are correlated with Upper Gaspé Limestones and Chaleurs Group stratification. On the south shore of Baie de Gaspé, there is no anomaly correlative with the Gaspé Sandstones; in fact, the magnetic gradient is near zero and the observed small variations are slightly wavy (Figure 6). The Rivière Saint-Jean Anticline at the southern limit of the survey area (Figure 3 and Figure 7) corresponds to a U-shaped anomaly matching the bedding in this area. Finally, in the northern sector of the survey area, for the Humber Zone, the only anomaly that matches known geological element is a linear low intensity anomaly that follows the northern limit of the Cap-Chat Mélange, which is also the assumed position of the Shickshock Sud Fault. Others linear low intensity anomalies are present in the Cap-Chat Mélange.



Figure 7 : Vertical gradient map superposed over the Brisebois (1981) geological map of this segment of Eastern Gaspé (see Fig. 3). Stratigraphic contacts and faults are shown as well as the location of dyke outcrops (stars). The relationship between surface geological elements and vertical gradient anomalies are discussed in text. BNOF=Bassin Nord-Ouest Fault, TLF=Troisième Lac Fault, BAF=Belle-Anse Fault, SSF=Shickshock Sud Fault, MCF= Méchins-Carcy Fault.

## 3.4.2 Data filtering

In order to identify the nature and extent of the anomalies recognized through the analysis of the vertical gradient, low-pass and high-pass filters were applied to the original aeromagnetic data. Low-pass filter eliminates high frequency components derived from near-surface rocks or cultural noise. High-pass filter removes signal coming from deeper source (Figure 8). The filtering is done by processing the data through a transfer function that separates the data content into short and long wavelengths (Goodacre *et al.*, 1996).



Figure 8: Example of the effects of high-pass and low-pass filters over the original magnetic signal. Low-pass filter eliminates high frequency components (commonly near surface elements), whereas a high-pass filter removes the signal from deep sources.

Three different filters were used: a low-pass filter with a cut-off length of 3200 metres, a high-pass filter at 3200 metres and another high-pass filter at 2000 metres. The results from the low-pass filter (Figure 9) show that the large ovoid anomalies that were recognized from the vertical gradient analysis are at low frequencies because they are still visible after removing the high frequencies.



Figure 9: High-resolution magnetic map after a low-pass filter run at 3200 metres. The resulting map shows only the deep magnetic elements as all near surface high frequency elements are removed.

The results from the high-pass filter with a cut-off length of 3200 metres show a variable but high positive anomaly correlative with vertical gradient negative anomaly in the NW corner of the study area (1a on Figure 10). The westernmost portion of this anomaly corresponds to the outcrops of the Lady Step Complex (Figure 3). The intensity variation is a filtration process artifact because the latter artificially creates negative responses around of anomalies larger than the cut-off wavelength. A second high and variable anomaly is found ENE of the first one (1b on Figure 10) and does not correspond to any known surface geological features. The alignment of small-wavelength anomalies on the vertical gradient that were matched with the Bassin Nord-Ouest Fault (Figure 6 and Figure 7) is not well defined on the 3200 metres high-pass filter map (Figure 10). For this high pass filter case, the fault plane is assumed to corresponds to a long, almost continuous anomaly oriented NW-SE, located slightly NE from the map trace of the fault (2 and 2a; Figure 10). The dissected straight but aligned anomalies that were observed in the southern part of the vertical gradient map (Figure 6), which were correlated with known dyke outcrops (Figure 7), are expressed as a single anomaly on this high pass filter (3 on Figure 10).



Figure 10 : High-resolution magnetic map after a high-pass filter run at 3200 metres. The resulting map shows relatively shallow to surface high-frequency elements as the deep magnetic signal is removed. 1a = strong positive and negative signature associated with the Lady Step Complex, 1b = strong positive and negative signature that is not tied to any known surface geological feature, 2 = continuous anomaly associated in the NW part of the region with the Bassin Nord-Ouest Fault, 2a = Bassin Nord-Ouest and Belle Anse Fault traces on the geological map, 3 = continuous anomaly associated with dyke outcrops. BNOF = Bassin Nord-Ouest Fault, BAF = Belle Anse Fault.

Anomalies observed through the high-pass filter at 2000 metres (Figure 11) are sharper and better defined than those from the previous high pass filter. However, the anomaly assigned to the Bassin Nord-Ouest Fault (1 on Figure 11) is less continuous here. Most of the anomalies that were identified on the vertical gradient map (Figure 6) are easily recognized on the high-pass filtered image at 2000 metres. For example, the short anomalies associated with dykes on the north shore of Baie de Gaspé and the anomaly associated with the Rivière Saint-Jean Anticline is better imaged (2 and 3 on Figure 11; see also Fig. 7).



Figure 11 : High-resolution magnetic map after a high-pass filter run at 2000 metres. The resulting map shows very shallow to surface high-frequency elements as the deep magnetic signal is removed. 1= same anomaly as 2 in Figure 10, 2 = anomalies associated with dykes, 3 = U-shaped anomaly associated with the Rivière Saint-Jean Anticline.

# 3.4.3 Gravimetric analysis

Contoured Bouguer anomaly map of the northeastern Gaspé Peninsula reveals an elongated high anomaly peaking at 33 mGal and forming a plateau around 20 mGal that broadly parallels the Humber zone (Figure 12). The anomaly peak is centered just north of the mouth of the Dartmouth River. There are no obvious surface geological features within the Silurian-Devonian Gaspé Belt or the Humber Zone that could be tied with this gravimetric anomaly. Therefore, a sub-surface element has to be invoked. Possible

explanations for this anomaly could either be a large sub-surface extension of the volcanic units of the Shickshock Group, which outcrop in the vicinity of the anomaly peak ('X' on Figure 12) or a large ultramafic slab, similar to the Lady Step Complex ('Y' on Figure 12). The regional Gaspé Peninsula Bouguer anomaly map (Figure 13) reveals that similar but less intense anomalies are associated with the ophiolitic Mont Albert Complex and the Shickshock Group.



Figure 12: Contoured Bouguer anomaly map (Canada National Gravity Data Base from the Geophysical Data Center (http://gdcinfo.agg.nrcan.gc.ca/gdc/index\_e.html) 2 km spacing grid. The contour lines are spaced at 1.5 mGal. X=Shickshock Group volcanics, Y=Lady Step Complex, SSF=Shickshock Sud Fault, BNOF=Bassin Nord-Ouest Fault, BBL= Baie Verte-Brompton Line. Note the significant gravimetric high in the west central sector of the study area.



Figure 13: Regional Gaspé Peninsula Bouguer anomaly map. SG=Shickshock Group, SSF=Shickshock-Sud Fault, MAC=Mont Albert Complex, RMSF=Rivière Madeleine Sud Fault, MCF=Méchins-Carcy Fault, BNOF=Bassin Nord-Ouest Fault, TLF=Troisième Lac Fault, GRF=Grande Rivière Fault, GPF=Grand Pabos Fault. Note that gravimetric anomalies are correlative with the Mont Albert Complex and the Shickshock Group.

# 3.4.4 Field survey results

The magnetic susceptibilities of the samples from the entire stratigraphic succession present in northeastern Gaspé Peninsula are shown in Figure 14. Magnetic susceptibility is a measure of the intensity of induced magnetization for a specific rock unit. The susceptibility of a given lithology varies depending on factors such as magnetic minerals, grain shape and size, and cooling temperature.

Magnetic susceptibilities vary widely over the entire stratigraphic column (Figure 14). The sandstones of the Battery Point Formation have the highest magnetic susceptibility. The Griffon Cove River Member of the West Point Formation also shows high magnetic susceptibilities. The Griffon Cove River Member is essentially a polymictic conglomerate with metamorphic and volcanic clasts that have high magnetic susceptibilities. Humber Zone units have a relatively uniform and low signature except for the few Shickshock Group basalts that were measured. These basalts have a variable magnetic susceptibility that can be locally very high (Figure 14). The Lady Step Complex (Dunnage Zone) also shows a variable magnetic susceptibility and shows some of the highest values recorded.



Figure 14: Stratigraphic - magnetic column from magnetic susceptibility data collected during the field survey. Line extremities and inflexion points represent an outcrop susceptibility measurement. The vertical trend is artificial and does not correspond to a susceptibility trend within any given rock unit as the line only connects values. Pale and dark shaded units are Humber and Dunnage zones units, respectively. The Gaspé Belt units are not shaded. The horizontal scale is logarithmic and presents a relative proxy for magnetic susceptibility variations between rock types.

Our field survey revealed some few centimetres to a few metres thick magnetic horizons in the Battery Point sandstones (Figure 14). The Battery Point Formation is a heterogeneous assemblage of sandstone, conglomeratic sandstone and conglomerate. These coarse-grained sediments vary in composition, size and magnetic susceptibility at the outcrop scale. The magnetic horizons could represent heavy minerals concentrations associated to paleo-placers. The sandstones are interpreted as part of a syntectonic proximal braided fluvial system (Rust, 1989). Exhumation of the metalliferous Cambrian-Ordovician igneous bodies likely occurred during the final transpressive tectonic phase of the early Middle Devonian Orogeny (Malo, 2001). The paleo-placers could result from the erosion of these newly exposed bodies (Shickshock Group, Mount Albert ophiolitic complex or Lady Step Complex). Finally, outcrops of diabase dykes have a very high magnetic susceptibility.

## 3.4.5 Laboratory results

Two magnetic samples from the Battery Point sandstones were analyzed to seek relationship between heavy minerals content and magnetic susceptibility. This study also aimed at identifying possible source rocks, and looking for any anomalous metal concentrations that could be of interest for mineral exploration. Thin sections were prepared and samples were crushed for grain and separated into two sub-samples: a heavy minerals concentrate (specific gravity higher than 3.3) and one for lighter minerals. Heavy minerals were analyzed through neutronic activation. Geochemical analyses were also conducted on magnetic-susceptible and non-magnetic susceptibility.

The opaque minerals conventional light microscope study was followed by SEM (scanning electron microscope) analysis. The heavy minerals analysis major oxides results are shown in table 1. For the high magnetic susceptible samples, the heavy minerals content represents between 1.12% (sample #116) and 5.75% (sample #117) of total weight sample. The most significant elemental anomaly recorded in these two samples is Cr (Table 2). The geochemical results (Table 3) also shows Cr anomalies in

43

three of the four magnetic sandstone samples. The same three samples also present Zr anomalies and the highest  $Fe_2O_3$  (magnetite) and  $TiO_2$  levels of the eight samples that were analyzed. Magnetic susceptibilities of these samples are shown in Table 4.

The scanning electron microscope has shown that the opaque minerals are mostly composed of magnetite, ilmenite, intermediary Fe-Ti phases, rutile, spinels and a few chromite grains (Figure 15).

Mass	5	25,8	49,67
Ę	md	2,7	в
٩X	d Indo	6,4	7,4
цр	mq	5	5
ш Ш	d Md	3,9	5,2
Sm	pm pm	9,5	9,9
Nď	d md	79 1	82 1
Ce	pm p	239	252
La	pm p	131	139
۰Zn	pmdc	300	242
N	ppm 1	7	5
Þ	bpm	25	12,7
Th	udo	90,1	69
Tal	Dmd	22	18
Ś	% 1	-0,2	-0,2
Se	mqq	-20	-20
Sc	ppm	55,6	49,3
9S	mdc	3,8	3,6
Rb	1 Juide	-50	-20
ž	bpm 1	342	-200
Na	%	0,36	0,18
οW	mda	-20	-20
-	qdd	-20	-50
ВН	bpm	κņ	Ŷ
Ŧ	шdd	148	193
Fe	%	8	26,8
ő	mdd	ş	-2
δ	mdd	13500	19300
S	mdo	45 1	54
Ca	%	-7	-2
Br	maa	ŝ	Ŷ
Ba	maa	-200	-200
As	bpm	20	15
AG	ppm	ç,	Ŷ
Ρ	qaa	F	Ŷ
	Sample	116	117

Table 2 : Heavy minerals neutron activity analysis results for two of the high-magnetic susceptibility samples

S a m p l e 00-C S -038-		A IZ U 3	כפר	Fezus	K 2 0	D O D	N n C	N a k C	C 0 2 4	0	2 10 2	2 01 1
00-CS-038-		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
	- A 2	10,5	1,65	8,26	2,07	3,20	,165	1,73	,104	,00740	62,4	3.04
Ihigh magnetic [00-CS-067-	8	9,59	5,52	8,97	1,75	6,27	,542	1,57	,125	,0164	51,3	2,60
susceptibility 00-CS-116		11,5	,933	5,46	2,21	3,61	,0669	2,95	,0880	< 0.0053	67,4	1,17
sam ples 00-C S -117		9,40	,251	9,56	1,85	2,64	,358	1,77	,106	< 0.0052	63,4	3.58
00-CS-038-	- A 1	11,6	,408	6,47	2,22	2,87	,0780	1,87	0660'	< 0.0054	66,9	1,25
low magnetic 00-CS-067-	- A	9,29	,189	3,25	2,38	1,86	,0361	2,30	,0790	< 0.0063	77,0	,375
suseptibility 00-CS-052-	A- 1	11,3	,317	6,02	2,22	3,10	,0595	2,14	,100	< 0.0053	68,5	1,08
samples 00-CS-054-	A-1	11,4	1,30	6,77	2,18	3,71	,194	2.09	,116	< 0.0052	65,1	,899

Table 3 : Trace and Rare Earth Elements geochemical results for both the high- and low-magnetic susceptibility samples.

Magnetite (Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	
Ilmenite (TiO <sub>2</sub> ) 1.800	
Chromite (Fe <sup>2+</sup> Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) 0.007	

Table 4: Average magnetic susceptibilities of some minerals (Telford et al., 1990)



Figure 15 : Backscattered electron image showing the most common minerals found in the Battery Point magnetic sandstones. 1=ilmenite grain containing intermediary Fe-Ti phase, 2=spinel grain, 3=rutile cluster with some ilmenite, 4=magnetite grain, 5=grain with complex interwoven rutile and minor titano-magnetite.

# **3.5 Interpretation**

The integration of various geophysical tools for interpreting the high-resolution aeromagnetic data enabled us to identify a fair number of anomalies in the Gaspé area. For most of them, the magnetic anomalies are of short wavelength. Only a few long wavelength anomalies were identified, although these anomalies are of significant intensity and size. Most of the short wavelength anomalies originate from near surface. Therefore, these anomalies are useful to improve the overall quality of the geological map. (Figure 16).



Figure 16 : Map showing the near-surface anomaly traces derived from the vertical gradient and high-resolution magnetic map after high-pass filter runs at 2000 metres. The anomalies (the dotted lines) are superimposed over the geological map of the area and most of the former are tied to sedimentary rock units. See text for explanation. 1 = 3 anomalies within the Battery Point Formation, 2 = anomaly associated to the York River Formation, 3 = anomaly at the contact between the Shiphead and Indian Cove formations of the Upper Gaspé Limestones, 4 = anomaly at the contact between the Upper Gaspé Limestones and the Chaleurs Group, 5 = 2 anomalies within the Chaleurs Group. The most significant one is 5a, which is correlated to the conglomerate of the Griffon Cove Member and marks the position of the Salinic Unconformity. 6 = U-shaped anomaly associated to the Salinic erosion in the shallower part of the depositional basin. 7 = various anomalies tied with known diabase dyke outcrops.

The vertical gradient map revealed that, the short and sinuous, medium to intense anomalies on the north shore of Baie de Gaspé are associated with known diabase dykes. A similar direct association has been recognized for the straight, medium to intense linear E-W anomalies in the southern part of the region. These anomalies were also identified on filtered data maps. The long, medium to low intensity anomalies located north of the Baie de Gaspé were correlated with stratigraphy, as the U-shaped anomaly located in the SW corner of the region.

Figure 16 shows all the near-surface geological anomalies compiled from the vertical gradient and the filtered data. In the Battery Point Formation, three magnetic anomalies are recognized (#1, Figure 16). Another one is found in the York River Formation (#2, Figure 16). The limit between the Indian Cove and the Shiphead formations of the Upper Gaspé Limestones corresponds to a magnetic anomaly (#3, Figure 16. Similarly, the limit between the base of the Upper Gaspé Limestones (Forillon Formation) and the top of the Chaleurs Group (Indian Point) is marked by a magnetic anomaly (#4, Figure 16). The Chaleurs Group is characterized by two linear anomalies: one approximately situated in its middle part and another one marks its base (#5 and 5a, Figure 16). The magnetic anomaly at the base of the Chaleurs Group is correlated to the Upper Silurian Griffon Cover River Member (West Point Formation) conglomerate. This conglomerate contains magnetite-bearing volcanic and metamorphic fragments. The Rivière Saint-Jean Anticline anomaly possibly has a similar origin. In this area, the Owl Capes Member of the Upper Silurian Saint-Léon Formation is a conglomerate in which magnetic volcanic fragments are abundant. These conglomerate-associated magnetic anomalies are critical for the understanding of the geological evolution of the Gaspé belt. The time-correlative Griffon Cove River and Owl Capes conglomerates are the expression of the Salinic Unconformity (Bourque, 2001), which resulted from the major Late Silurian sea level lowstand. The lowstand likely led to erosion, down to the Cambrian-Ordovician mafic rock units with the resulting unconformity covered by the Griffon Cover River detritus beds. However, the physical expression of the Late Silurian lowstand is not recognized over the entire depositional Gaspé Belt. Locally, the marine depositional setting was too deep to physically record the unconformity (Bourque, 2001), and erosion associated with the sea level lowstand resulted in the shedding of some coarse-grained magnetic material deposited in the deeper marine Owl Capes Member. The vertical gradient and the other high-pass filtered maps are potential critical tools for recognition and mapping the Salinic Unconformity in poorly outcropping area of northeastern Gaspé. It is also critical to

48

realize that unconformities are commonly a high interest target for hydrocarbon exploration companies as they provide an excellent trap for migrating hydrocarbons.

The Bassin Nord-Ouest Fault follows a linear magnetic anomaly in the northwestern part of the region (Figs. Figure 7 and Figure 10). Berger and Ramsay (1993) mapped lenses of sheared serpentinite along the Bassin Nord-Ouest Fault, west of the Lady Step Complex. The presence of serpentinite slices in the fault zone could explain the intensity of the anomaly. The fault and the magnetic anomaly diverge about 10 kilometres to the NW of the Town of Gaspé (Figure 10). A splay of the Bassin Nord-Ouest Fault was proposed by Brisebois (1981) but positioned closer to Gaspé. To the southeast, the Bassin Nord-Ouest fault was drawn to connect with the Belle Anse Fault (Figure 3). Based on the magnetic anomaly associated to the Bassin Nord-Ouest Fault, the main branch of the fault would follow the south shore of the Baie de Gaspé Figure 10). The interpreted connection between the Bassin Nord-Ouest Fault and the Belle Anse Fault (Brisebois, 1981) cannot be associated with any clearly defined anomaly. However, the Belle Anse Fault (Brisebois, 1981) crosses the Tar Point dyke magnetic anomaly. The dyke magnetic trace is separated by a right lateral offset (Figure 8). This observation is again critical as the age of the dykes is unknown, although some of them are assumed to post-date the late phase of Acadian Orogeny. This might be an evidence for later (Alleghanian Orogeny or younger) reactivation of the Belle Anse Fault plane. However, in the Maritimes Basin (Howie and Barss, 1975), the major Alleghanian strike-slip faulting is, in majority, sinistral. Conversely, this relationship might be a supportive element for a pre- or syn-late Acadian (Middle Devonian) age for the dyke if the fault is an Acadian structure.

The Troisième Lac Fault is not marked by any strong magnetic signature. The most significant magnetic evidence for this fault is a subtle but clear deviation of the Tar Point dyke where the fault crosses it (Figure 7).

The interpretation of long wavelength anomalies originating from deeper in the subsurface is more difficult than the short ones because they do not match known geological element. Few relatively shallow exploration wells and old seismic lines are the only

49

subsurface reliable sources of information about deep geological elements in easternmost Gaspé. The Blanchet, Baie de Gaspé-Nord, Baie de Gaspé-Sud, Douglas and Sunny Bank wells (Figure 3) cut part of the Silurian-Devonian sedimentary cover (Amyot, 1984). All these wells, besides the Sunny Bank, were drilled in an area where a significant part of the Silurian succession was eroded following the Late Silurian sea level lowstand and therefore the wells tested an atypical succession (Lavoie and Bourque, 2001). These wells were completed in highly deformed Cambrian-Ordovician sediments (Amyot, 1984; Bertrand and Malo, 2001). The Sunny Bank well was drilled in a paleogeographically deeper part of the basin. The well tested the Gaspé Sandstones and Upper Gaspé Limestones both hosts of the significant oil seeps of this area (Lavoie and Bourque, 2001). The well was stopped shortly after having reached the top of the Chaleurs Group (Amyot, 1984). The rather shallow depth investigated by the exploration wells of this area did not provide any significant information on the origin of the deep sub-surface anomalies. Similarly, one industry seismic line from this area was released in the public domain (Rocksandic and Granger, 1981). This line has generated significant progresses in our understanding of the tectonic evolution of the easternmost Gaspé geology, in particular for the earlier extensional history of the Bassin Nord-Ouest and Troisième Lac faults (Bourque, 1990; Lavoie, 1992b; Bourque, 2001; Malo, 2001). However, no significant seismic element can be tied with the deep magnetic anomalies.

The Bouguer anomaly gravity map was used to complement the high-resolution magnetic data. The contoured Bouguer anomaly was draped on a 3D model generated from the magnetic grid (Figure 17). The resulting map reveals that the 33 mGal gravimetric peak is located in the centre of the largest ovoid magnetic anomaly of the area (Figure 17). The combination of significant magnetic and gravimetric positive anomalies suggests the presence of a high density and highly magnetic rock unit in the deep subsurface that significantly contrasts with surrounding units. The mafic units of the Lady Step Complex are highly magnetic (Figure 17) although the spatially restricted outcrop area of the complex is located just at the southwestern limit of the 20 mGal gravimetric plateau (Figure 12). The northeastern extension of the Lady Step Complex in the sub-surface is totally unknown.



Figure 17 : Contoured Bouguer anomaly map draped on the 3D magnetic model. The high intensity gravimetric anomalies are in red and the low intensity anomalies are in blue-green. Note that in the north-eastern corner of the study area, the magnetic and gravimetric positive anomalies are superimposed.

# **3.6 Discussion**

An interpretative schematic composite cross-section located in the eastern part of the study area (A-A' – B-B'; Figure 3 ) was drawn to illustrate the correlation between the geophysical anomalies with that is known of the geology (Figure 18). The location of the tectonostratigraphic section was selected in order to cross the Shickshock Group basalts, the Lady Step Complex and the Rivière Saint-Jean Anticline. Conversely, the geophysical section (A1-A1'; Figure 3) is slightly to the east in order to crosscut the gravimetric and magnetic peak anomalies. The cross-section presents hypothetical relationships between the Humber and Dunnage zones as well as with the Silurian-Devonian sedimentary cover based on the new high-resolution aeromagnetic data and reinterpretation of the gravimetric regional survey. The intensity of the high-resolution magnetic survey and

Bouguer anomaly along the cross-section are displayed above the interpretative sketch to illustrate the relationships between the geophysical elements and the known and interpreted geological elements. The tectonostratigraphic section of Figure 18 presents our working model for the interpretation of the significant geophysical peak anomalies recognized in this area.

Two hypotheses are proposed to explain the geophysical positive anomalies that closely match the trace of the Bassin Nord-Ouest Fault in this sector of eastern Gaspé (Figure 18): the first is that the sub-surface extent of the Shickshock Group is much larger than suggested from surface geology; this dense and magnetic volcanic-dominated unit would be responsible for the geophysical anomalies. The second hypothesis would be that the Shickshock Group and an overlying slab of very dense and highly magnetic ophiolitic-type material are present in the subsurface along the northern hanging-wall of the Bassin Nord-Ouest Fault. The second hypothesis is based on similar tectonic stacking of the Mont Albert ophiolitic Complex and the Shickshock Group farther west in north-central Gaspé Peninsula (Brisebois *et al.*, 1991) and on the presence in the near vicinity of the anomaly, of the Lady Step Complex that was interpreted by Berger and Ramsay (1993) as a piece of a dismembered ophiolitic sequence caught along the Bassin Nord-Ouest Fault. However, even if both scenarios are workable hypothesis, more work and data are needed to speculate any further.

Figure 18 (next page) : Schematic structural cross-sections (A-A' and B-B' on Figure 3) with above the structural cross-section, the geophysical cross-section (A1-A1' on Figure 3) showing the magnetic and gravimetric profiles. The general style of the structural cross-section is derived from Bertrand and Malo (2001) section A-A', in the same general area. The major positive gravimetric and magnetic anomalies suggest the presence of a dense and highly magnetic unit(s?) on the northern hanging wall of the Bassin Nord-Ouest fault (the question mark). Two possibilities are presented in the text. SSF=Shickshock Sud Fault, BNOF=Bassin Nord-Ouest Fault, BVL=Baie Verte-Brompton Line, TLF=Troisième Lac Fault, RSJA=Rivière Saint-Jean Anticline. Lithological symbols as in Figure 3.



53

.

.

# **3.7 Conclusions**

The integration of high-resolution aeromagnetic data together with regional gravimetric and the most recent geological map of the eastern segment of the Gaspé peninsula result in a significant improvement in our knowledge of the 3D architecture and tectonostratigraphic evolution of both the Cambrian-Ordovician zones and their Silurian-Devonian sedimentary cover. The 3D geometry of the boundary between the Humber and Dunnage zones in the eastern Gaspé area appears to be somewhat similar to the one observed at Mont Albert in central Gaspé Peninsula (e.g., thrusting of Dunnage oceanic units over the continental successions of the Humber Zone). The high-resolution aeromagnetic survey and the use of high- and low-pass filters proved to be a powerful tool for recognition of poorly exposed tectono-magmatic elements (dykes, faults) and to provide some relative chronology between geological features. The high-resolution aeromagnetic data also proved significant for the recognition of magnetic beds in sedimentary units. The data presented here allows us to propose that the analysis of the information could provide a critical tool for recognition of the significant Upper Silurian Salinic Unconformity in the northeastern Gaspé areas where the Gaspé Belt is poorly outcropping. Such use of the data would provide a much-needed tool for mapping the unconformity and has critical significance for the hydrocarbon exploration efforts in Gaspé.

The high-resolution geophysical data represent a much-needed complement to the traditional field mapping. The integration of modern geophysical data of multiple sources (aeromagnetic, seismic, etc...) into a solid geological mapping framework likely represents the next step in our efforts to better understand the complex geology of the eastern Canadian Appalachians.

## **ACKNOWLDEGEMENTS**

This study benefited from a graduate scholarship from INRS-ETE and from field support of the Geological Survey of Canada via the Appalachian Forelands and St. Lawrence Platform NATMAP project in eastern Canada. The Gaspé high-resolution aeromagnetic survey was made available by Fugro Airborne Survey Quebec and was pre-processed under the supervision of Camille St-Hilaire. We thank Daniel Brisebois for the updated geological map of the Gaspé Peninsula and Régis Dumont for the original geophysical treatment of the data. We are grateful to continuous support of Kathleen Lauzière and Christine Deblonde for data representation. We also extend our gratitude to Warner Miles who processed the data through high-pass and low-pass filters. Sébastien Castonguay provided a critical and highly appreciated initial reading of the manuscript. Finally, we really appreciated the help of Johanne Paradis who provided an efficient field support for the summer survey.

# Chapitre 4 : Autres analyses et résultats

Le présent chapitre décrit les résultats de travaux et analyses qui n'ont pas été intégrés à l'article du chapitre 3.

# 4.1 Analyse des données géochimiques de ruisseau

Une série de données provenant de l'analyse des sédiments de ruisseau de la région de Gaspé acquise par le Ministère des Ressources naturelles a été traitée statistiquement et analysée afin de déterminer si les analyses géochimiques de ces sédiments de ruisseau pouvaient donner des indices sur la composition des roches en relation avec les anomalies magnétiques de surface. Le traitement statistique a consisté en la transformation des concentrations des différents éléments dans un système de rangs centiles, par élément. Par la suite, les rangs centiles de tous les éléments ont été additionnés pour chaque échantillon. Le total normalisé de tous les éléments par échantillon a été mis en carte sous forme de points de couleur indiquant l'emplacement de l'échantillon, la grosseur du point indiquant la concentration.

Ces données ont ensuite été superposées au gradient vertical du levé magnétique afin de déterminer quelle est la relation entre celui-ci et la géochimie des sédiments en surface. Cette superposition n'a malheureusement pas permis d'établir de corrélations certaines. En effet, les zones à plus forte concentration d'éléments ne correspondent pas aux zones d'intensité magnétique plus élevées, ni à des éléments géologiques connus.

# 4.2 Analyse de la relation entre la topographie et les anomalies magnétiques

Afin de déterminer l'influence de la topographie de la région de Gaspé sur les anomalies magnétiques identifiées sur le levé magnétique haute résolution, le levé magnétique passé au filtre passe-haut à 2000 m a été superposé sur un modèle d'élévation numérique de la région. Un rendu en 3D de la superposition des données filtrées sur le modèle d'élévation

numérique (Figure 19) révèle que, au nord de la Baie de Gaspé dans la région correspondant aux formations de Battery Point et de York River, quelques hauts topographiques semblent correspondre avec certaines anomalies linéaires parallèles à la baie. Cependant, la correspondance reste imparfaite puisque les linéaments magnétiques ne coïncident pas tous avec des hauts topographiques et ceux qui correspondent ne le font pas nécessairement sur toute leur longueur (Figure 19). Peut-être existe-t-il une relation entre le contenu en minéraux magnétiques de la roche et sa résistance à l'érosion. Pour préciser cette relation, une étude plus poussée serait nécessaire. La relation entre la topographie et le magnétisme des roches n'est donc pas suffisamment claire dans le cas présent pour réellement être utile. Cependant, les résultats pourraient être différents dans une autre région en raison d'une géologie différente. Cette approche pourrait représenter un outil intéressant en prospection magnétique.



Figure 19 : Rendu en 3D de la superposition des données filtrées à 3200 m sur le modèle d'élévation numérique de la topographie de la région de Gaspé. Les traits pointillés soulignent les endroits où les hauts topographiques correspondent à des anomalies magnétiques.

# 4.3 Résultat des levés bathymétrique et magnétique

## 4.3.1 Levé bathymétrique

Le levé bathymétrique effectué le long de la péninsule de Forillon et dans l'embouchure de la Baie de Gaspé (Figure 20) a permis de déterminer que la pointe de Forillon se poursuit sous l'eau vers le sud-est et que son versant sud-ouest plonge beaucoup abruptement que son flanc nord-est (1, Figure 20). De même, la profondeur est plus grande du côté du versant sud-ouest. Une succession de dépressions et de bosses linéaires, parallèles et obliques ont été observées sur le levé tout près de la pointe de Forillon (2, Figure 20). Ces ondulations ne peuvent être associées à la stratigraphie de la région puisqu'elles sont perpendiculaires à celle-ci. Étant en eau relativement profonde (environ 80 mètres), il est peu probable qu'elles soient le résultat de l'activité humaine. Elles pourraient cependant être un artéfact de la cueillette des données ou du traitement de celles-ci. Dans la baie de Gaspé et un peu au nord-est de la pointe de Forillon (3, Figure 20), le levé bathymétrique ne laisse voir qu'une surface lisse qui pourrait être associée à des sédiments meubles. Une surface lisse est également observée dans le haut du levé, celle-ci se trouvant à côté d'une topographie rugueuse du fond marin (4, Figure 20). Finalement, au niveau de l'anse du Cap des Rosiers, on retrouve une zone où le fond marin possède un aspect chaotique qui pourrait peut-être associé au Mélange de Cap Chat (5, Figure 20). Tous ces éléments topographiques possèdent un potentiel intéressant pour l'interprétation de la géologie du fond marin de ce secteur. Malheureusement, les sédiments recouvrent également une bonne partie du fond marin dans le secteur du levé. Combiné à la faible superficie de celui-ci, cela rend cette interprétation plutôt difficile.



Figure 20: Levé bathymétrique effectué le long de la péninsule de Forillon et dans l'embouchure de la Baie de Gaspé. L'échelle de couleur indique la profondeur. Le levé est éclairé du NO au SE pour mettre en évidence le relief du fond marin.

La partie sud du levé faite autour de la pointe St-Pierre (Figure 21), au sud de la région à l'étude, montre des reliefs plus accentués qu'au large de Forillon, dont une série de crêtes qui semblent correspondre à un anticlinal plongeant vers le sud-est (1, Figure 21). L'orientation des strates se trouvant le long de la côte (Brisebois 1979) correspond bien avec celle des crêtes. Le sud de ce levé révèle également la présence d'autres reliefs sous la surface de l'eau (2 et 3, Figure 21), mais il est plus difficile de les attribuer à des éléments structuraux précis. Les reliefs les plus à l'est du levé (2, Figure 21) possèdent une géométrie qui rappelle celle d'un pli serré, mais vu l'absence d'indicateurs structuraux il est impossible de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse. Les reliefs se trouvant à l'extrémité de la pointe (3, Figure 21) semblent se terminer en une structure arrondie qui pourrait correspondre au nez d'un pli. Cependant, les linéaments de l'image ne sont pas

très nets. Dans son rapport sur la région, Brisebois (1979) fait passer une faille supposée tout au long de la pointe St-Pierre, celle-ci se terminant au niveau des reliefs correspondant au point 3 de la Figure 21. Malheureusement, ces reliefs ne révèlent la présence d'aucune faille.



Figure 21: Partie sud du levé bathymétrique A) Le carré noir indique la localisation du levé bathymétrique fait au large de la Pointe St-Pierre par rapport à la région à l'étude. B) Levé bathymétrique associé à la géologie structurale de la région (voir la Figure 20 pour l'échelle de profondeur; modifié de Brisebois 1979).

# 4.3.2 Levé magnétique

Le levé magnétique de la péninsule de Forillon (Figure 22) présente un signal bas et uni, sauf dans l'embouchure de la baie de Gaspé. Deux éléments intéressants s'y retrouvent. Le premier est une anomalie rectiligne approximativement de direction est-ouest. Elle est de forte intensité, mais très étroite. Fait intéressant, elle se trouve à proximité de Tar Point, l'endroit sur la côte où aboutit le dyke de diabase qui est responsable de la signature étroite et très longue de direction est-ouest qui traverse le bas du levé aéromagnétique (Figure 22). L'anomalie magnétique se trouvant dans la baie pourrait tout simplement être l'extension sous l'eau du dyke de diabase. Étant donné la faible superficie du levé marin, il n'est pas possible de déterminer si le dyke de diabase se poursuit beaucoup plus loin vers l'est. La seconde anomalie d'intérêt est celle qui se trouve au centre de la baie et qui possède une superficie importante. Additionnée à la grille du levé aéromagnétique haute résolution, elle révèle une corrélation fort intéressante avec la grande anomalie se trouvant dans la partie sud-est de la région. En effet, la géométrie des deux anomalies correspond, de même que la distribution de l'intensité à l'intérieur de celles-ci. Cela permet donc de déterminer avec une bonne certitude la géométrie de l'anomalie, qui est plus petite que celle qui se trouve au nordouest et est également plus petite.

Le levé magnétique de la pointe St-Pierre montre que le magnétisme dans cette région semble augmenter de l'ouest vers l'est de façon uniforme.


Figure 22: A) Levé magnétique marin de la pointe de Forillon (1) et de la Pointe St-Pierre (2) associé au levé aéromagnétique de haute résolution de SIAL (3). B) Partie du levé magnétique marin associé au levé aéromagnétique haute résolution passé au filtre passe-haut à 2000 m. Les lignes pointillées mettent en évidence la signature magnétique du dyke. X = signature magnétique correspondant au dyke de Tar Point.

## Chapitre 5 : Modélisation magnétique et gravimétrique

### 5.1 Méthodes

Suite à la coupe structurale qui a été établie dans le chapitre 3 et à l'interprétation qui a été faite de la source des anomalies magnétiques et gravimétriques qui se superposent, un modèle en 2  $\frac{1}{2}$  dimensions a été élaboré dans le but d'apporter un nouvel éclairage sur ces hypothèses.

Afin de réaliser un tel modèle, le programme IGAO a été utilisé (copyright Karl Bouchard, Michel Chouteau et École Polytechnique de Montréal (version 28/7/1993) disponible pour téléchargement gratuit sur le site de l'École Polytechnique de Montréal: http://geo.polymtl.ca/www\_Cours/). Ce programme permet dans un premier temps de construire des polygones en deux dimensions et de leur assigner des paramètres géophysiques (autant magnétiques que gravimétriques) bien précis. Les polygones sont dits être en 2½ dimensions parce que le programme tient compte du fait que la longueur des polygones dans la troisième dimension est finie. Par la suite, IGAO génère une courbe en fonction des paramètres magnétiques ou gravimétriques. La courbe générée par IGAO est finalement comparée avec celle prélevée le long d'un segment sur les levés magnétique et gravimétrique originaux.

Le modèle qui a été retenu pour générer les anomalies théoriques est commun aux processus de modélisation magnétique et gravimétrique puisque l'ensemble des roches est responsable des deux types d'anomalies. Cependant, les paramètres utilisés diffèrent d'une modélisation à l'autre. La modélisation magnétique doit tenir compte de plusieurs paramètres reflétant le plus possible les conditions dans lequel le levé sur le terrain a été fait. Ces paramètres sont: l'angle entre le nord magnétique et le segment le long duquel le profil magnétique a été établi (45°), l'inclinaison du champ magnétique durant la période où le levé a été fait (72°), l'intensité du champ terrestre (54 400 nT), la distance entre l'appareil qui a servi à faire le levé et le sol (90 mètres) et la susceptibilité magnétique des roches (Tableau 5).

	roches sédimentaires	basalte	péridotite
susceptibilité magnétique X 10 <sup>-3</sup> (SI)	0.9 ( 0 à 18)	70 (0.2 à 175)	160 (90 à 200)
	· ·····	2,99 (varie de 2.7 à	3,15 (varie de
densité (g/cm <sup>3</sup> )	2,19	3.3)	2.78 à 3.37)

 Tableau 5 : Paramètres utilisés dans les modélisations magnétique et gravimétrique (Telford et al., 1990)

La susceptibilité magnétique est particulièrement difficile à déterminer dans le cadre d'une modélisation puisqu'elle peut varier de 4 à 5 ordres de magnitude entre différents types de roches. La susceptibilité magnétique peut également varier de façon significative à l'intérieur d'un même type de roche (Boyd, T. M. 2002). La valeur moyenne de chacune de ces fourchettes de valeurs a été utilisée dans le cas présent comme valeur de modélisation. L'ampleur de l'imprécision dans la valeur de susceptibilité dicte le réalisme achevé par la modélisation.

Les paramètres nécessaires à la modélisation gravimétriques sont moins nombreux, mais tout aussi complexes à manipuler. La densité est la donnée de base à déterminer dans ce type de modélisation. Contrairement à la susceptibilité magnétique, les densités de roches varient peu d'une roche à l'autre (de 1.7 g/cm<sup>3</sup> à 3.15 g/cm<sup>3</sup>; Hunt *et al.*, 1995). Les variations de densité enregistrées à l'intérieur d'un même type de roches sont également beaucoup moins importantes que les variations de susceptibilité magnétiques, ce qui rend l'utilisation de la moyenne de densité pour les différents types de roches dans la modélisation beaucoup moins hasardeuse que dans le cas de la susceptibilité magnétique.

Cependant, c'est le contraste de densité entre la roche encaissante et la source de l'anomalie qui doit être utilisé ici. L'encaissant, dans le cas présent, a été établie comme étant de la roche sédimentaire étant donné la présence des nappes cambro-ordoviciennes au nord et de la couverture sédimentaire siluro-dévonienne au sud de la région à l'étude. Étant donné la diversité des roches sédimentaires rencontrées dans cet environnement, la valeur de densité utilisée est une valeur moyenne de la densité des roches sédimentaires (tableau 3). Un autre aspect important de la modélisation de la gravimétrie est l'anomalie

65

gravimétrique régionale. L'anomalie régionale peut être définie comme étant une anomalie gravimétrique qui change lentement en fonction de la position le long du profil de gravité (Boyd, 2002). Celle-ci s'explique par la présence d'une source à grande échelle (par rapport à la longueur du profil examiné). Il est important de soustraire cette anomalie de l'anomalie totale afin d'en éliminer l'influence. Dans le cas présent, la composante régionale, prélevée sur un profil étendu par rapport à celui de la région à l'étude (Figure 23), a été soustraite graphiquement à la main puisque le profil à traiter n'était pas très long (Figure 24). L'anomalie régionale a été tracée le long du profil et par la suite la pente de cette anomalie a été calculée et soustraite du profil (Figure 25a).



Figure 23: Localisation des coupes utilisées pour la modélisation gravimétrique superposée au levé régional de l'anomalie de Bouguer. GS=Groupe de Shickshock, FSS=,Faille de Shickshock Sud, CAM=Complexe du Mont Albert, FRMS=Faille de la Rivière Madeleine Sud, MCF=Faille Méchins-Carcy, FBNO=Faille du Bassin Nord-Ouest, FTL=Faille du Troisième Lac, FGR=Faille de Grande Rivière, FGP=Faille du Grand Pabos.



Figure 24: Localisation du profil géophysique pour le levé magnétique haute résolution et l'anomalie de Bouguer



Figure 25: a) Profil de l'anomalie gravimétrique accompagné de l'anomalie régionale estimée. La zone grisée correspond au segment illustré dans la Figure 24. b) Profil de l'anomalie gravimétrique résultant de la soustraction de l'anomalie régionale. La zone grisée correspond à la même section que celle de Figure 25a. Voir figures Figure 23 et Figure 24 pour localisation.

## 5.2 Présentation des résultats

Trois scénarios ont été retenus pour expliquer les hypothèses émises dans le chapitre 3 sur la source des anomalies magnétique et gravimétrique superposées. Dans le premier cas, une masse de roches ultramafiques repose sur une tranche roches basaltiques (modèle 1, Figure 26), ce qui correspond à la première hypothèse, qui implique une superposition de types de roches similaires à celles qu'on retrouve dans la région du Mont Albert (Pincivy *et al.*, 2003). Dans le second cas, la masse de roches ultramafiques est remplacée par des roches basaltiques possédant des proportions identiques (modèle 2, Figure 26). Ce cas illustre la possibilité où il y aurait eu un empilement de roches basaltiques. Dans le troisième cas, il n'y a qu'une couche de roches basaltiques surmontée de roches sédimentaires (modèle 3, Figure 26). C'est le premier scénario qui a été retenu comme hypothèse de travail et qui a servi à ajuster la géométrie des polygones représentant les masses rocheuses.



Figure 26: Polygones utilisés dans le cadre des modélisations magnétique et gravimétrique. Voir Figure 24 pour localisation.

# 5.3 Analyse des résultats

La superposition des trois courbes obtenues à la suite de la modélisation magnétique des modèles présentés plus haut sur la courbe de référence (Figure 27), prélevée sur le levé aéromagnétique haute résolution, a été faite afin de déterminer quelles sont les relations entre elles. Il en a été fait de même pour les courbes de gravimétrie et la courbe prélevée sur l'anomalie de Bouguer dont l'anomalie régionale a été enlevée (Figure 28). À noter

que le point "zéro" dans l'axe X des modélisations correspond à la limite nord du levé magnétique haute résolution.

#### 5.3.1 Modélisation magnétique

En géophysique, la convention veut que les profils soient tracés par coordonnées croissantes, c'est-à-dire du sud vers le nord. En géologie les profils sont traditionnellement faits du nord vers le sud. Afin de garder la cohérence avec les résultats présentés dans l'article du chapitre 3, les données géophysiques ont dans un premier temps été modélisées du sud vers le nord puis retournées pour correspondre à la coupe géologique exposée dans ce chapitre.

La courbe de référence magnétique comporte un pic majeur et deux pics mineurs, en plus des ondulations de moindre importance (Figure 27). Des trois pics, un seul a pu être associé directement à un élément géologique. Il s'agit de celui se trouvant le plus au sud (pic B). Il correspond à la faille du Bassin Nord-Ouest. L'autre pic secondaire (pic C) et le pic principal (pic A) ont respectivement été assignés, en fonction des hypothèses qui ont été émises dans le cadre de cette étude, à des roches basaltiques appartenant au Groupe de Shickshock et à une masse de roches dense et magnétique qui pourrait être assignée à un empilement de roches du Groupe de Shickshock ou encore à une masse rocheuse ultramafique apparentée à une ophiolite.

La superposition des trois courbes obtenues par modélisation magnétique révèle plusieurs aspects intéressant des sources d'anomalies profondes possibles. Tout d'abord, la susceptibilité des roches produisant le pic principal doit être significative. Des trois modélisations qui ont été faites, c'est le second (modèle 2 Figure 26) qui se rapproche le plus de la courbe de référence. La roche responsable de l'anomalie magnétique ne serait donc pas, comme supposé au départ, une roche comme la péridotite. Elle aurait plutôt une susceptibilité magnétique se rapprochant de celle du basalte. À noter que le basalte n'est pas la seule roche à posséder une susceptibilité magnétique moyenne de 70 X  $10^{-3}$  (SI). Le gabbro possède la même, mais sa fourchette est plus réduite (1 à 90 X  $10^{-3}$  (SI)).

72



Figure 27: Profil magnétique accompagné des trois courbes modélisées. A = pic magnétique principal, B = pic associé au Groupe de Shickshock, C = pic associé à la faille du Bassin Nord-Ouest. Voir la Figure 24 pour la localisation.

L'examen des trois courbes modélisées révèle que la géométrie de l'anomalie semble directement liée à la présence en profondeur de masses rocheuses possédant une susceptibilité significative. En effet, si on attribue des valeurs de susceptibilité magnétique de roches sédimentaires aux polygones 1 et 2 (modèle 3, Figure 26), la géométrie de l'anomalie modélisée ne correspond plus à celle de l'anomalie de référence.

Le pic B (Figure 27) a été associé au Groupe de Shickshock en raison de la présence de quelques affleurements de basalte le long de la rivière Dartmouth. La présence d'affleurements appartenant à ce groupe à la limite de la couverture siluro-dévonienne

permet de penser que ces roches pourraient également se trouver à proximité de cette limite, mais cette fois sous la couverture sédimentaire. C'est pourquoi un polygone à la symétrie similaire à celle d'une nappe, représentant le Groupe de Shickshock a été ajouté à la modélisation (polygone 3, Figure 26). Celle-ci, dans les trois cas, montre que l'anomalie générée par ce polygone possède une similitude avec celle se trouvant sur le tracé du profil magnétique.

Le pic C (Figure 27) a été modélisé en insérant un mince triangle possédant les caractéristiques de la péridotite (polygone 4, Figure 26). Ce triangle a été placé à cet endroit pour illustrer l'hypothèse selon laquelle la faille du Bassin Nord-Ouest contiendrait des copeaux de roches ultramafiques (section 3.5). Encore une fois, l'anomalie générée par ce polygone est similaire à celle se trouvant sur le profil magnétique.

#### 5.3.2 Modélisation gravimétrique

La courbe de référence de l'anomalie de Bouguer dont la composante régionale a été retirée est relativement symétrique et a la particularité de posséder deux sommets rapprochés (Figure 25 b). La position du sommet le plus élevé (59 mGal) correspond presque parfaitement avec la position du sommet principal du profil magnétique (Figure 29). Ce sommet peut donc être très probablement associé à la même source que celui de l'anomalie magnétique. Par contre, le sommet moins élevé n'a été associé à aucun élément géologique puisqu'il se trouve en dehors de la zone à l'étude. Cet inconnu rend la modélisation gravimétrique beaucoup moins pratique puisque pour l'instant nous ne possédons pas assez d'éléments pour pouvoir émettre une hypothèse valable quant à la nature et la position de la source de cette anomalie et que le signal de cette source interfère sûrement avec l'anomalie à l'étude.

Cependant, les trois modélisations gravimétriques qui ont été effectuées révèlent quand même que le contraste de densité entre les roches encaissantes (roches sédimentaires) et la source de l'anomalie doit être assez élevé. Puisque la source du pic se trouvant au nord de la zone à l'étude n'a pas été modélisée, il était prévisible que les résultats de la modélisation gravimétrique dans la zone à l'étude seraient moins élevés. Dans le cas présent il n'est donc pas possible d'établir quelle est la courbe qui se rapproche le plus de celle de l'anomalie régionale. Pour pouvoir faire une comparaison valable, il faudrait déterminer la position et la géométrie du corps qui génèrerait une anomalie qui, combinée à celle de la zone à l'étude, donnerait un pic double tel que celui observé sur le profil de l'anomalie régionale. Les paramètres et inconnus dans le cas présent sont trop nombreux pour pouvoir faire une modélisation gravimétrique significative..



Figure 28: Profil gravimétrique accompagné des trois courbes modélisées. Voir les figures Figure 23 et Figure 24 pour la localisation.



Figure 29: Profils magnétique et gravimétrique superposées. Voir figures Figure 23 et Figure 24 pour la localisation.

### 5.4 Pertinence des modèles

Les modèles magnétiques et gravimétriques ont permis d'éclaircir quelques points en ce qui concerne la source des anomalies magnétiques et gravimétriques. En premier lieu, une masse rocheuse possédant une susceptibilité magnétique non négligeable ainsi qu'une densité plus importante que la densité moyenne des roches sédimentaires se trouvant sous la couverture siluro-dévonienne est la meilleure explication possible aux anomalies étudiées ici. En effet, si on modifie les caractéristiques des polygones représentant cette masse pour qu'elles correspondent à celles de roches sédimentaires, la symétrie des deux types d'anomalies n'est plus respectée (figures Figure 27 et Figure 28, modèle 3). Deuxièmement, les basaltes du Groupe de Shickshock pourraient se trouver proche de la limite entre la zone de Humber et la couverture siluro-dévonienne, sous cette dernière.

Les modèles magnétiques et gravimétriques sont des outils intéressants pour tenter de contraindre les différents paramètres et caractéristiques de sources d'anomalies géophysiques. Il faut cependant rester très prudent dans leur utilisation car les résultats obtenus sont très souvent plus théoriques que pratiques. Les modélisations effectuées ici

montrent bien que de nombreux paramètres entrent en ligne de compte et influencent de façon notable le résultat final.

# Conclusion

La région de Gaspé est une région-clé dans la compréhension de la géologie de l'Est de la péninsule gaspésienne pour mieux cerner l'évolution des déformations, reconnaître des failles majeures et pour comprendre le cadre stratigraphique et sédimentologique régional. Cette caractéristique est à l'origine d'un grand nombre d'études, de travaux cartographiques, de levés sismiques et de forages. Malgré tous ces travaux, il demeure des lacunes importantes dans les connaissances et l'interprétation de la géologie de cette région. La présente étude visait à combler certaines de ces lacunes grâce à l'utilisation de levés géophysiques, l'intégration de ceux-ci avec les données géologiques disponibles et l'interprétation de la synthèse des données ainsi obtenue.

Les sources de données utilisés dans le cadre de ce projet (un levé aéromagnétique de haute résolution, un levé bathymétrique et magnétique marin, un levé de susceptibilité magnétique des différents types de roches et formations de la région de Gaspé, le champ magnétique résiduel régional, l'anomalie de Bouguer régionale et les données géoscientifiques déjà existantes pour la région de Gaspé) compilées à l'aide de Mapinfo, un système d'information géographique, ont permis de mettre en évidence des éléments de la géologie qui n'apparaissent pas en surface. Elles ont également permis de mettre en lumière certaines caractéristiques structurales et géologiques de la région. En effet, le levé aéromagnétique haute résolution ainsi que l'utilisation de filtres passe-haut et passe-bas ont permis l'identification d'éléments tectono-stratigraphiques comme le tracé de la faille du Bassin Nord-Ouest et les dykes de diabase, dont celui de Tar Point qui traverse d'est en ouest la région à l'étude. De plus, ces outils ont également permis la localisation de lits magnétiques dans les roches sédimentaires de la Formation de Battery Point. Des anomalies magnétiques et gravimétriques qui ne sont associées à aucun élément de surface ont été identifiées et associées à des roches sources possibles. L'association de ces données a permis de déterminer qu'une masse rocheuse possédant une susceptibilité magnétique significative ainsi qu'une densité importante se trouve sous la couverture siluro-dévonienne.

L'identification de tels éléments ouvre de nouvelles perspectives dans l'interprétation de l'architecture 3D et l'évolution tectonostratigraphique des zones cambro-ordoviciennes et de leur couverture sédimentaire siluro-dévonienne. La géométrie 3D de la limite entre les zones de Humber et de Dunnage dans l'est de la péninsule gaspésienne semble montrer une similitude avec celle observée au Mont Albert dans le centre de la péninsule gaspésienne, c'est-à-dire un chevauchement d'unités océaniques du Dunnage sur les successions continentales de la zone de Humber. Les données présentées ici pourraient donc être d'une aide précieuse pour l'identification de la Discordance Salinienne (Silurien supérieur) dans le nord-est de la Gaspésie où la ceinture de Gaspé n'affleure pas beaucoup. Celle-ci présente un intérêt tout particulier pour l'exploration pétrolière en Gaspésie.

L'association de la géochimie de ruisseau avec le levé aéromagnétique haute résolution ainsi que la superposition du même levé passé au filtre passe-haut sur un modèle d'élévation numérique ne sont pas des techniques qui ont donné des résultats concluants dans le cadre de cette étude. Cependant, il n'est pas exclu que ces méthodes soient utiles dans un autre cadre géologique que celui de la région de Gaspé. De même le levé bathymétrique (doublé d'un levé magnétique) ne s'est pas démarqué dans cette étude étant donné le peu de relief du fond marin au large de la région à l'étude. Cependant, son potentiel demeure très intéressant pour les régions qui font l'objet d'une étude et qui se trouvent à proximité de grandes étendues d'eau.

L'élaboration d'une coupe structurale de la région de Gaspé était une étape essentielle dans la compréhension de la géologie de la région. L'utilisation de la modélisation magnétique et gravimétrique dans le cadre de cette étude a permis de tester et d'évaluer les différents paramètres entrant dans l'élaboration d'une hypothèse sur les roches de sous-surface : types de roches, géométrie, profondeur, etc. Bien qu'étant un outil attrayant, la modélisation doit être utilisée avec prudence puisqu'il est très rarement possible de contraindre suffisamment tous les paramètres pour obtenir un modèle exact et fiable.

L'usage d'outils d'exploration géophysiques est donc un complément précieux à la cartographie traditionnelle dans le contexte des Appalaches de la Gaspésie. Ces outils ainsi que le traitement et la compilation des données sur un support informatique sont appelés à prendre de plus en plus de place dans le travail des géologues car ils permettent une meilleure compréhension de la disposition de la géologie de la région, autant en surface qu'en sous-surface. Le potentiel de la compilation et l'intégration n'a cependant pas été pleinement exploité dans la présente recherche, faute de temps. En effet, dans le cadre de cette étude, certaines données géophysiques comme les levés sismiques n'ont pas été utilisés. De plus, la modélisation en trois dimensions sur support informatique aurait pu être un outil d'une grande utilité pour tester les différentes possibilités de modèles géologiques s'accordant aux données intégrées. De tels outils existent déjà (comme Gocad) mais ne sont pas encore utilisés couramment par les géologues. Ces outils ainsi que l'intégration de données seront sûrement appelés dans un proche avenir à prendre de plus en plus de place dans l'exploration pétrolière et minérale, permettant ainsi d'économiser temps et argent aux compagnies d'exploration en permettant une localisation plus rapide et plus certaine d'éléments géologiques ne s'exprimant pas ou peu en surface.

Malgré la compilation des données géoscientifiques existantes, de l'intégration de cellesci et l'élaboration de modèles, plusieurs points de la géologie de la région de Gaspé restent mystérieux: Quelle est la géométrie et la nature des roches cambro-ordoviciennes sous la couverture siluro-dévonienne? Quelle est la relation entre les zones de Humber et de Dunnage dans la région de Gaspé? Où se situe-t-elle exactement? Le mont de la Serpentine est un indice en surface d'événements anciens. Mais quels sont-ils exactement? Et de quelle manière ont-ils influencé la faille du Bassin Nord-Ouest? Et surtout, comment tous ces inconnus ont-ils influencé la production, la migration et le stockage d'hydrocarbures dans l'est de la péninsule gaspésienne? Il reste encore beaucoup de chemin afin de trouver réponses à ces questions.

## Références

ACHAB, A., Asselin, E., Lavoie, D., et Mussard, J.M. 1997. Chitinozoan assemblages from the third-order transgressive-regressive cycles of the Upper Gaspé Limestones (Lower Devonian) of eastern Canada. <u>Review of Palaeobotany and Palynology</u>, vol. 97, p. 155-175.

AMYOT, G. 1984. Lithostratigraphie de sous-surface de l'est de la Gaspésie. <u>Ministère de</u> <u>l'Énergie et des Ressources du Québec</u>, ET 83-11, 75 p.

BÉDARD, J. H. 1986. Les suites magmatiques du Paléozoïque supérieur en Gaspésie. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, ET 84-09, 105 p.

BÉLAND, J. 1980. Faille du Bassin Nord-Ouest et faille du Troisième Lac dans la partie est de la Gaspésie. <u>Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec</u>, DP-740, 20 p.

BERGER, J., et Ramsay, E. 1993. Étude structurale et pétrologique de la région du mont de la Serpentine. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, MB 93-22, 44 p.

BERTRAND, R., et Malo, M. 2001. Source rock analysis, thermal maturation and hydrocarbon generation in the Siluro-Devonian rocks of the Gaspé Belt basin, Canada. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, vol. 49, p. 238-261.

BOURQUE, P.-A. 1975. Lithostratigraphic framework and unified nomenclature for Silurian and basal Devonian rocks in eastern Gaspé Peninsula, Québec. <u>Canadian Journal</u> of Earth Sciences, vol. 12, p. 858-872.

BOURQUE, P.-A. 1977. Silurian and basal Devonian of northeastern Gaspé Peninsula. Ministère des Ressources naturelles du Québec, Special Paper ES-29, 323 p. BOURQUE, P.-A. 1990. La pulsation salinienne en Gaspésie-Témiscouata : Nature de la déformation et contrôle de la distribution des récifs de la fin du Silurien-début du Dévonien. *In* : Québec-Maine-New Brunswick Appalachian workshop. Program with abstracts. M. Malo, D. Lavoie et D. Kirkwood (eds.). <u>Geological Survey of Canada</u>, Open File 2235, p. 25-26.

BOURQUE, P. -A. 2001. Sea Level, synsedimentary tectonics and reefs: implications for hydrocarbon exploration in the Silurian-lowermost Devonian Gaspé Belt, Québec Appalachians. <u>Bulletin of Canadian Petroleum Geology</u>, vol. 49, p. 217-237.

BOURQUE, P.-A., Gosselin, C., Kirkwood, D., Malo, M., et St-Julien, P. 1993. Le Silurien du segment appalachien Gaspésie-Matapédia-Témiscouata: stratigraphie, géologie structurale et paléogéographie. <u>Ministère de l'Énergie et des Ressources du</u> <u>Québec</u>, MB 93-25, 115 p.

BOURQUE, P.-A., Brisebois, D., et Malo, M. 1995. Gaspé Belt. *In* Chapter 4, Geology of the Appalachian/Caledonian Orogen in Canada and Greenland. H. Williams (ed.). <u>Geological Survey of Canada, Geology of Canada</u>, vol. 6, p. 316-351.

BOURQUE, P.-A., Malo, M., et Kirkwood, D. 2000. Paleogeography and tectonosedimentary history at the margin of Laurentia during Silurian-earliest Devonian time: the Gaspé Belt, Québec. <u>Geological Society of America Bulletin</u>, vol. 112, p. 4-20.

BOURQUE, P.-A., Malo, M., et Kirkwood, D. 2001. Stratigraphy, tectono-sedimentary evolution and paleogeography of the post-Taconian – pre-Carboniferous Gaspé Belt: An overview. <u>Bulletin of Canadian Petroleum Geology</u>, vol. 49, p. 186-201.

BOYD, T. M. 2002. <u>Introduction to Geophysical Exploration</u>. Colorado School of Mines. http://galitzin.mines.edu/INTROGP/main\_template.jsp?menu=intro\_menu.html&page=In troduction%3A%20Home&url=INTRO%2Fmain.html BRISEBOIS, D. 1979. Géologie de la Région de St-Georges-de-Malbaie. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, DPV-664, 26 p.

BRISEBOIS, D. 1981. Géologie de la Région de Gaspé. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, DPV-824, 19 p.

BRISEBOIS, D., Lachambre, G., et Piché, G. 1991. Carte géologique, Péninsule de la Gaspésie. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, DV 91-22, carte 2196.

CAWOOD, P.A., Dunning, G.R., Lux, D., et Van Gool, J.A.M. 1994. Timing of peak metamorphism and deformation along the Appalachian margin of Laurentia in Newfoundland: Silurian not Ordovician. <u>Geology</u>, vol. 22, p. 399-402.

COUSINEAU, P.A. 1998. Large-scale liquefaction and deformation of the Cap Chat Mélange, Quebec Appalachians. <u>Canadian Journal of Earth Sciences</u>, vol. 35, p. 1408-1422.

DESBIENS, S. 1991. Le complexe deltaïque de la Formation de York River (Dévonien inférieur) de la région de Gaspé : paléoécologie et biostratigraphie. Unpublished Ph.D. thesis, Université de Montréal, Montréal.

GOODACRE, A. et, Keating, P. (editors) 1997. <u>Interpretation of gravity and magnetic</u> <u>anomalies for non-specialists--Interprétation des anomalies gravimétriques et</u> <u>magnétiques à l'intention des non spécialistes.</u> Geological Survey of Canada.

HASSAN, H. H., Peirce, J. W., Pearson, W. C., et Pearson, M. J. 1998. Cultural editing of HRAM data: comparison of techniques. <u>Canadian Journal of Exploration Geophysics</u>, vol. 34, p. 16-22.

HOWIE, R.D., et Barss, M.S. 1975. Upper Paleozoic rocks of the Atlantic Provinces, Gulf of St. Lawrence, and adjacent continental shelf. <u>Geological Survey of Canada</u>, Paper, vol. 74-30, p. 35-50.

HIBBARD, J.P., St-Julien, P., et Trzcienski, W.E., Jr. 1995. Zone de Humber interne; dans <u>Géologie de l'orogène appalachien-calédonien au Canada et au Groenland</u>, chap. 3, rév. par H. Williams, Commission géologique du Canada, Géologie du Canada numéro 6, p. 126-154.

HUNT, C.P., Moskowitz, B. M. et Banerjee, S. K. 1995. Magnetic Properties of Rocks and Minerals. *In* Ahrens, T. J. (ed). <u>Rock Physics and Phase Relations: A Handbook of Physical Constants</u>, AGU Reference Shelf 3. American Geophysical Union. p. 189-204.

KIRKWOOD, D. 1999. A palinspastic restauration of a post-Taconian successor basin deformed within a transpressive setting, northern Appalachians. <u>Tectonics</u>, vol. 18, p. 1027-1040.

KIRKWOOD, D., Lavoie, M., Lavoie, V., et Marcil, J.S. 2002. <u>Acadian tectonic</u> wedging, stacking, and triangle zone in northeastern Gaspé Appalachians?. Canadian Society of Petroleum Geology, Diamond Jubilee meeting, Program with abstracts, 186 p.

KIRKWOOD, D., Lavoie, M., et Marcil, J.-S. (sous presse). Structural style and hydrocarbon potential in the Acadian foreland thrust and fold belt, Gaspé Appalachians, Canada. *In* Roure, F., Granath, J., and Swennen, R. (eds.). Deformation, fluid flow and reservoir appraisal in foreland fold-and-thrust belts. <u>American Association of Petroleum</u> Geologists, Memoir.

LAVOIE, D. 1992a. Lower Devonian facies in Forillon Peninsula, eastern Gaspé, Québec Appalachians : a storm-influenced, carbonate outer shelf. <u>Bulletin of Canadian Petroleum</u> <u>Geology</u>, vol. 40, p. 303-320.

LAVOIE, D. 1992b. Carbonate sedimentation in an extensional tectonic regime : the Lower Devonian Upper Gaspé Limestone, Quebec Appalachians. <u>Canadian Journal of Earth Sciences</u>, vol. 29, p. 118-128.

LAVOIE, D., et Asselin, E. (sous presse). A new stratigraphic framework for the Gaspé Belt in southern Québec: significance for the pre-Acadian Appalachians of eastern Canada. <u>Canadian Journal of Earth Sciences</u>.

LAVOIE, D., et Bourque, P.-A. 2001. The history of hydrocarbon exploration in the Silurian-Devonian Gaspé Belt: 100 years of modest success. <u>Bulletin of Canadian</u> <u>Petroleum Geology</u>, vol. 49, p. 180-185.

LAVOIE, D., Chi, G., et Fowler, M., 2001. The Lower Devonian Upper Gaspé Limestones in eastern Gaspé: carbonate diagenesis and reservoir potential. <u>Bulletin of Canadian Petroleum Geology</u>, vol. 49, p. 346-365.

LAVOIE, D., Burden, E., et Lebel, D., 2003. Stratigraphic framework for the Cambrian-Ordovician rift and passive margin successions from southern Quebec to western Newfoundland. <u>Canadian Journal of Earth Sciences</u>, vol. 40, p. 177-205.

LESPÉRANCE, P.J. 1980. Calcaires supérieurs de Gaspé. Les aires-types et le prolongement vers l'ouest. <u>Ministère de l'Énergie et des Ressources</u>, Québec, DPV-595, 92 p.

MALO, M., 2001. The Late Silurian-Early Devonian tectono-sedimentary history of the Gaspé Belt in the Gaspé Peninsula: form a transtensional Salinic basin to an Acadian foreland basin. <u>Bulletin of Canadian Petroleum Geology</u>, vol. 49, p. 202-216.

McGERRIGLE, H. W. 1950. La géologie de l'est de Gaspé. Ministère des Mines du Québec, RG-35.

MORIN, C., et Laliberté, J.-Y. 2002. <u>The unexpected Silurian-Devonian structural style</u> <u>in western Gaspé – New insight for promising hydrocarbon plays</u>. Canadian Society of Petroleum Geology, Diamond Jubille Meeting, Program with abstracts, 240 p.

PINCIVY, A., Malo, M., Ruffet, G., Tremblay, A., et Sacks, P.E., 2003. Regional metamorphism of the Appalachian Humber zone of Gaspé Peninsula: <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar evidence for crustal thickening during the Taconian orogeny. <u>Canadian Journal of Earth Sciences</u>, vol. 40, p. 301-315.

PRAVE, A.R., Kessler, L.G., II, Malo, M., Bloechl, W,V., et Riva, J. 2000. Ordovician arc collision and foredeep evolution in the Gaspé Peninsula, Québec: the Taconic Orogeny in Canada and its bearing on the Grampian Orogeny in Scotland. Journal of the Geological Society of London, vol. 157, p. 393-400.

ROCKSANDIC, M. M., et Granger, B. 1981. Structural styles of Anticosti Island, Gaspé Passage, and eastern Gaspé Peninsula inferred from reflection seismic data. *In:* <u>Stratigraphy and Paleontology: International Union of Geological Science Field Meeting,</u> <u>Anticosti-Gaspé, Québec</u>. P.-J. Lespérance (ed.). Université de Montréal, Montréal, Québec, vol. 2, p. 211-221.

RUST, B.R. 1981. Alluvial deposits and tectonic style- Devonian and Carboniferous successions in Eastern Gaspé. *In* Miall, A.D. (ed.). Sedimentology and tectonics in alluvial basins. <u>Geological Association of Canada</u>, Special Paper, vol. 23, p. 49-76.

RUST, B.R. 1984. Proximal braidplain deposits in the Middle Devonian Malbaie Formation of eastern Gaspé, Québec, Canada. Sedimentology, vol. 1, p. 675-695.

RUST, B. R. 1989. The Devonian clastic wedge in Eastern Gaspé peninsula. *In* P.-A Bourque, R. Hesse et B. Rust (eds.). Field trip B8: Sedimentology, <u>Paleoenvironments</u> and <u>Paleogeography of the Taconian to Acadian rock sequence of Gaspé Peninsula</u>. Guidebook GAC/MAC, Annual meeting, Montréal 1989, p. 165-180.

86

SACKS, P.E., Malo, M., Trzcienski, W.E., Pincivy, A., et Gosselin, P. (sous presse). Taconian and Acadian transpression between the internal Humber zone and the Gaspé Belt in the Gaspé Peninsula: tectonic history of the Shickshock Sud fault zone. <u>Canadian</u> <u>Journal of Earth Sciences</u>.

SLIVTZKY, A., St-Julien, P., et Lachambre, G. 1991. Synthèse géologique du Cambro-Ordovicien du nord de la Gaspésie. <u>Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec</u>, ET 88-14, 61 p.

ST-JULIEN, P., et Hubert, C. 1975. Evolution of the Taconian Orogen in the Quebec Appalachians. American Journal of Sciences, vol. 275-A, p. 337-362.

TELFORD, W. M., Geldart, L. P. et Sheriff, R. E., 1990, Applied Geophysics: Second Edition, Cambridge University Press.

VAN STAAL, C.R., et de Roo, J.A. 1995. Post-Ordovician structural history of the Central Mobile Belt of the northern Appalachians: collision, Salinic uplift, extensional collapse and the Acadian Orogeny. *In*: J.P. Hibbard, C.R. van Staal, P.A. Cawood (eds.). Current perspective in the Appalachians-Caledonian Orogen. <u>Geological Association of Canada</u>, Special Paper, vol. 41, p. 367-390.

WILLIAMS, H. 1979. Appalachian Orogen in Canada. <u>Canadian Journal of Earth</u> <u>Sciences</u>, vol. 16, p. 123-134.

WILLIAMS, H. 1995. Introduction. *In*: H. Williams (ed.). Chapter 1, <u>Geology of the</u> <u>Appalachian/Caledonian Orogen in Canada and Greenland</u>. Geological Survey of Canada, Geology of Canada, vol 6, p. 3-19.