

Étude sur l'évaluation du potentiel en hydrogène naturel au Québec

Volet 3

Définition et inventaire des secteurs de roches sources potentielles pour l'hydrogène naturel

2. Bouclier canadien du Québec

Félix-Antoine **Comeau**

Stephan **Séjourné**

Michel **Malo**

Rapport de recherche R2183

30 juin 2023

**IN
RS**

Institut national
de la recherche
scientifique

La préparation de ce document a été rendue possible grâce à la contribution financière du Ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie et à la participation des personnes suivantes :

ANALYSE ET RÉDACTION

Félix-Antoine Comeau, géo., M.Sc.
Professionnel de recherche
Institut national de la recherche scientifique

Stephan Séjourné, géo., Ph.D.
Président d'Enki GéoSolutions inc.

Michel Malo, géo., Ph.D.
Professeur honoraire
Institut national de la recherche scientifique

RÉVISION

Jasmin Raymond, géo., Ph.D.
Professeur titulaire
Institut national de la recherche scientifique

Jean-Daniel Bourgault
Bibliothécaire
Institut national de la recherche scientifique

© Institut national de la recherche scientifique & Ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie, 2024.

Référence à citer

Comeau, F.A., Séjourné, S, Malo, M., 2023. *Étude sur l'évaluation du potentiel en hydrogène naturel au Québec. Volet 3 : Définition et inventaire des secteurs de roches sources potentielles pour l'hydrogène naturel - 2. Bouclier canadien du Québec*. Préparé pour le Ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie. Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement, Québec. Rapport de recherche R2183, 88 p.
<https://espace.inrs.ca/id/eprint/13571/>

Étude sur l'évaluation du potentiel en hydrogène naturel au Québec

Volet 3

Définition et inventaire des secteurs de roches sources potentielles pour l'hydrogène naturel

2. Bouclier canadien du Québec

Félix-Antoine Comeau

Stephan Séjourné

Michel Malo

Rapport de recherche R2183

30 juin 2023

TABLE DES MATIÈRES

Résumé.....	9
1. Introduction	11
1.1 Mise en contexte.....	11
1.2 Description du contenu du rapport	11
1.3 Portée et limitations de l'étude.....	11
1.4 Cadre géologique du Bouclier canadien.....	12
1.4.1 Province du Supérieur	13
1.4.2 Province de Churchill.....	15
1.4.3 Province de Grenville.....	17
1.5 Identification des secteurs d'intérêt.....	19
2. Les bassins sédimentaires	21
2.1 Graben de Richmond Gulf (B1).....	21
2.2 Plate-forme d'Hudson (B2).....	23
2.3 Fosse du Labrador (B3).....	25
2.4 Mistassini et Otish (B4).....	29
2.5 Potentiel.....	31
3. Les mines d'or.....	33
3.1 Les mines de zones de faille de l'Abitibi (M4).....	33
3.1.1 Gaz dans les mines d'Abitibi.....	37
3.2 Éléonore (M1)	41
3.3 Casa Berardi (M2).....	43
3.4 Chibougamau (M3)	44
3.5 Anneaux forestiers d'Ontario et du Québec.....	48
3.6 Potentiel.....	52
4. Les kimberlites.....	53
4.1 Monts Torngat (K1)	54
4.2 Otish (K2).....	55
4.3 Desmaraisville (K3)	56
4.4 Témiscamingue (K4).....	57
4.5 Potentiel.....	58
5. Les intrusions alcalines	59
5.1 Pluton du Lac Brisson (I1)	59
5.2 Syénite de Misery (I2).....	60
5.3 Syénite de Juillet (I3)	62
5.4 Intrusion alcaline de Crevier (I4)	64
5.5 Suite syénitique de Kipawa (I5).....	65
5.6 Potentiel.....	68
6. Classement des secteurs d'intérêt	69
7. Conclusions.....	75

8. Remerciements	77
9. Références	79

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Les grands ensembles et provinces géologiques au Québec	12
Figure 2. Principaux éléments tectoniques de l'Amérique du Nord	13
Figure 3. Subdivisions de la Province du Supérieur	14
Figure 4. Province de Churchill au Québec	15
Figure 5. Sud-Est de la Province de Churchill	16
Figure 6. La Province de Grenville et son extension présumée en Amérique du Nord	17
Figure 7. Principales divisions lithotectoniques de la Province de Grenville	18
Figure 8. La Province de Grenville et son extension présumée dans le monde	19
Figure 9. Localisation des secteurs de sources potentielles d'hydrogène dans le Bouclier canadien	20
Figure 10. Carte géologique et profil stratigraphique schématisé des roches du Graben de Richmond Gulf de la région du lac Guillaume-Delisle	21
Figure 11. Cadre régional du bassin sédimentaire de la plate-forme paléozoïque d'Hudson et cadre géologique et unités stratigraphiques de la plate-forme	23
Figure 12. Colonne stratigraphique des unités sédimentaires du bassin d'Hudson au Québec ...	24
Figure 13. Coupes structurales simplifiées de la Fosse du Labrador	28
Figure 14. Stratigraphie simplifiée de la Fosse du Labrador	28
Figure 15. Subdivision de la Sous-province d'Opatoca et localisation des bassins de Mistassini et d'Otish	30
Figure 16. Indices et gîtes d'uranium dans le bassin des Monts Otish (en bleu) avec les failles et linéaments de Genest	30
Figure 17. Essaim de dykes de Mistassini interprétés sur les levés magnétiques et les bassins sédimentaires protérozoïques	31
Figure 18. Localisation de la ceinture de roches vertes de l'Abitibi dans la Province du Supérieur	33
Figure 19. Carte géologique de la ceinture de roches vertes de l'Abitibi montrant la distribution des roches supracrustales et des roches intrusives	35
Figure 20. Carte géologique de la ceinture de roches vertes du sud de l'Abitibi montrant la distribution des roches volcaniques et sédimentaires	36
Figure 21. Modèle conceptuel du mélange de fluides contrôlé par la connexion de fractures hydrauliquement isolées, menant à la consommation de l'hydrogène abiologique et à la production de méthane biogénique	41
Figure 22. Localisation géologique de la mine Éléonore	42
Figure 23. Géologie régionale de la mine Casa Berardi	44
Figure 24. Carte des épisodes volcaniques et des séquences sédimentaires de la Sous-province de l'Abitibi	46
Figure 25. Géologie simplifiée du secteur de Chibougamau, incluant la localisation des mines et des indices	47
Figure 26. Exemples d'anneaux forestiers en Ontario	48
Figure 27. Exemples d'anneaux forestiers coalescents au Québec	49
Figure 28. Coupes stratigraphiques à travers deux anneaux forestiers au nord de Timmins	50
Figure 29. Modèle proposé pour expliquer la variation du potentiel d'oxydo-réduction et du contenu en carbonate dans l'anneau des anneaux forestiers	51
Figure 30. Localisation des grandes zones de failles et des intrusions alcalines au Québec	53

Figure 31. Carte montrant l'épaisseur de la croûte terrestre dans le nord du Canada et la position des indices et les mines de diamants.....	54
Figure 32. Géologie du secteur au NE de la partie Ouest du bassin des monts Otish	55
Figure 33. Localisation des cheminées de kimberlite du champ de Desmaraisville.....	56
Figure 34. Emplacement des champs de kimberlite de Kirkland Lake et du lac Témiscamingue dans le nord-est de l'Ontario et l'ouest du Québec.....	57
Figure 35. Localisation géologique du Pluton du Lac Brisson	59
Figure 36. Carte géologique simplifiée du Pluton du Lac Brisson	60
Figure 37. Localisation géologique de la Syénite de Misery	61
Figure 38. Carte du gradient magnétique de la Province de Churchill	61
Figure 39. Carte géologique de la Syénite de Misery	62
Figure 40. Localisation géologique de la Syénite de Juillet	63
Figure 41. Unité de la Syénite de Juillet: syénite à feldspath alcalin et gabbro.....	63
Figure 42. Localisation géologique de l'Intrusion alcaline de Crevier.....	64
Figure 43. Unités géologiques de l'Intrusion alcaline de Crevier.....	65
Figure 44. La province géologique du Grenville et ses principales subdivisions, avec la localisation de la Suite syénitique de Kipawa.....	66
Figure 45. Carte géologique de la région de Kipawa.....	67
Figure 46. Carte géologique régionale et colonne stratigraphique de la Suite syénitique de Kipawa	67
Figure 47. Carte de localisation et notation des secteurs de sources potentielles d'hydrogène dans le Bouclier canadien du Québec	71

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Composition des produits de dégazage de quatre mines d'Abitibi.....	38
Tableau 2. Composition isotopique du méthane, de l'éthane et du carbone inorganique dissout dans les eaux de quatre mines d'Abitibi	39
Tableau 3. Classification retenue pour noter les attributs des différents secteurs d'intérêt pour l'hydrogène naturel au Québec	69
Tableau 4. Sommaire par région géographique du classement des différents secteurs d'intérêt pour les roches sources d'hydrogène naturel dans le Bouclier canadien	72
Tableau 5. Sommaire par score du classement des différents secteurs d'intérêt pour les roches sources d'hydrogène naturel dans le Bouclier canadien	72
Tableau 6. Détail de la notation des différents secteurs d'intérêt pour les roches sources d'hydrogène naturel dans le Bouclier canadien	73

RÉSUMÉ

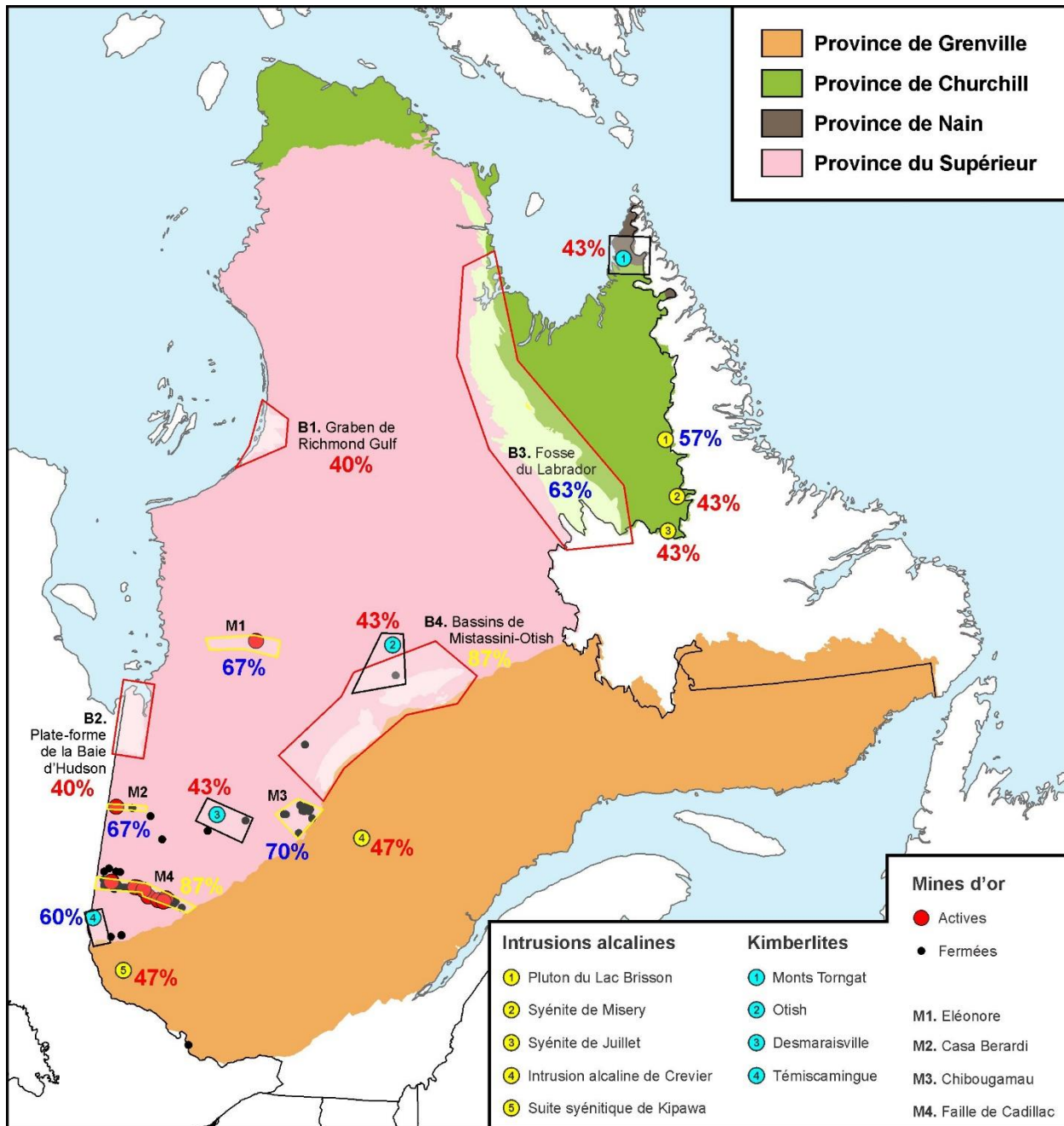
La géologie du Bouclier canadien du Québec a été passée en revue afin d'identifier les régions où des roches sources potentielles d'hydrogène peuvent être présentes. Dix-sept (17) secteurs d'intérêt ont été retenus dans les régions situées au nord du fleuve Saint-Laurent. Ces secteurs peuvent être regroupés en quatre catégories présentant des attributs géologiques comparables :

- Bassins sédimentaires : les ensembles de roches sédimentaires du Protérozoïque à l'Ordovicien pouvant contenir des lithologies riches en fer susceptibles d'avoir produit de l'hydrogène au cours du temps, mais également pouvant constituer des pièges à l'accumulation d'hydrogène. Ces secteurs correspondent au Graben de Richmond Gulf (B1), à la Plate-forme de la Baie d'Hudson (B2), à la Fosse du Labrador (B3) et aux bassins de Mistassini et d'Otish (B4).
- Mines d'or : qui sont représentées par les secteurs d'Éléonore (M1), de Casa Berardi (M2), de Chibougamau (M3), puis des mines de zones de faille de l'Abitibi (M4).
- Kimberlites : qui consistent en des conduits ayant eu accès au manteau et à des éléments pouvant avoir créé de l'hydrogène, et qui ont été traitées en quatre grands champs, soit ceux des monts Torngat (K1), d'Otish (K2), de Desmaraisville (K3), et de Témiscamingue (K4).
- Intrusions alcalines : qui contiennent des minéraux propices à la création d'hydrogène. Cinq principales intrusions ont été traitées et abordées plus en détail, soit le Pluton du Lac Brisson (I1), les Syénites de Misery (I2) et de Juillet (I3), l'Intrusion alcaline de Crevier (I4), et finalement la Suite syénitique de Kipawa (I5).

Enfin, un classement relatif des dix-sept (17) secteurs d'intérêt a été élaboré sur la base de quatre critères : 1) la qualité des données géologiques locales, 2) l'existence et la valeur d'analogues ailleurs dans le monde, 3) la nature des roches réservoirs qui pourraient éventuellement être chargées en hydrogène et 4) la proximité avec des utilisateurs finaux. Ce classement fait ressortir deux secteurs en particulier : 1) les mines d'or des zones de faille de l'Abitibi, ainsi que 2) des bassins sédimentaires de Mistassini et d'Otish. Ces secteurs méritent donc de retenir l'attention en priorité. Le classement général et la localisation des différents secteurs d'intérêt sont présentés à la figure ci-dessous.

Il est à noter que l'évaluation des données publiques issues des travaux de cartographie géologique a mis en évidence la présence d'hydrogène en inclusions fluides dans certains secteurs, mais également sous forme dissoute dans des analyses chimiques d'eau de mines.

Ce travail repose sur des données publiques qui n'ont pas été collectées dans le but de détecter de l'hydrogène naturel et il n'a pas pour objectif de démontrer la présence d'hydrogène dans le sous-sol des secteurs étudiés, ce qui ne sera possible que par la collecte de données sur le terrain.



Carte de localisation et notation des secteurs de sources potentielles d'hydrogène dans le Bouclier canadien au Québec.

1. INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Le Ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie (MEIE) a mandaté l'INRS, Centre Eau Terre et Environnement (INRS-ETE) pour entreprendre des travaux d'évaluation du potentiel en hydrogène naturel au Québec. Dans cette optique, un inventaire des connaissances actuelles sur l'hydrogène naturel a d'abord été réalisé par Séjourné et al. (2023), en se concentrant sur les environnements géologiques qui sont les plus pertinents pour le Québec.

À partir de cet inventaire, il a été possible d'identifier les principaux secteurs au sein desquels des roches sources d'hydrogène peuvent être présentes. Le présent rapport dresse l'inventaire de ces secteurs pour le Bouclier canadien du Québec, qui est situé au nord du fleuve Saint-Laurent et représenté majoritairement par les provinces géologiques du Supérieur, de Churchill et du Grenville (**Figure 1**).

Ce travail accompagne un premier rapport qui se concentre sur les secteurs identifiés dans les bassins sédimentaires du sud du Québec, qui sont situés dans les provinces géologiques de la Plateforme du Saint-Laurent et des Appalaches, et un troisième rapport qui dresse l'inventaire des connaissances et des données géophysiques pertinentes pour l'ensemble de ces secteurs.

1.2 Description du contenu du rapport

Ce rapport s'articule d'abord autour de quatre sections qui documentent les principales caractéristiques géologiques pertinentes pour l'hydrogène naturel dans chacune des quatre catégories de secteurs d'intérêt qui ont été identifiées dans le Bouclier canadien du Québec (Sections 2 à 5). Un classement est ensuite proposé à la Section 6 pour évaluer l'intérêt relatif de chaque secteur par rapport aux autres.

1.3 Portée et limitations de l'étude

Ce rapport vise à dresser un inventaire non-exhaustif des connaissances géologiques actuelles qui permettent de supporter la présence de roches sources d'hydrogène dans les différents secteurs d'intérêt identifiés dans le Bouclier canadien du Québec. Ce rapport n'a pas pour objectif de confirmer l'éventuelle présence d'hydrogène naturel dans les secteurs étudiés et ne doit pas occulter la possibilité que de l'hydrogène, ou des roches sources d'hydrogène, soient présents en dehors des secteurs étudiés.

Ce rapport repose exclusivement sur des données publiques, qui n'ont pas été collectées dans une optique d'exploration pour l'hydrogène naturel : dans certains cas, l'absence d'indices d'hydrogène peut engendrer des « faux négatifs » qui masquent le potentiel réel d'une région. Les résultats présentés ici ne se substituent pas à la collecte de données sur le terrain.

Des mises en garde additionnelles sont présentées dans la Section 6 consacrée au classement des différents secteurs.

1.4 Cadre géologique du Bouclier canadien

La province de Québec est constituée à plus de 90 % des roches précambriennes du Bouclier canadien. Celui-ci s'étend au nord du Fleuve Saint-Laurent et se divise principalement en trois provinces géologiques, soit le Supérieur, le Churchill et le Grenville (**Figure 1**). Une quatrième province géologique est également présente, la Province de Nain (3,8 à 1,3 milliards d'années [Ga]), mais se situe principalement au Labrador, alors qu'elle ne couvre qu'une très petite superficie d'à peine 60 km² au Québec, dans la région des monts Torngat. Une cinquième province, la Province du Sud (2,5-0,6 Ga), affleure à deux petits endroits (< 25 km²) à la frontière avec l'Ontario dans la région du Témiscamingue, mais représente une subdivision du Bouclier canadien beaucoup plus vaste qui s'étend jusqu'au Michigan et au Minnesota (États-Unis).

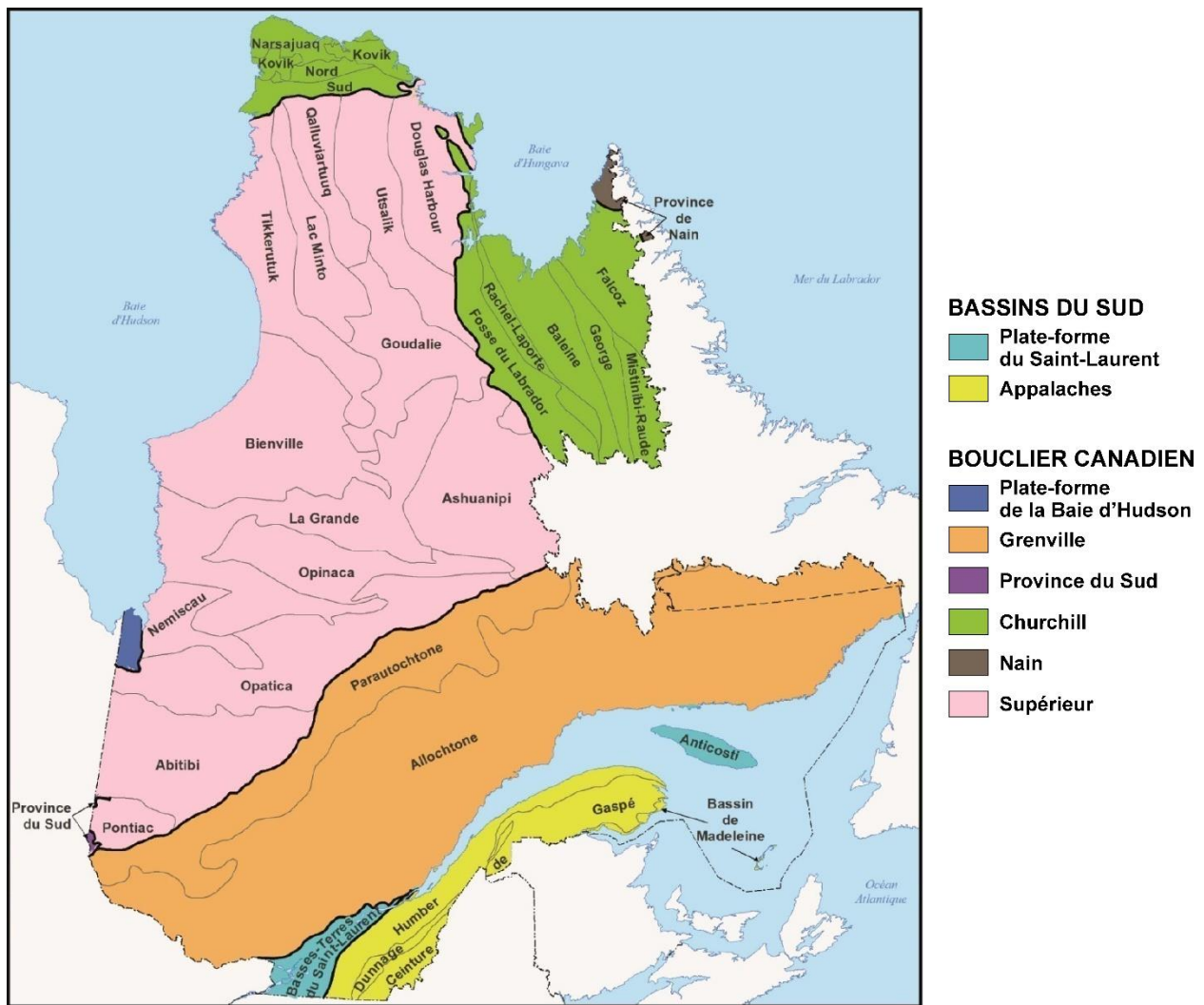


Figure 1. Les grands ensembles et provinces géologiques au Québec.

1.4.1 Province du Supérieur

La Province du Supérieur (4,3-2,5 Ga) constitue le coeur du Bouclier canadien (**Figure 2**) et du continent nord-américain. Représentant le plus vaste craton archéen terrestre, elle couvre un territoire d'environ 1 400 000 km² dont plus de 740 000 km² se trouvent au Québec (Hocq et al., 1994). Ses limites nord, ouest et sud-est (orogènes trans-hudsonien et grenvillien) sont principalement de caractère tectonique, tandis qu'au sud (Orogène pénokéen) et au nord-est (Orogène du Nouveau-Québec), la Province du Supérieur est recouverte en discordance ou chevauchée par des séquences supracrustales du Paléoprotérozoïque (Card et Poulsen, 1998). Mondialement reconnue pour ses nombreux gisements d'or, de cuivre, de zinc, de nickel et d'argent, elle a plus récemment été le lieu d'importantes découvertes de diamant dans des kimberlites.

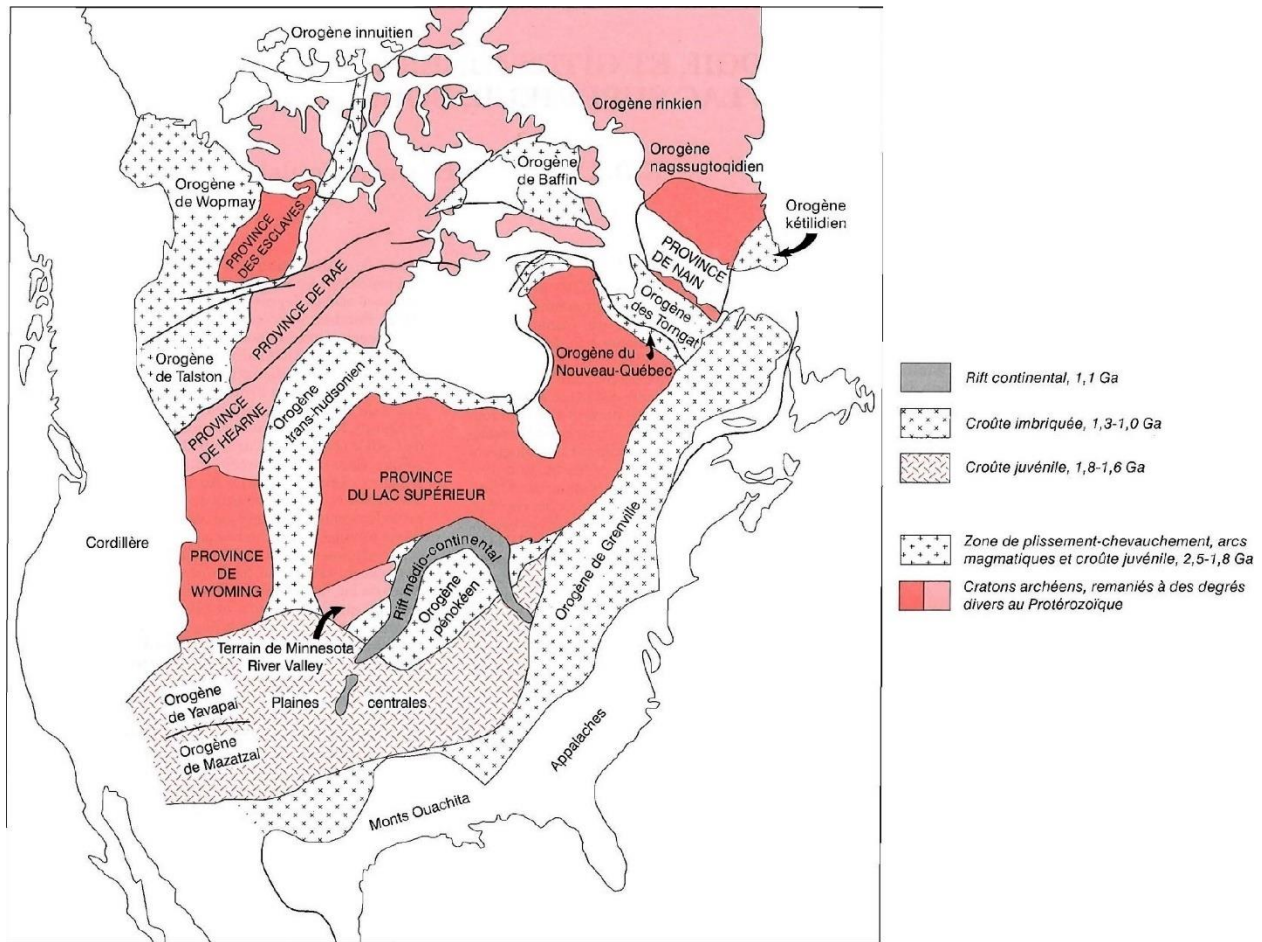


Figure 2. Principaux éléments tectoniques de l'Amérique du Nord (tiré de Hocq et al., 1994; © Gouvernement du Québec).

La Province du Supérieur est subdivisée en 19 sous-provinces, issues des travaux de Card et Ciesielski (1986), Card (1990) et Card et Poulsen (1998), dont huit sont reconnues au Québec. On reconnaît quatre types de sous-provinces (**Figure 3**) : métasédimentaire, métamorphique, volcano-plutonique et plutonique. La plus connue est celle de l'Abitibi, qui est la plus étendue des ceintures volcanosédimentaires archéennes au monde, et est réputée pour ses gisements d'or, de cuivre, de zinc et d'argent.

Au Québec, la Province du Supérieur peut également être divisée en deux grands secteurs. Le secteur méridional est caractérisé par une alternance de sous-provinces linéaires de composition métasédimentaire (Pontiac, Nemiscau et Opinaca), volcano-plutonique (Abitibi, Opatica et La Grande) et métamorphique (Ashuanipi) caractérisées par un grain structural régional orienté E-O. Le secteur nord, presque essentiellement plutonique, correspond à la Sous-province de Minto et comprend différents domaines géologiques orientés généralement NNO-SSE.

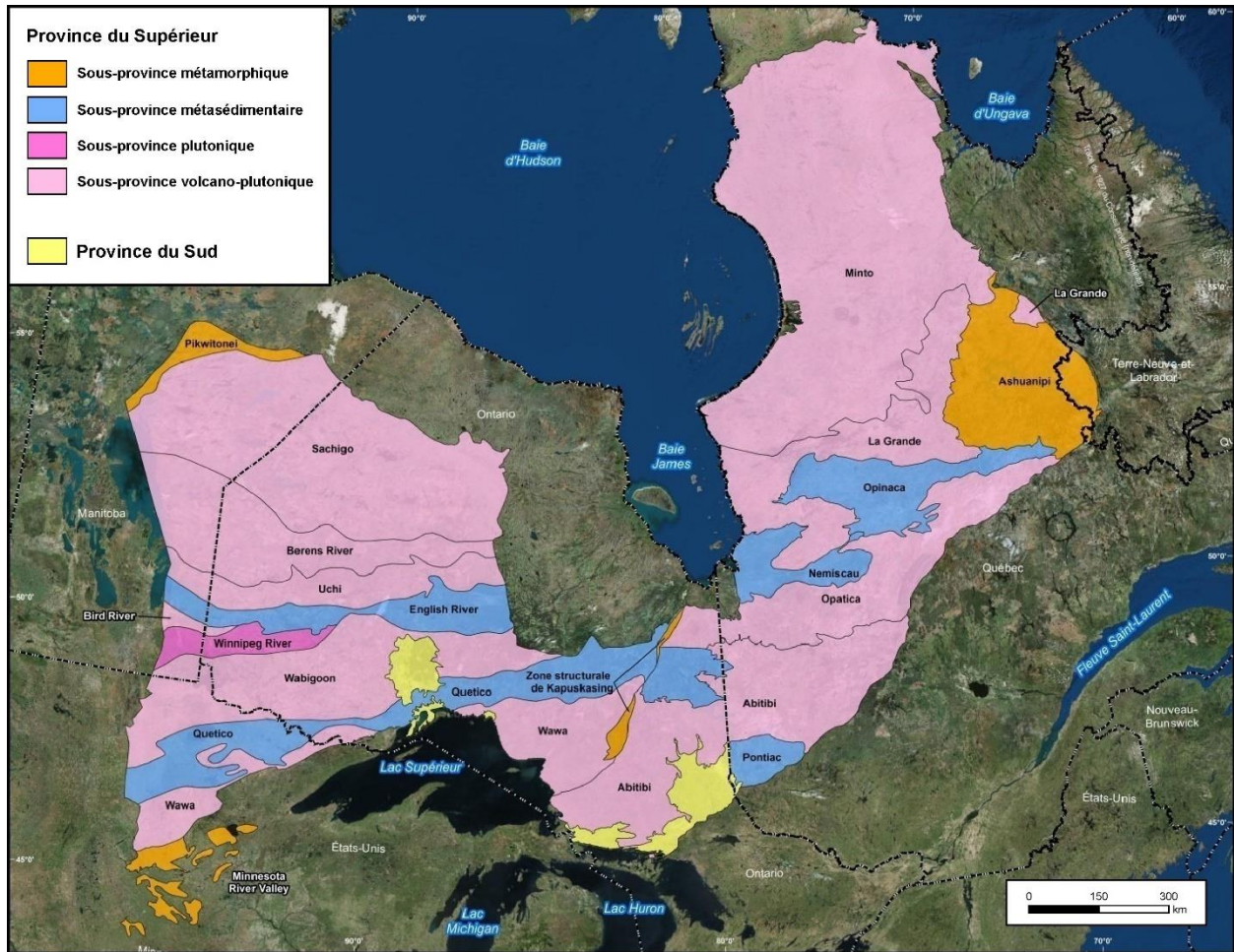


Figure 3. Subdivisions de la Province du Supérieur.

1.4.2 Province de Churchill

La Province de Churchill (2,9-1,1 Ga) couvre une superficie d'environ 200 000 km² et ceinture le Craton du Supérieur. Elle est exposée dans le NE du Québec sous le nom de « Sud-est de la Province de Churchill (SEPC) », ainsi que sur l'extrémité septentrionale de la péninsule d'Ungava, sous le terme « Orogène de l'Ungava » (**Figure 4**).

Le SEPC chevauche la frontière entre le Québec et le Labrador. Il mesure entre 415 et 615 km de longueur sur 250 à 380 km de largeur, selon une orientation générale NNO-SSE. Il est délimité à l'ouest par la Province du Supérieur, à l'est par les provinces de Nain (Craton nord-atlantique et Domaine lithotectonique de Burwell) et de Makkovik, et au sud par la Province de Grenville.

L'Orogène de l'Ungava se situe dans le nord de la péninsule d'Ungava. Il s'étend sur près de 300 km, de la baie d'Hudson à l'ouest jusqu'au détroit d'Hudson au nord et à l'est. Au sud, il est limité par la Province du Supérieur.

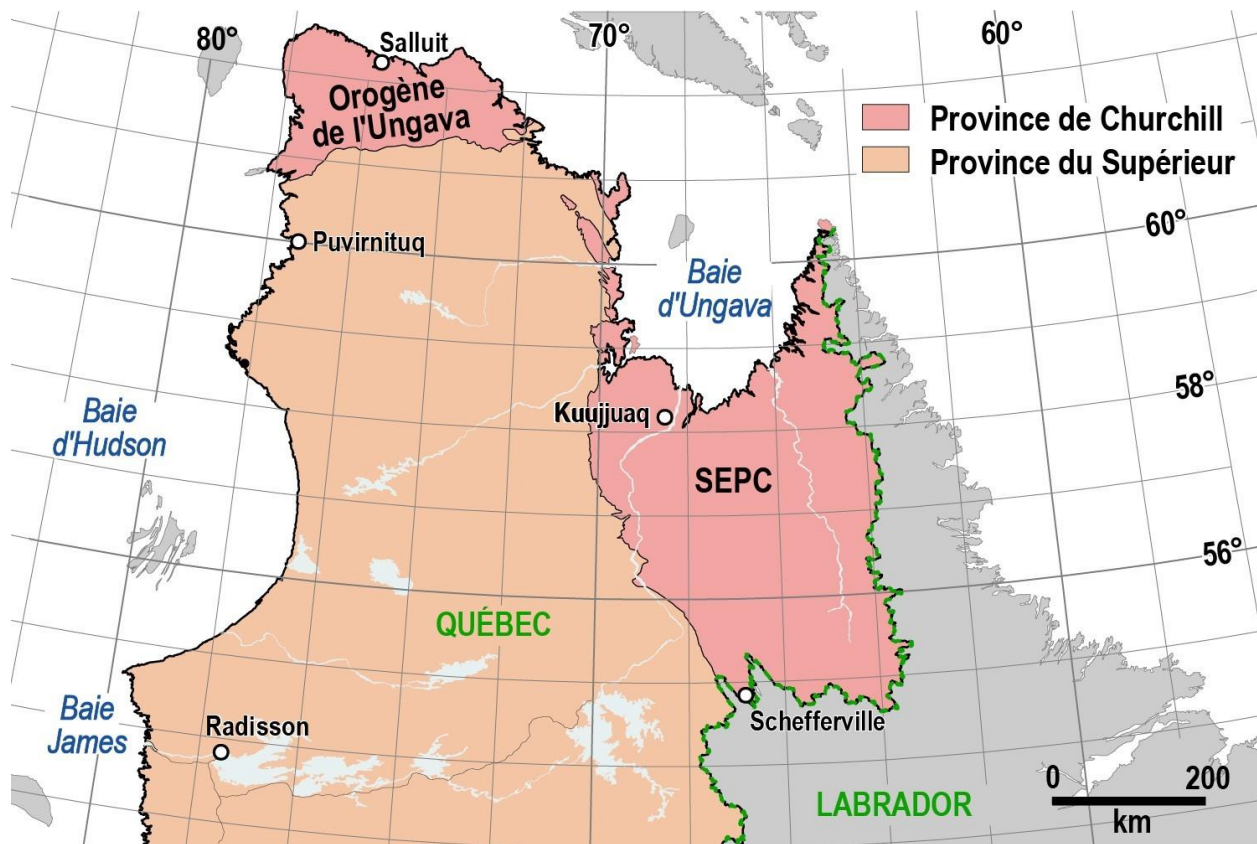
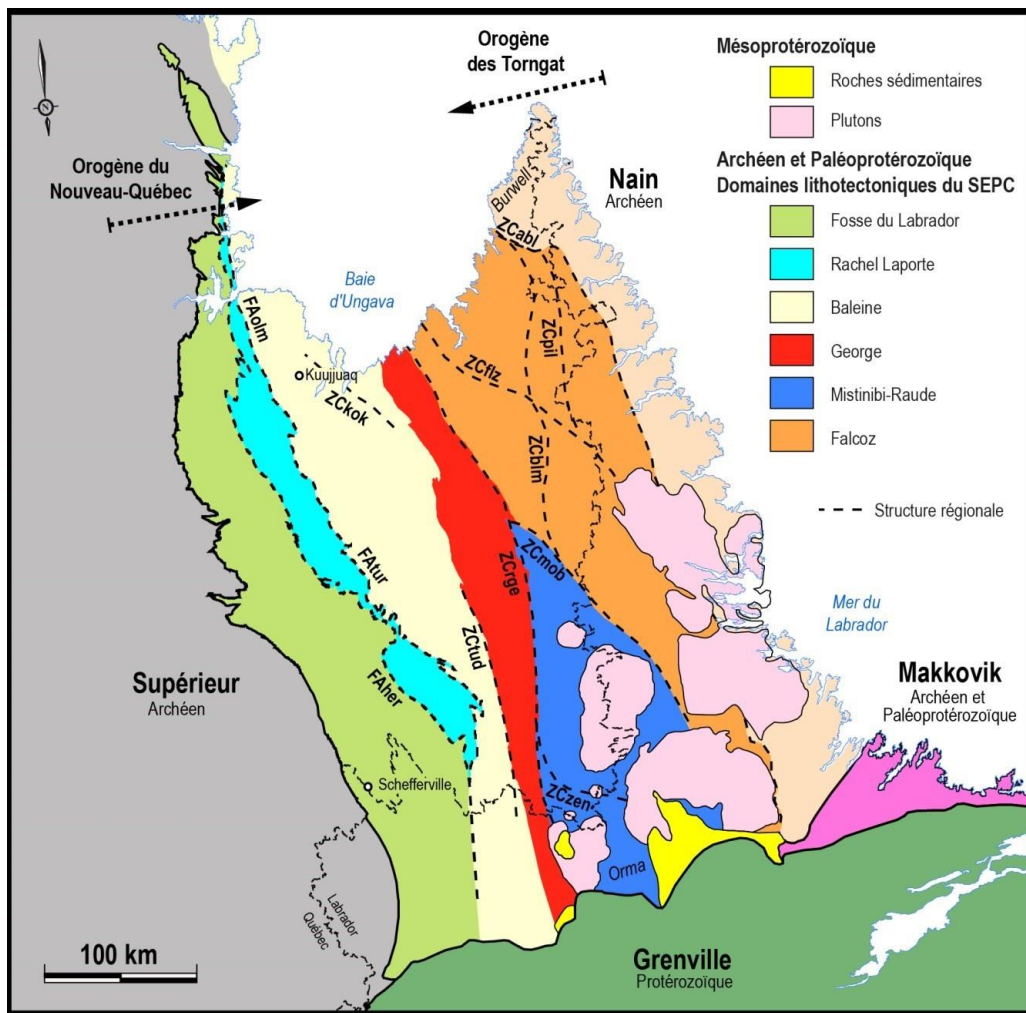


Figure 4. Province de Churchill au Québec.

La partie québécoise de la Province de Churchill fait partie de l'Orogène trans-hudsonien qui regroupe une zone affectée par une empreinte tectono-métamorphique continue et causée par des collisions ayant eu lieu entre 1,83 Ga et 1,8 Ga (Lewry et Collerson, 1990; Corrigan et al., 2009). Ces zones de collision ceinturent le Craton du Supérieur et y soudent des cratons de moindres importances, tel le Craton nord-atlantique. Une géométrie asymétrique reconnue par Hoffman

(1988) est commune aux différents segments de l’Orogène trans-hudsonien. Elle inclut des ceintures de plis et de chevauchements composées de roches supracrustales faiblement métamorphisées ainsi qu’un arrière-pays de croûte archéenne fortement remobilisée au Paléoprotérozoïque et des arcs magmatiques. Ce schéma général est retrouvé tant dans le SEPC que dans l’Orogène de l’Ungava.

Le SEPC est formé de plusieurs blocs lithotectoniques d’origines différentes qui se sont amalgamés lors de l’orogénèse trans-hudsonienne (**Figure 5**). Dans le SEPC, cet événement a produit deux orogènes transpressifs successifs, soit celui des Torngat, à l’est, et du Nouveau-Québec, à l’ouest (Wardle et al., 2002). La portion centrale entre ces orogènes était définie comme étant la Zone noyau par James et al. (1996). Suite aux levés géologiques réalisés par le Ministère de l’Énergie et des Ressources naturelles entre 2009 et 2017, Lafrance et al. (2018) proposent une subdivision du SEPC en six domaines lithotectoniques, qui sont, de l’ouest vers l’est : la Fosse du Labrador, le Rachel-Laporte, le Baleine, le George, le Mistinibi-Raude et le Falcoz.



FAher: Faille du Lac Hérodier; FAolm: Faille du Lac Olmstead; FATur: Faille du Lac Turcotte; ZCabl: Zone de cisaillement d’Abloviak; ZCblm: Zone de cisaillement de Blumath; ZCfz: Zone de cisaillement de Falcoz; ZCkok: Zone de cisaillement de Koksoak; ZCmob: Zone de cisaillement de Moonbase; ZCpil: Zone de cisaillement de Piliamet; ZCrge: Zone de cisaillement de la Rivière George; ZCtud: Zone de cisaillement du Lac Tudor; ZCzen: Zone de cisaillement de Zeni

Figure 5. Sud-Est de la Province de Churchill (SEPC; Lafrance et al., 2018; © Gouvernement du Québec).

1.4.3 Province de Grenville

Au Québec, la Province de Grenville occupe un territoire très étendu de près de 495 000 km² (Figure 6). Elle est limitée au nord par les provinces du Supérieur et de Churchill et au sud par les roches sédimentaires de la Plate-forme du Saint-Laurent et la Province des Appalaches. Elle se divise en deux parties, soit le parautochtone et l'allochtone. La Province de Grenville est reconnue pour ses mines de fer et d'ilménite, de même que pour son potentiel en minéraux industriels.

La Province de Grenville représente l'empreinte du dernier événement tectonique (orogénèse) à avoir façonné le Bouclier canadien. Le Grenville s'est construit étape par étape le long de la marge est du continent Laurentia (noyau continental de l'Amérique du Nord). Il constitue la racine profonde d'une ancienne chaîne de montagnes comparable à l'Himalaya actuel (Windley, 1986). Cette chaîne de montagnes résulterait d'une collision continent-continent entre les continents Laurentia et Amazonia (1090-980 Ma; Rivers et al., 2012).

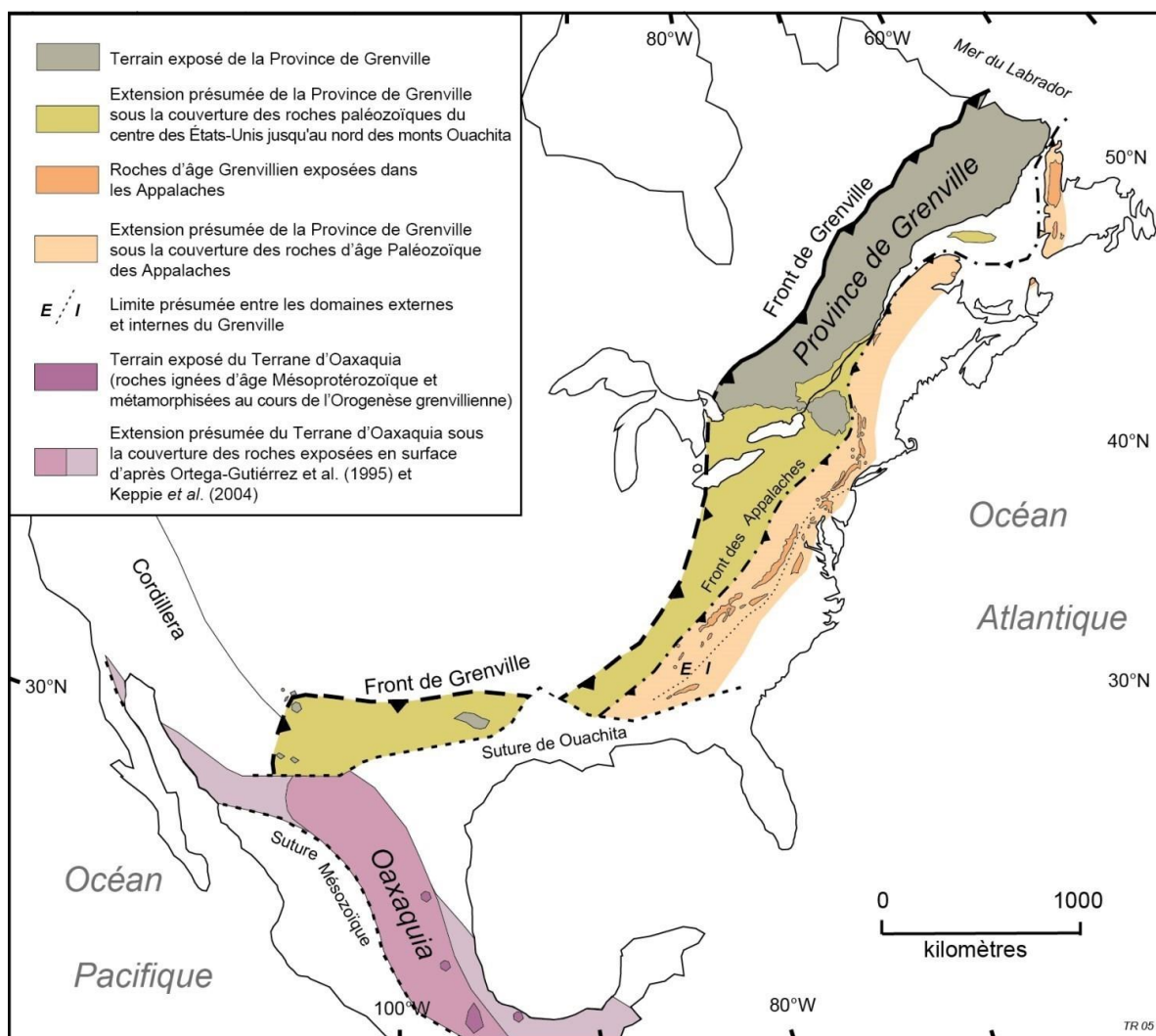


Figure 6. La Province de Grenville et son extension présumée en Amérique du Nord (modifié de Rivers et al., 2012; reproduit avec permission).

Au Canada, la Province de Grenville s'étend sur plus de 2 000 km selon une direction NE entre les Grands Lacs, au SO, et le Labrador, au NE, avec une largeur moyenne de 350 km. Le Front de Grenville, bien visible sur les cartes aéromagnétiques, sépare la Province de Grenville de la Province du Supérieur. D'un point de vue géographique, la Province de Grenville est subdivisée en trois secteurs (**Figure 7**) : ouest (O), central et est (E). De façon arbitraire, la partie O du Grenville s'étend de Trois-Rivières jusqu'à la frontière avec l'Ontario. La partie E occupe la région de Sept-Îles jusqu'au Labrador (Terre-Neuve) et la partie centrale se situe entre les deux, soit à partir de Sept-Îles à l'est jusqu'à Trois-Rivières à l'ouest (Moukhsil et Solgadi, 2018).

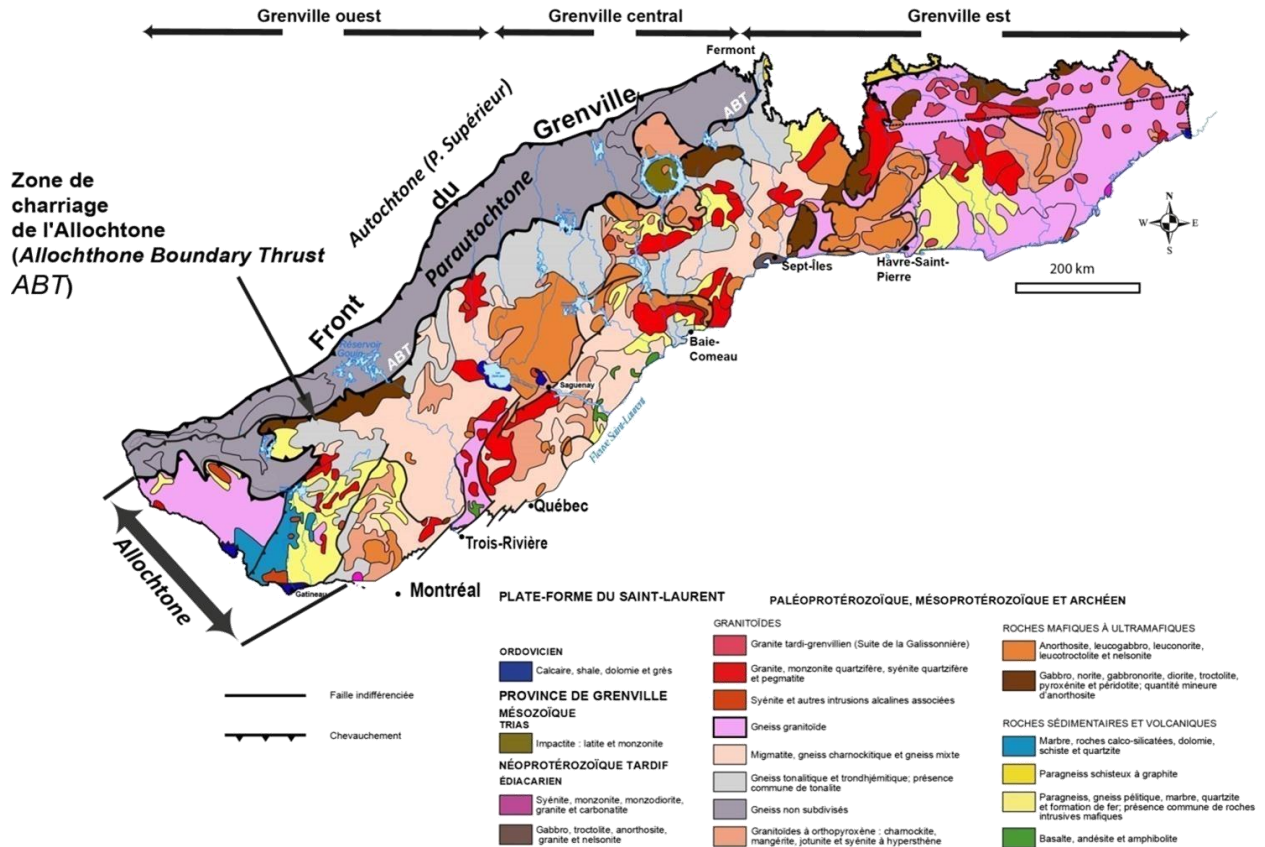


Figure 7. Principales divisions lithotectoniques de la Province de Grenville (Moukhsil et Solgadi, 2018; © Gouvernement du Québec).

À l'extérieur du Bouclier canadien, la Province de Grenville s'étire vers le sud-ouest jusqu'au Texas et au Mexique (Cameron et al., 2004). Des roches précambriennes d'âge grenvillien se retrouvent aussi imbriquées dans les Appalaches. Elles forment la grande écaille du Long Range dans la Zone de Humber, à Terre-Neuve, et des copeaux dans des zones de failles tectoniques au Québec. Au-delà de l'Amérique du Nord (**Figure 8**), la Province de Grenville a été reconnue à l'intérieur de boutonnières dans les Calédonides de l'Irlande du Nord, en Écosse, puis en Norvège et dans la Province svéconorvégienne en Scandinavie (Davidson, 1998; Lorenz et al., 2012). Selon plusieurs auteurs, elle se poursuivrait de l'Amérique centrale à l'Antarctique, et de l'Inde à l'Australie (par ex. Karlstrom et al., 1999).

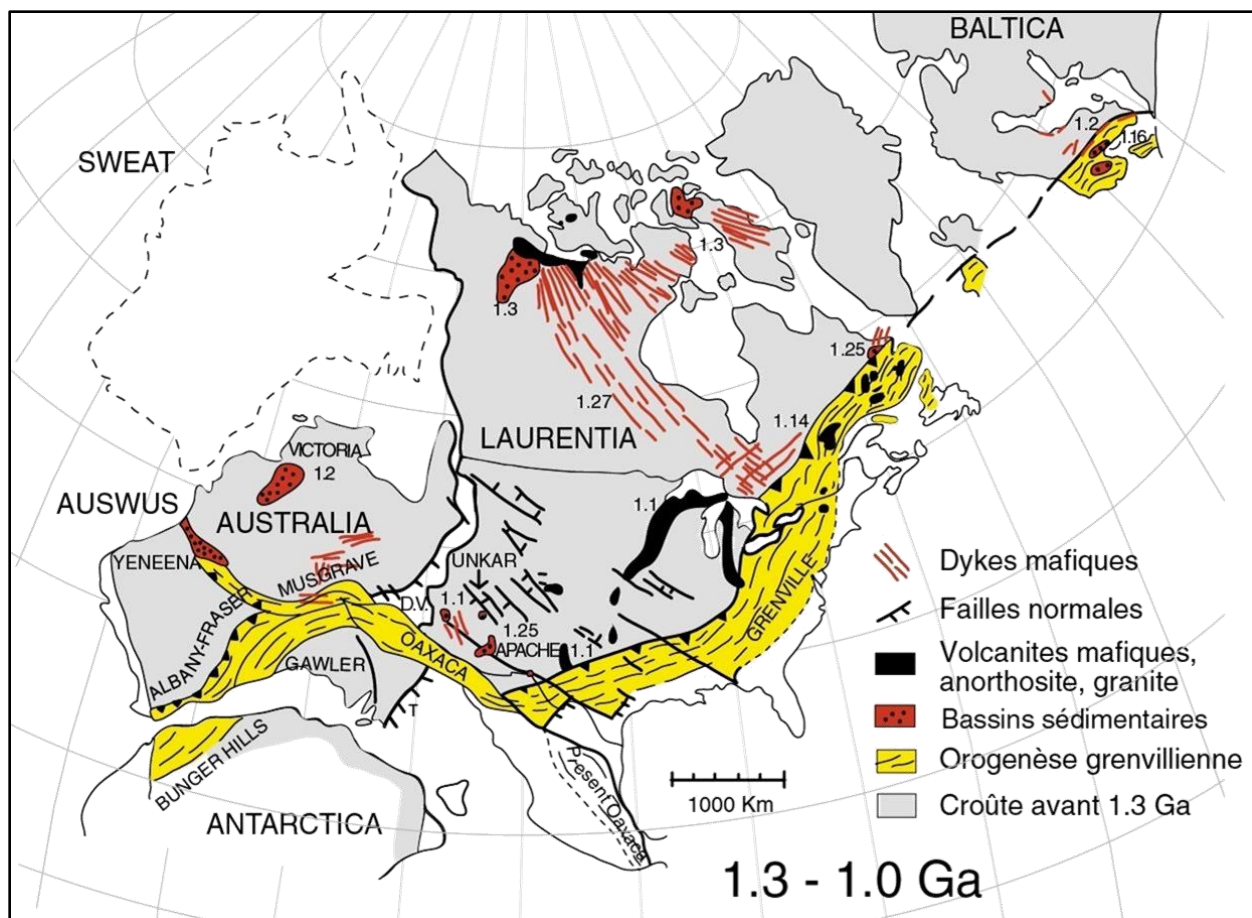


Figure 8. La Province de Grenville et son extension présumée dans le monde (modifié de Karlstrom et al., 1999; ; reproduit avec permission).

1.5 Identification des secteurs d'intérêt

Les secteurs d'intérêt au sein desquels des roches sources d'hydrogène peuvent être présents ont été définis sur la base des connaissances actuelles sur les sources d'hydrogène naturel dans le monde, en tenant compte des spécificités de la géologie du Québec. La synthèse de ces connaissances est présentée dans la revue de littérature de Séjourné et al. (2023) et les différents concepts présentés dans cette revue ne sont pas répétés dans le présent rapport. Les caractéristiques géologiques de chaque secteur sont détaillées dans les sections suivantes, puis le classement relatif des différents secteurs d'intérêt est présenté à la **Section 6**.

Au total, dix-sept (17) secteurs au sein desquels des roches sources d'hydrogène peuvent être présentes dans le Bouclier canadien ont été identifiés sur la base des données géologiques disponibles et ont été regroupés en quatre catégories (**Figure 9**) :

- Bassins sédimentaires : qui correspondent au Graben de Richmond Gulf (B1), à la Plateforme de la Baie d'Hudson (B2), à la Fosse du Labrador (B3) et aux bassins de Mistassini-Otish (B4).

- Mines d’or : qui sont représentées par les secteurs d’Éléonore (M1), de Casa Berardi (M2), de Chibougamau (M3), puis des mines de zones de faille de l’Abitibi (M4).
- Kimberlites : quatre grands champs ont été traités, soit ceux des monts Torngat (K1), d’Otish (K2), de Desmaraisville (K3), et de Témiscamingue (K4).
- Intrusions alcalines : qui sont au nombre de cinq, soit le Pluton du Lac Brisson (I1), les Syénites de Misery (I2) et de Juillet (I3), l’Intrusion alcaline de Crevier (I4), et finalement la Suite syénitique de Kipawa (I5).

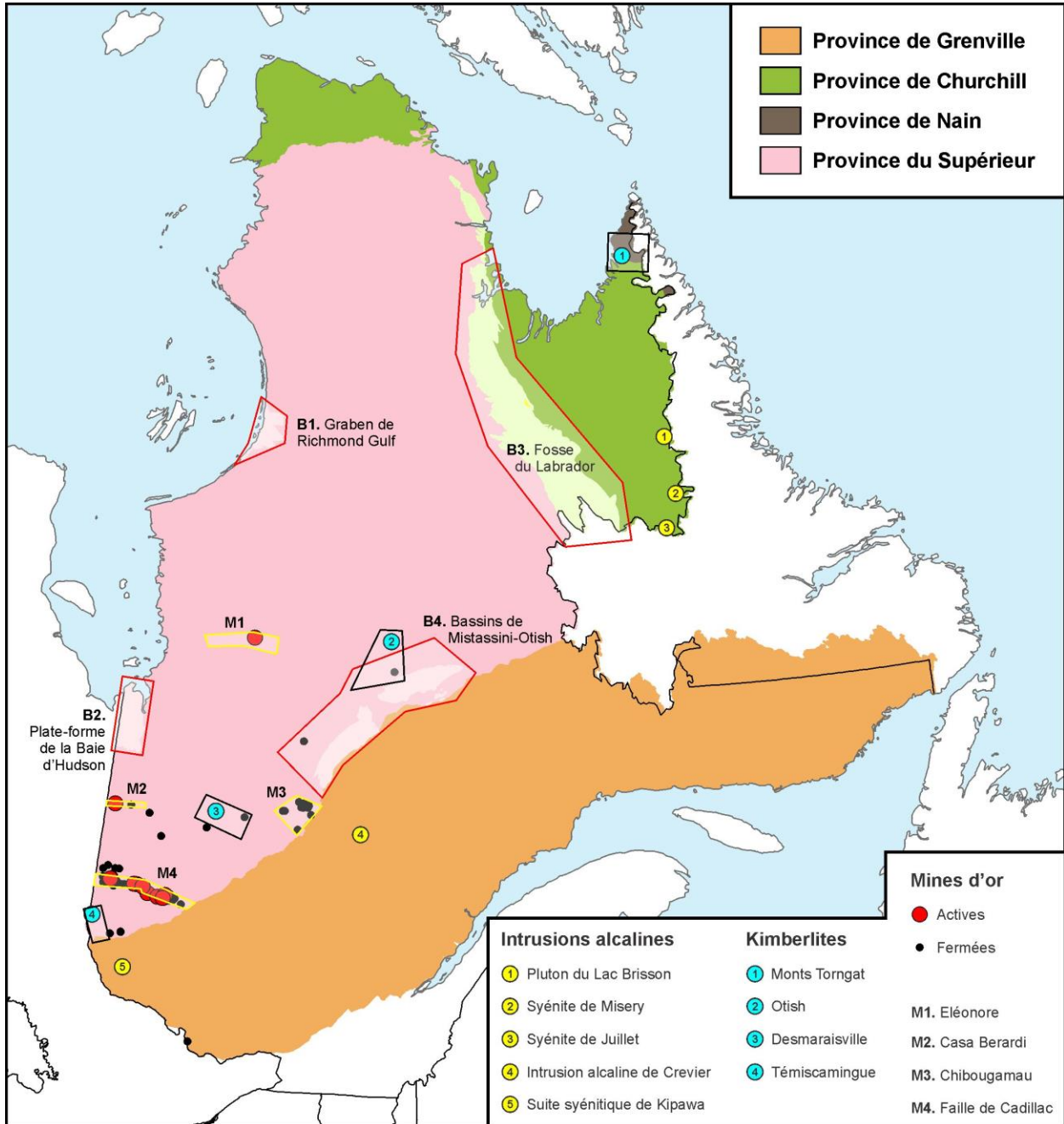


Figure 9. Localisation des secteurs de sources potentielles d’hydrogène dans le Bouclier canadien.

2. LES BASSINS SÉDIMENTAIRES

2.1 Graben de Richmond Gulf (B1)

Le Graben de Richmond Gulf se situe au centre de la côte est de la Baie d'Hudson dans la Province du Supérieur. Orienté est-ouest, le graben atteint une largeur de 75 km et une longueur d'environ 65 km pour se terminer en biseau vers l'est (Chandler, 1988). Il est limité au nord et au sud par des failles listriques d'orientation est-ouest qui le séparent du socle granitique archéen, renfermant ainsi le lac Guillaume Delisle. Le graben présente deux séries principales de roches sédimentaires et volcaniques d'âge aphébien (protérozoïque), les groupes de Richmond Gulf et de Nastapoka (**Figure 10**; Labbé et Lacoste, 2004).

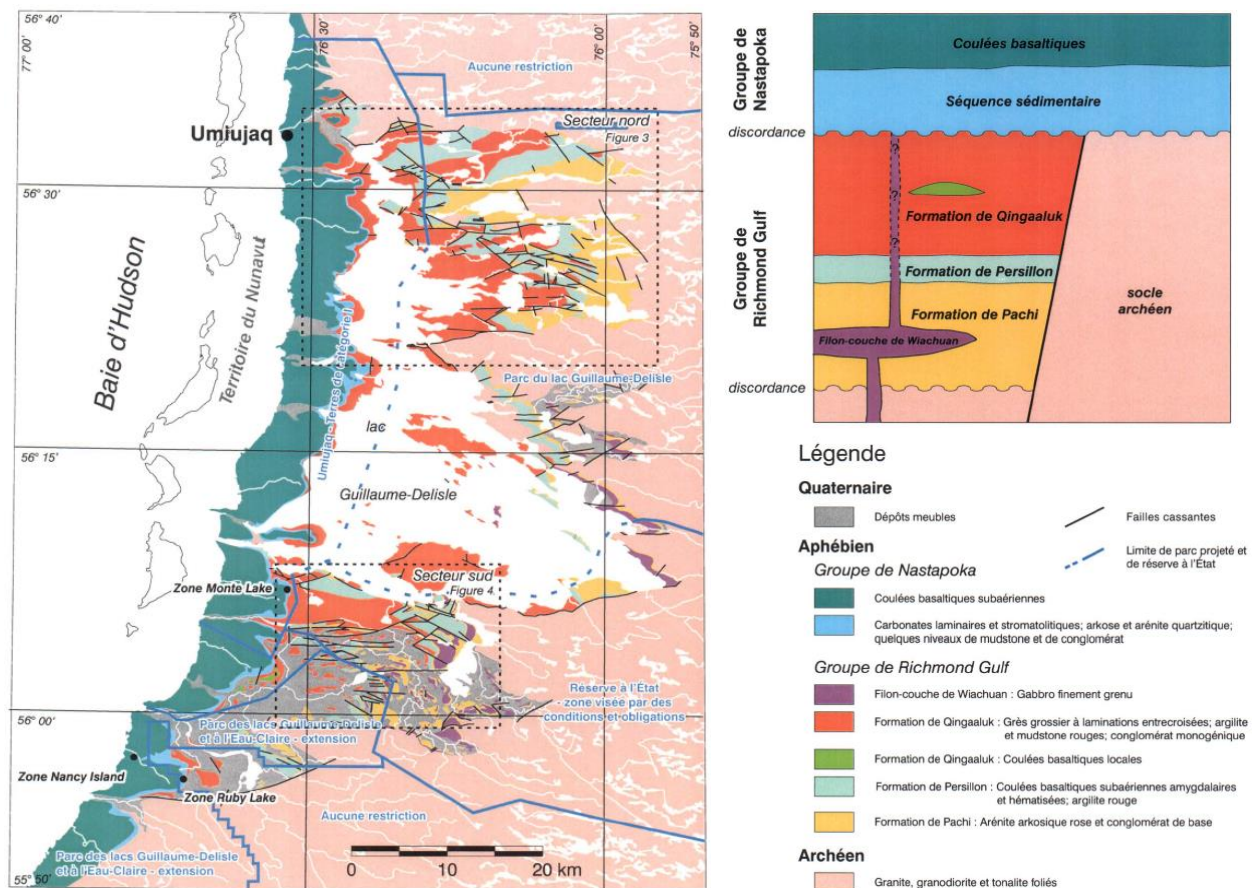


Figure 10. Carte géologique et profil stratigraphique schématisé des roches du Graben de Richmond Gulf de la région du lac Guillaume-Delisle (tiré de Labbé et Lacoste, 2004; © Gouvernement du Québec).

Les granitoïdes archéens sont surmontés par les roches du Groupe de Richmond Gulf, qui sont attribuées au Protérozoïque précoce (Aphébien). Le contact entre ces deux ensembles stratigraphiques est une discordance. La base du Groupe de Richmond Gulf est représentée par la Formation de Pachi, une unité arkosique dont l'épaisseur moyenne est d'environ 200 m et qui peut localement atteindre près de 500 m. Un conglomérat de base marque localement la discordance

entre la Formation de Pachi et le socle archéen. La lithologie principale de la Formation de Pachi est une arénite arkosique de couleur rose à laminations entrecroisées.

La Formation de Pachi est recouverte par les unités basaltiques de la Formation de Persillon. L'épaisseur de la Formation de Persillon varie de zéro à environ 70 m. Cette unité est constituée principalement de coulées mafiques subaériennes contenant quelques intercalations d'argilites et de siltstones rouges. Le sommet des coulées est fortement hématisé.

La Formation de Qingaaluk surmonte les basaltes de la Formation de Persillon et constitue les niveaux supérieurs du Groupe de Richmond Gulf. Elle comprend cinq unités lithologiques distinctes et son épaisseur réelle est supérieure à 500 m. La base de la formation est constituée d'un horizon d'environ un mètre d'épaisseur de conglomérat à blocs. Ce conglomérat se compose de fragments décimétriques, communément subarrondis, de basalte dans une matrice de grès ou de mudstone rouge. Le conglomérat est recouvert par environ 80 m de mudstones et de grès fins à moyens en lits rouges. Les niveaux fins montrent communément des rides de courant et des fentes de dessiccation. La troisième unité se compose de grès grossiers de couleur rose, grise ou verte qui sont très semblables à ceux de la Formation de Pachi. Cette unité, qui présente aussi des laminations entrecroisées, constitue la majeure partie de la Formation de Qingaaluk. Finalement, la partie sommitale de la Formation de Qingaaluk est représentée par une arkose grossière très pâle interlitée de siltstones et d'argilites foncés.

Le Groupe de Richmond Gulf contient aussi une unité mafique intrusive, le Filon-couche de Wiachuan, qui s'est injecté principalement au niveau de la Formation de Pachi. Il s'agit d'un gabbro très finement grenu qui peut beaucoup ressembler à certains horizons plus grossiers de la Formation de Persillon. Selon Chandler (1988), ce filon-couche recoupe toutes les autres unités du Groupe de Richmond Gulf.

Le Groupe de Nastapoka repose en discordance sur les unités du Groupe de Richmond Gulf, à l'intérieur du graben, et sur les roches du socle archéen de part et d'autre du graben. Les roches du Groupe de Nastapoka recouvrent les failles normales associées au graben; elles se sont donc déposées subséquemment au développement de ces failles. L'épaisseur maximale du Groupe de Nastapoka, dans le secteur du lac Guillaume-Delisle, est évaluée à environ 160 m.

Le Groupe de Nastapoka est composé d'une séquence sédimentaire subhorizontale surmontée de coulées basaltiques subaériennes plus résistantes à l'érosion. Les roches sédimentaires du Groupe de Nastapoka comprennent des conglomérats, des grès grossiers à fins, ainsi que quelques horizons silteux à argileux. Cette séquence sédimentaire est toutefois caractérisée par des horizons carbonatés qui marquent la partie centrale de l'empilement. L'un de ces horizons carbonatés est stromatolitique et présente des minéralisations en Pb-Zn. La présence de brèches sommitales, de vésicules et d'une légère hématisation en surface laisse aussi supposer un environnement de déposition subaérien pour ces roches.

Plusieurs indices de cuivre et d'argent ont été découverts, en 2000, par une équipe du Fonds d'exploration minérale du Nunavik, dans les basaltes de la Formation de Persillon, aux abords du lac Guillaume-Delisle. Puis à l'été 2003, des travaux de terrain ont permis de mettre au jour 18 nouveaux indices minéralisés (Séguin et al., 2003).

Toutes ces zones montrent des minéralisations en cuivre et argent dans des roches volcaniques de milieu subaérien qui sont peu ou non métamorphisées. La chalcocite et la bornite sont disséminées et à l'intérieur d'amygdales dans les basaltes qui sont fortement hématisés et associés à des lits sédimentaires rouges. Une de ces zones se trouve au sein d'un filon-couche de gabbro. Ces zones minéralisées sont caractéristiques des gîtes de cuivre de type lits rouges volcaniques (Labbé et Lacoste, 2004).

2.2 Plate-forme d'Hudson (B2)

Le bassin sédimentaire d'Hudson dans la Province du Supérieur repose sur les zones côtières de la baie d'Hudson dans le nord du Manitoba, de l'Ontario, et d'une petite partie (5 500 km²) au Québec, tout juste au sud de la Baie-James (**Figure 11**). La succession sédimentaire Ordovicien-Jurassique a une épaisseur pouvant atteindre 2 000 m dans la partie centrale de la baie d'Hudson (Sanford et Norris, 1975), tandis qu'elle a à peine une centaine de mètres au Québec et consiste seulement en des roches ordovico-siluriennes à la base de la séquence sédimentaire (**Figure 12**). Elle est constituée de roches sédimentaires paléozoïques de composition semblable à celles trouvées sur la Plate-forme du Saint-Laurent, et qui reposent directement sur les roches du socle précambrien.

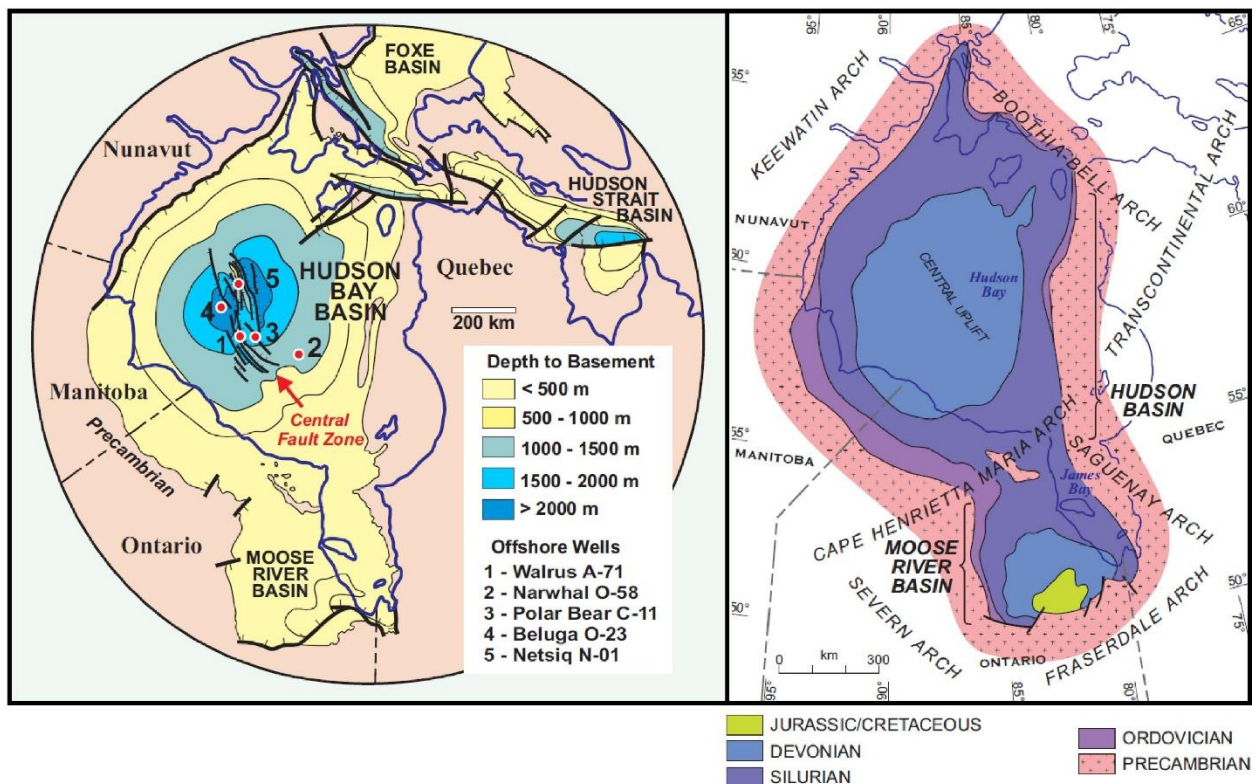


Figure 11. A) Cadre régional du bassin sédimentaire de la plate-forme paléozoïque d'Hudson, avec les profondeurs du socle précambrien, les failles majeures, et l'emplacement des cinq puits offshore forés (tiré de Hu et Dietrich, 2012; © Ressources naturelles Canada). B) Cadre géologique et unités stratigraphiques de la plate-forme d'Hudson (tiré de Hamblin, 2008; © Ressources naturelles Canada).

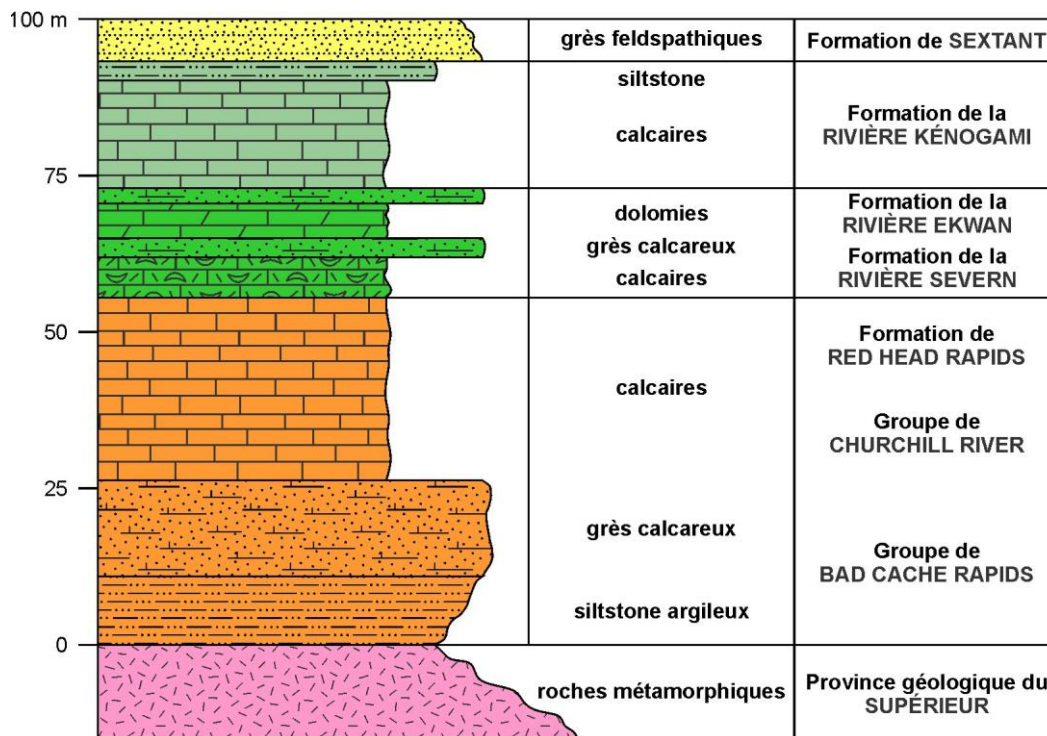


Figure 12. Colonne stratigraphique des unités sédimentaires du bassin d’Hudson au Québec (adapté de Remick et al., 1963; © Gouvernement du Québec).

Les roches paléozoïques les plus anciennes du bassin de la baie d’Hudson ont été déposées dans des eaux marines peu profondes, peut-être en relation avec la plate-forme du Saint-Laurent, dans un bassin d’extension restreint, caractérisé par de nombreuses petites failles (Lavoie et al., 2013). Le relief sous-marin était faible et l’épaisseur sédimentaire assez uniforme. Cette séquence se compose d’une couche relativement mince de roches clastiques à la base recouverte principalement de calcaires, de calcaires dolomitiques, de dolomies et d’évaporites dans les formations de Bad Cache Rapids, de Churchill River et de Red Head Rapids (**Figure 12**). Des intervalles de shale relativement minces, appelés officieusement shale de Boas River, sont reconnus sur la bordure nord du bassin et peut-être au large. Un seul intervalle de schiste calcaire, mais beaucoup plus épais, est également reconnu localement sur la bordure sud-ouest du bassin. La présence d’évaporites carbonatées cycliques dans la Formation de Red Head Rapids (Ordovicien supérieur) indique un environnement sédimentaire marin peu profond relativement hypersalin et un dépôt dans un milieu confiné plutôt que sur une plate-forme reliée à des domaines d’eaux profondes. La séquence se termine par une exposition subaérienne et le développement d’une discordance, probablement associée à l’abaissement du niveau de la mer à l’échelle mondiale, en lien avec la glaciation du Gondwana à la fin de l’Ordovicien (Cherns et Wheeley, 2009). La séquence suivante recouvre la discordance Ordovicien-Silurien et comprend des carbonates d’eau peu profonde (formations de Severn River, Ekwan River et Kenogami River; **Figure 12**) déposés dans un bassin tectoniquement actif. La séquence silurienne se termine avec l’émergence à grande échelle du bassin de la baie d’Hudson, le début du soulèvement central et le développement de la discordance du Silurien supérieur au Dévonien inférieur, qui peut refléter des variations eustatiques, notamment des effets distaux de l’orogénèse calédonienne.

En 1971, la Société Québécoise d'Initiatives Pétrolières (SOQUIP) a réalisé une étude sur les possibilités de ressources pétrolières dans la région de la Baie James au Québec, et plus particulièrement pour la plate-forme d'Hudson (Blanchet et Dépatie, 1971). Malgré la présence de quelques indicateurs encourageants, comme la présence de roches réservoirs et de traces d'huile dans des grès siluriens, les auteurs concluent à des chances faibles, voire nulles, de trouver des hydrocarbures dans cette région, notamment en raison de l'absence de suintements, de la faible amplitude des deux aires de sédimentation et de leur faible épaisseur.

2.3 Fosse du Labrador (B3)

La Fosse du Labrador dans la zone Sud-est de la Province de Churchill est également connue sous l'appellation « Orogène du Nouveau-Québec » dans de nombreux articles et rapports qui traitent de sa géologie. Elle tire son nom du territoire du même nom, le Labrador, qui constitue la majorité de la superficie de la province de Terre-Neuve-et-Labrador.

La Fosse du Labrador constitue l'avant-pays (partie occidentale) de l'Orogène du Nouveau-Québec, lequel se divise en deux grands domaines lithotectoniques : la Fosse du Labrador, à l'ouest, et la Zone de Rachel-Laporte, à l'est (**Figure 5**). La Fosse est aussi une partie importante de l'Orogène trans-hudsonien qui représente une vaste ceinture orogénique s'étendant vers le nord-est depuis le Dakota du Nord jusqu'au Groenland et qui constitue, dans sa partie québécoise, la Province de Churchill. Les roches de la Fosse du Labrador s'étirent sur une distance d'environ 850 km à partir du Front de Grenville, au sud, jusqu'à la rive ouest de la baie d'Ungava, au nord. La Fosse est limitée à l'ouest et au nord par la Province du Supérieur, au sud par le Front de Grenville et à l'est par la Zone de Rachel-Laporte.

La Fosse du Labrador est une ceinture volcano-sédimentaire à vergence sud-ouest qui a été plissée et transportée sur les roches de la marge nord-est de la Province du Supérieur lors de l'orogénèse du Nouveau-Québec au Paléoproterozoïque (Clark, 1994; Hoffman, 1990). Elle est principalement formée de roches sédimentaires et ignées aux faciès des schistes verts et d'amphibolites dont l'âge s'étale entre 2,17 et 1,87 Ga (Rohon et al., 1993; Machado et al., 1997). Ces roches se sont formées dans des milieux très variés : rifts, plates-formes et talus continentaux, bassins océaniques et environnements fluviaux (Clark, 1994). Il en a résulté une grande variété de roches sédimentaires dont les plus connues sont les formations de fer de la région de Schefferville (**Figure 13**). La Fosse comprend aussi plusieurs niveaux de laves basaltiques, de nombreux filons-couches mafiques et ultramafiques d'affinité tholéitique, ainsi que des unités de laves mafiques à felsiques d'affinité alcaline. Enfin, il faut signaler la présence d'un complexe de carbonatite de 15 km de longueur, la carbonatite de Le Moyne, encaissée dans une séquence de coulées de rhyodacites, de volcanites très potassiques et de basaltes associés à des sédiments dolomitiques et pélitiques.

La Fosse du Labrador comprend deux grands cycles de sédimentation et de volcanisme et un troisième cycle de sédimentation qui constituent le Supergroupe de Kaniapiskau (Frarey et Duffell, 1964) (**Figure 14**). Le premier cycle comprend une séquence de bassin intracratonique (rift) surmontée par une séquence de marge continentale passive. Les dépôts du premier cycle sont constitués de grès et de conglomérats du Groupe de Seward reposant en discordance sur le socle archéen (Province du Supérieur) et représentant une séquence immature de rift continental. Cette

séquence se serait déposée le long de la marge nord-est de la Province du Supérieur il y a 2,2 Ga (Hoffman, 1988; Wardle et al., 2002). Une activité volcanique était contemporaine à la sédimentation (Clark et Wares, 2004). Le Groupe de Seward est surmonté par les grès et les dolomies du Groupe de Pistolet qui ont été déposés sur une plate-forme de marge passive. Cette plate-forme s'est éventuellement effondrée et la séquence suivante de basaltes et de flysch du Groupe de Swampy Bay s'est déposée en milieu marin. La fin du premier cycle est caractérisée par une régression marine durant laquelle s'est déposé le complexe récifal dolomitique du Groupe d'Attikamagen.

Le deuxième cycle, dont l'âge varie entre 1,88 et 187 Ga, débute par une transgression marine caractérisée par les sédiments du Groupe de Ferriman comprenant de la base au sommet : les grès et arénites quartzitiques de la Formation de Wishart; les mudstones, les siltstones et les grès ferrifères de la Formation de Ruth, les sédiments ferrifères et cherteux de la Formation de Sokoman et les grès, mudstones et turbidites de la Formation de Menihek (Clark et Wares, 2004; Dimroth, 1978). Ces roches reposent en discordance sur la Province du Supérieur et les roches du premier cycle (Dimroth, 1978). Dans la partie centre-sud de la Fosse, la séquence formée par les formations Wishart-Sokoman-Menihek du Groupe de Ferriman se corrèle de façon chronostratigraphique avec les basaltes et les flysch du Groupe de Doublet (Clark et Wares, 2004). La partie nord de la Fosse est formée par la séquence du Groupe de Koksoak constitué des unités turbiditiques et ferrifères de la Formation de Baby, à la base, surmontées des basaltes de la Formation d'Hellancourt, au sommet. La fin du deuxième cycle comprend des conglomérats et des dolomies du Groupe de Le Moyne qui caractérisent la partie centre-nord de la Fosse. De nombreux filons-couches mafiques à ultramafiques d'affinité tholéïitique associés à la Supersuite intrusive de Montagnais recoupent toutes les séquences du premier et du deuxième cycle. De plus, une importante intrusion de carbonatite (Complexe carbonatitique de Le Moyne) s'est mise en place vers la fin du deuxième cycle. Les roches de plate-forme du deuxième cycle sont surmontées de façon discordante par une séquence de molasse synorogénique du troisième et dernier cycle sédimentaire.

Clark et Wares (2004) divisent la Fosse du Labrador en onze zones lithotectoniques basées sur des critères distinctifs comme les assemblages lithologiques, le style structural et la distribution des gîtes minéraux. Trois zones correspondent à des roches sédimentaires autochtones et parautochtones (zones de Bérard, de Cambrien et de Tamarack), trois zones à des roches sédimentaires allochtones (zones de Mélèzes, de Schefferville et de Wheeler) et cinq zones à des séquences volcano-sédimentaires du premier cycle (Zone de Howse), du deuxième cycle (zones de Payne, de Gerido et de Retty) ou des deux premiers cycles (Zone de Hurst).

Plusieurs modèles d'évolution tectonique ont été proposés pour expliquer l'origine de la Fosse du Labrador et de son arrière-pays (Wardle et Bailey, 1981; Hoffman, 1987, 1990; Wares et al., 1988; Van der Leeden et al., 1990; St. Seymour et al., 1991; Wares et Skulski, 1992; Skulski et al., 1994). Dans leur synthèse, Clark et Wares (2004) ont posé les jalons de l'évolution de la Fosse du Labrador sur la base des modèles antérieurs et des données géochronologiques disponibles.

L'histoire géologique de l'Orogène du Nouveau-Québec s'échelonne sur une période de plusieurs dizaines de millions d'années comprise entre ~2,2 et 1,74 Ga (chronologie de l'évolution de l'Orogène du Nouveau-Québec) :

- 1) Il y a environ 2,2 Ga, les roches de la partie occidentale de l'Orogène du Nouveau-Québec (Fosse du Labrador) se sont déposées le long de la marge archéenne de la Province du Supérieur à la suite d'un rifting. Cette période, qui correspond au début de la sédimentation du cycle 1, est caractérisée par le dépôt de sédiments immatures, de volcanites légèrement alcalines et la mise en place de dykes mafiques;
- 2) Entre 2,17 et 2,14 Ga environ, le dépôt de sédiments de marge passive, un volcanisme mafique de type MORB et la mise en place de filons-couches mafiques caractérisent la majeure partie du cycle 1. La fin de cycle (< 2,06 Ga) est marquée par le dépôt de dolomies et de cherts sur une plate-forme rétablie;
- 3) De 1,88 à 1,87 Ga, la sédimentation de plate-forme et bassin du cycle 2 est associée à un nouvel épisode de rifting ou au développement d'un bassin d'avant-fosse. Cette période est caractérisée par le dépôt de méiméchites et de carbonatites, un volcanisme mafique de type MORB correspondant à la formation d'une croûte continentale-océanique de transition et à la mise en place de filons-couches mafiques à ultramafiques;
- 4) De 1,84 à 1,83 Ga, une phase de déformation et de métamorphisme de grade élevé se manifeste dans l'arrière-pays de l'Orogène du Nouveau-Québec près de Kuujjuaq. Au cours de la même période et jusqu'à 1,81 Ga, une intrusion granitique et charnockitique d'envergure régionale, la Supersuite de De Pas (anciennement Batholite de De Pas), se met en place. Cette supersuite est interprétée par plusieurs auteurs comme étant associée à un environnement d'arc magmatique protérozoïque relié à une zone de subduction développée lors de l'Orogenèse du Nouveau-Québec (Dunphy et Skulsky, 1996; Martelain et al., 1998). Selon Wardle et al. (1990, 2002), cette supersuite pourrait aussi être associée à une composante syn-collisionnelle dans l'arrière-pays de l'Orogène du Nouveau-Québec;
- 5) De 1,82 à 1,77 Ga, il y aurait eu collision oblique entre le craton du Supérieur et la Zone noyau de la province de Churchill lors de l'orogénèse du Nouveau-Québec. Cet événement a engendré une déformation de type transpression et la formation d'une ceinture de chevauchement et de plissement à vergence ouest, la Fosse du Labrador. Durant cette période, des sédiments molassiques se déposent sur la marge de la Province du Supérieur au cours du cycle 3;
- 6) Autour de 1,81 Ga, de petites intrusions de monzonite non déformées et probablement post-tectoniques se mettent en place dans la Fosse du Labrador;
- 7) Enfin, de 1,77 à 1,74 Ga, l'arrière-pays près de Kuujjuaq est caractérisé par la mise en place de pegmatites et par une activité hydrothermale suivies d'une période de refroidissement.

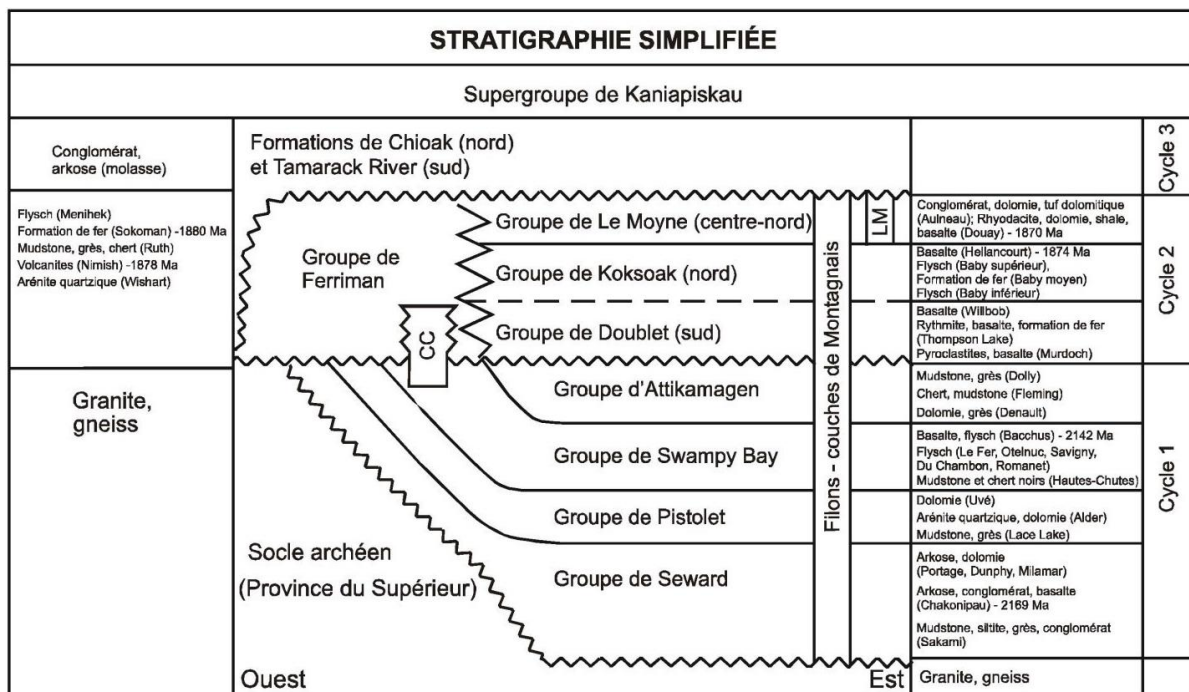
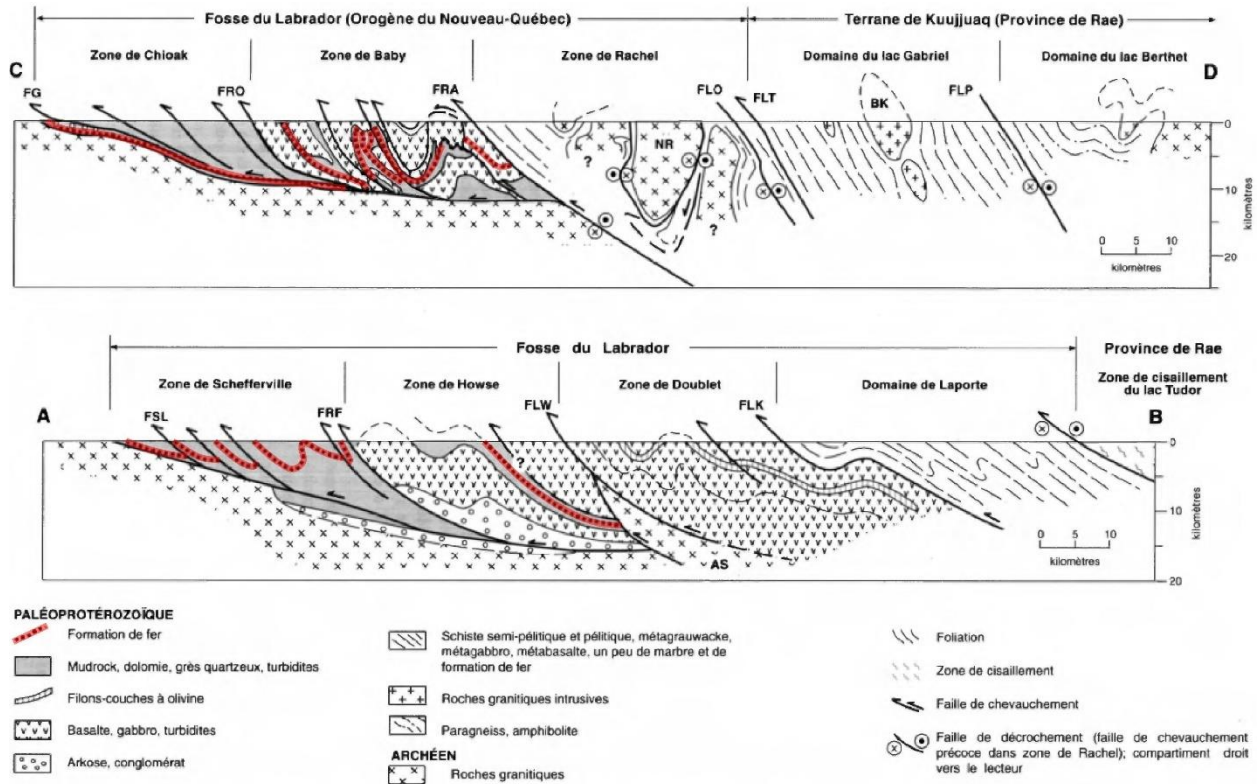


Figure 14. Stratigraphie simplifiée de la Fosse du Labrador (tiré de Clark et Wares, 2004; © Gouvernement du Québec).

2.4 Mistassini et Otish (B4)

Les bassins paléoprotérozoïques de Mistassini et d'Otish dans la partie sud de la Province du Churchill se situent à environ 70 km au nord de Chibougamau et couvrent une superficie d'environ 6 000 km². Ils se composent d'une séquence sédimentaire de près de 2,5 km d'épaisseur comprenant principalement des carbonates et des argilites, avec des unités de grès quartzeux et de formations de fer. Un milieu de dépôt de type plate-forme est interprété pour ces bassins sédimentaires, qui reposent en discordance d'érosion sur les gneiss migmatitiques archéens de la Sous-province d'Opatca (Province du Supérieur), elle-même subdivisée en trois terrains ou domaines lithologiques (**Figure 15**) : le terrain méridional correspond à une ceinture plutonique, le terrain central à une bande volcano-sédimentaire et le terrain septentrional à un domaine gneissique qui s'étend sous les bassins de Mistassini et d'Otish.

Le bassin de Mistassini offre un bon potentiel minéral (Héroux et al., 2004). Plus d'une douzaine d'indices cuprifères (**Figure 16**), incluant le gisement de la mine Icon et le gîte de la Rivière à la Perche, sont répertoriés à la base du membre inférieur de la Formation d'Albanel. La minéralisation cuprifère se prolonge vers le sud dans l'axe du réseau de failles majeures passant par la mine Icon. Plus d'une vingtaine d'indices de galène et de sphalérite sont cartographiés dans la partie médiane du membre inférieur de la Formation d'Albanel, et la Formation de Témiscamie contient jusqu'à 953 millions de tonnes à 30% de fer (Chown, 1984). L'Île Rouleau du lac Mistassini constitue un cratère d'impact météoritique mesurant 4 km de diamètre, qui se serait produit il y a 300 millions d'années (Evangelatos et al., 2009).

Le bassin d'Otish renferme une séquence silicoclastique, le Groupe d'Otish, composée surtout de grès et de conglomérats avec de minces intercalations de carbonates (Chown, 1984). Un milieu de dépôt de type fluvial est interprété pour les sédiments de ce groupe. Dans la région du bassin des monts Otish et de la partie nord du bassin du lac Mistassini, Chown (1984) indique la présence de filons-couches et de dykes et de diabase à olivine orientés vers le N et le NE (**Figure 17**). Ils sont d'affinité tholéiitique et recourent les sédiments du Groupe de Mistassini et du Groupe d'Otish.

Les dykes de diabase de l'essaim de Mistassini, datés à 2 470 Ma par la méthode U-Pb (Heaman, 1994), ne recourent pas les deux groupes. Les sédiments du Groupe de Mistassini ont donné un âge de $1\,787 \pm 55$ Ma par la méthode Rb-Sr sur la roche totale (Fryer, 1972). Cet âge représente l'âge minimum du métamorphisme de ces sédiments. Les roches des groupes de Mistassini et d'Otish se sont donc déposées entre 2 470 Ma et 1 787 Ma.

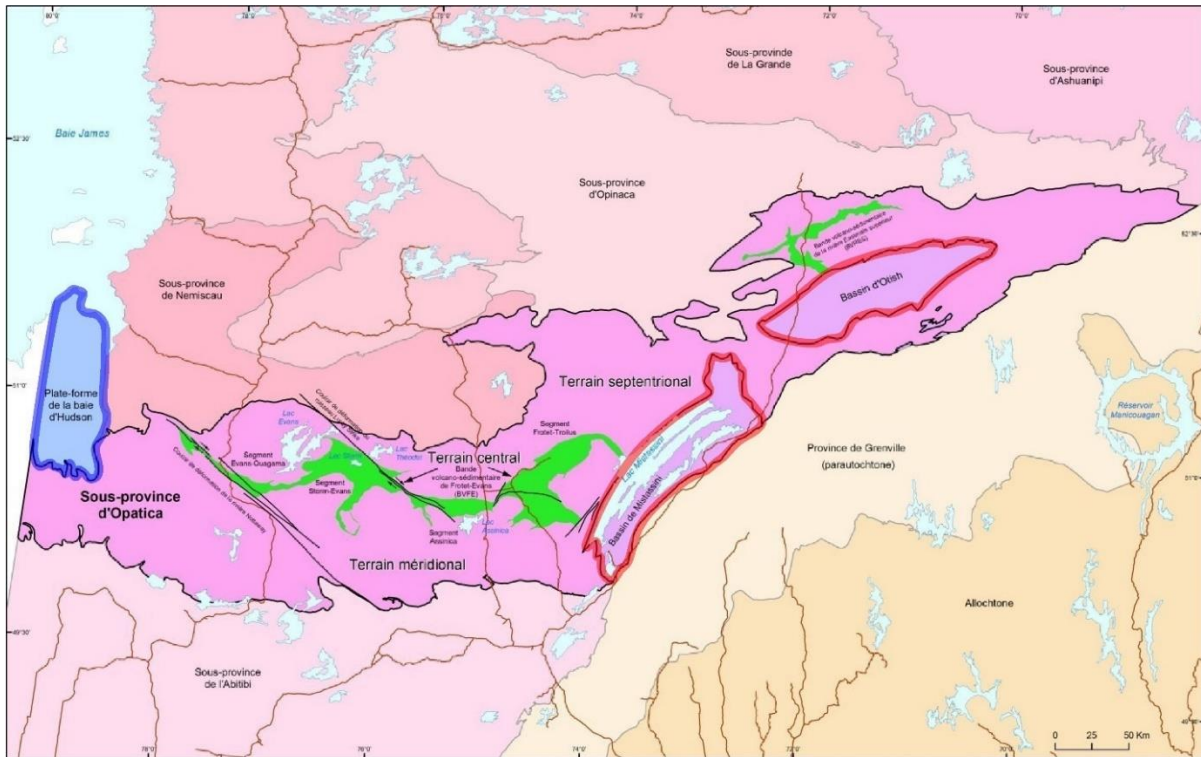


Figure 15. Subdivision de la Sous-province d'Opatica (adapté de Hocq et al., 1994; © Gouvernement du Québec) et localisation des bassins de Mistassini et d'Otish (en rouge), ainsi que de la plate-forme d'Hudson (en bleu).

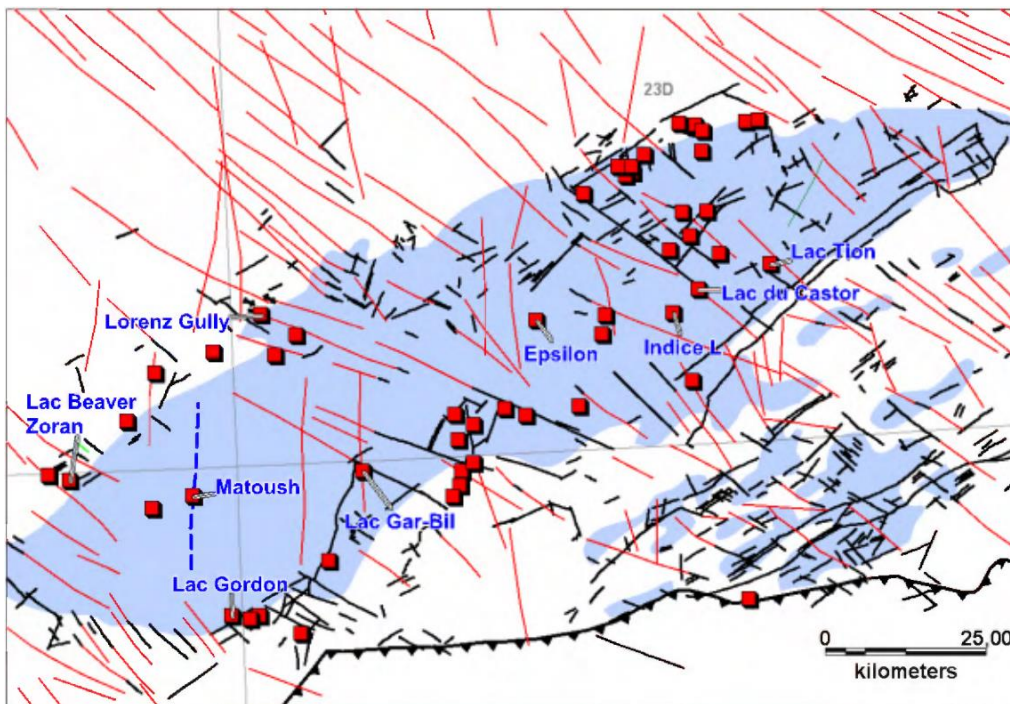


Figure 16. Indices et gîtes d'uranium (Faure, 2010; © Gouvernement du Québec) dans le bassin des Monts Otish (en bleu) avec les failles et linéaments de Genest (1989) (lignes noires), l'interprétation des linéaments magnétiques sécants (lignes rouges) et la zone de failles de Matoush (tirets bleus).

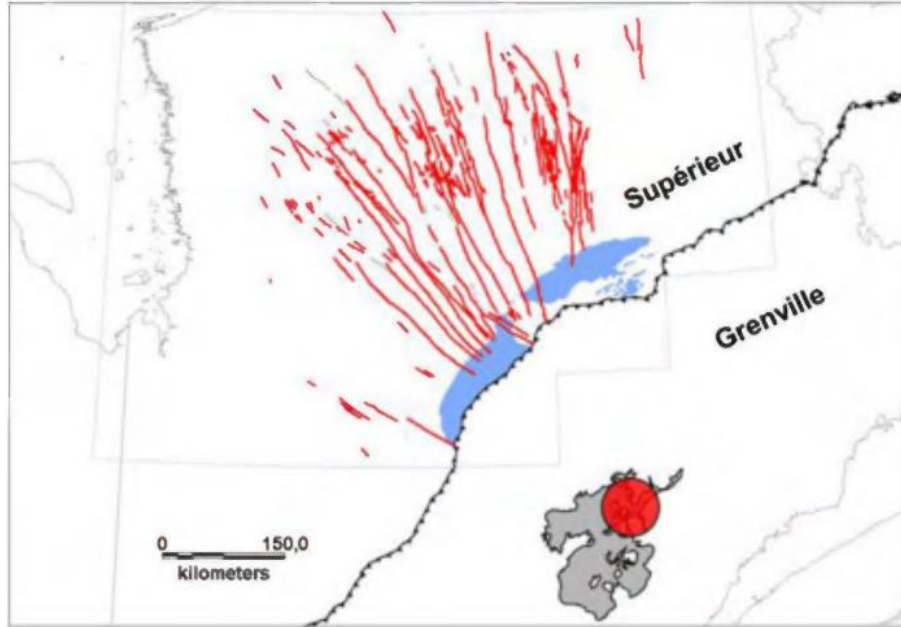


Figure 17. Essaim de dykes de Mistassini interprétés sur les levés magnétiques (en rouge) par Buchan et Ernst (2004) (© Ressources naturelles Canada) et les bassins sédimentaires protérozoïques (en bleu). Le cercle rouge représente le point de convergence de l'essaim de dykes sous le Parautochtone du Grenville et l'Anorthosite du Lac Saint-Jean (en gris).

2.5 Potentiel

Le Graben de Richmond Gulf et la partie québécoise du Bassin d'Hudson offrent peu de potentiel pour des roches sources d'hydrogène sur la base des données actuellement disponibles, mais leur nature sédimentaire en fait malgré tout des régions d'intérêt dans la mesure où les sédiments peuvent offrir une couverture à d'éventuelles accumulations en profondeur. La Fosse du Labrador et les bassins de Mistassini et Otish comportent une plus grande variété de roches sources potentielles.

Le Graben de Richmond Gulf repose en discordance ou en contact faillé sur un socle archéen principalement constitué de granitoïdes qui, s'ils sont suffisamment riches en éléments radiogéniques, peuvent produire de l'hydrogène par radiolyse. La séquence sédimentaire comprend par ailleurs des volcanites et des roches filoniennes mafiques susceptibles de produire de l'hydrogène par un processus d'altération hydrothermale. Les failles normales associées au graben peuvent contribuer à la circulation des fluides depuis la profondeur. Ces failles ne se propagent pas dans la partie sommitale de la séquence sédimentaire, qui peut ainsi servir de couverture pour une éventuelle accumulation de fluides. Les volcanites et le filon-couche présents dans ce graben peuvent également servir de couverture, selon un modèle comparable à celui du réservoir d'hydrogène découvert au Mali, à Bourakebougou.

Le Bassin d'Hudson dans sa partie québécoise repose en discordance sur des gneiss, des paragneiss et des granitoïdes ainsi que, localement, sur des volcaniques comprenant des gabbros. Les granitoïdes et les roches ultramafiques peuvent être considérés comme des roches sources pour

l'hydrogène si leur chimie est adéquate. Par ailleurs, la zone de cisaillement du Lac Nemiscau, qui traverse les roches du socle archéen et se prolonge sous le bassin sédimentaire, peut servir de conduit pour la circulation de fluides profonds. Toutefois, la faible épaisseur du bassin à cet endroit, de l'ordre d'une centaine de mètres, limite fortement la possibilité qu'une accumulation d'hydrogène soit présente. Des traces d'hydrocarbures liquides ont été documentées dans ce secteur, ce qui indique que les roches mères à hydrocarbures qui y sont présentes (par ailleurs en très faibles proportions), n'ont pas atteint un stade de maturité thermique suffisant pour générer de l'hydrogène gazeux libre.

La Fosse du Labrador comprend dans la région de Schefferville des formations de fer, un type de roches propice à la production d'hydrogène et pour lequel un analogue est documenté en Namibie. La Fosse comprend aussi des roches mafiques de type MORB ainsi que des roches ultramafiques (filons-couches, carbonatite de Le Moine), donc susceptibles de produire de l'hydrogène par un processus de serpentinisation. Des grès et des dolomies pouvant avoir développé des propriétés de réservoir sont également présents. Dans la Zone de Howse près de Schefferville (**Figure 13**), les roches mafiques à ultramafiques sont de surcroît surmontées par des mudstones et des turbidites qui peuvent fournir une couverture à d'éventuelles accumulations d'hydrogène.

Le Bassin de Mistassini comprend des formations de fer et des indices d'uranium, deux contextes géologiques propices à la production d'hydrogène naturel. Le bassin atteint 2,5 km d'épaisseur et comprend des grès et des carbonates pouvant avoir développé des propriétés de réservoir, ainsi que des argilites qui peuvent fournir une couverture imperméable à des accumulations d'hydrogène. Le cratère d'impact météoritique de l'Île Rouleau a pu contribuer au développement de réseaux de fractures propices à la migration des fluides. Il est à noter que McMahan et al. (2016) observent la présence d'hydrogène dans des impactites d'Australie, avec des concentrations plus élevées dans les pseudotachylites et comparativement moindres dans les cataclasites. Fait notable, Héroux et al. (2004) documentent la présence d'hydrogène dans des inclusions fluides dans la région du Lac Mistassini, à des concentrations variant entre 6 et 92%. L'hydrogène dans ces inclusions fluides est associé à de l'azote et plus rarement à du méthane. Le Bassin des monts Otish comprend des roches filoniennes mafiques à olivine. La kimberlite des monts Otish, située sur le flanc nord de la partie occidentale du bassin, peut être un indicateur de la présence de fractures crustales permettant la circulation de fluides profonds. Cette région abrite également des indices d'uranium.

3. LES MINES D'OR

3.1 Les mines de zones de faille de l'Abitibi (M4)

Depuis la découverte des premières occurrences d'or dans la région de Chibougamau en 1903 et dans les régions de Kirkland Lake, Timmins et Rouyn-Noranda en 1906, la ceinture de roches vertes de l'Abitibi, qui chevauche la frontière entre l'Ontario et le Québec dans l'est du Canada (Figure 18), représente l'une des ceintures de roches vertes du Néoarchéen les plus vastes et les mieux préservées au monde, et donc, les plus explorées et les mieux étudiées au monde.



Figure 18. Localisation de la ceinture de roches vertes de l'Abitibi dans la Province du Supérieur (tiré de Monecke et al., 2017; reproduit avec permission).

La ceinture est constituée de successions de roches volcaniques et sédimentaires plissées, orientées vers l'est, et de dômes intermédiaires de roches intrusives (Figure 19 et Figure 20). Le volcanisme s'est produit entre 2,8 et 2,7 Ga. Six assemblages volcaniques ont été définis, témoignant d'un volcanisme sous-marin à des périodes spécifiques. Les successions de komatiites au sein de certains de ces assemblages volcaniques abritent des gisements de sulfures magmatiques. Cependant, les gisements de sulfures massifs volcanogènes (VMS; *volcanogenic massive sulfide*), qui contiennent un total d'environ 775 millions de tonnes (t) de sulfures massifs polymétalliques, sont plus importants d'un point de vue économique. Environ la moitié de la ressource se trouve

dans des roches volcaniques de l'assemblage de Blake River, datant de 2,704 à 2,695 Ga. Les gisements de VMS de cet assemblage représentent également la majeure partie de l'or synvolcanique de la ceinture de roches vertes de l'Abitibi, totalisant plus de 1 100 t (35 M d'onces).

Le volcanisme sous-marin a été suivi par le dépôt de grandes quantités de matériaux sédimentaires provenant d'un arrière-pays marin ou subaérien peu profond, créé à la suite d'un épaissement crustal au cours d'une phase précoce d'édification de montagnes entre 2,69 et 2,685 Ga (Monecke et al., 2017). Les roches volcaniques sous-marines et les roches sédimentaires sus-jacentes de type flysch de l'assemblage de Porcupine ont été affectées par des plissements et des poussées à grande échelle au cours d'au moins un événement de déformation antérieur à 2,679 Ga. À cette époque, une surface de discordance terrestre s'est développée entre les roches plus anciennes et déjà déformées de la ceinture de roches vertes de l'Abitibi et les roches sédimentaires de type molassique de l'assemblage de Timiskaming, qui se sont déposées entre 2,679 et 2,669 Ga. Le dépôt des roches sédimentaires du Timiskaming s'est produit dans des bassins d'extension et s'est accompagné localement d'un volcanisme essentiellement alcalin et d'une activité intrusive connexe.

La déformation due au raccourcissement de la croûte a entraîné l'enfouissement structural des roches sédimentaires molassiques de l'assemblage du Timiskaming après 2,669 Ga. Des panneaux de dépôts du Timiskaming ont été préservés dans l'éponte inférieure de ces chevauchements, qui sont aujourd'hui représentés par des zones de failles majeures traversant les roches supracrustales de la ceinture de roches vertes de l'Abitibi. L'histoire structurale de ces zones de faille est compliquée par une déformation tardive. Les zones de faille Porcupine-Destor et Larder Lake-Cadillac de la ceinture de roches vertes de l'Abitibi méridionale (**Figure 20**), ainsi que les dédoublements de deuxième et troisième ordre de ces zones de faille, sont l'hôte d'un certain nombre de gisements d'or orogéniques importants (**Figure 19**). La ressources en or de ces gisements dépasse 6 200 t (200 M d'onces), ce qui fait de la ceinture de roches vertes de l'Abitibi l'un des terranes métamorphiques les plus importants du monde sur le plan économique.

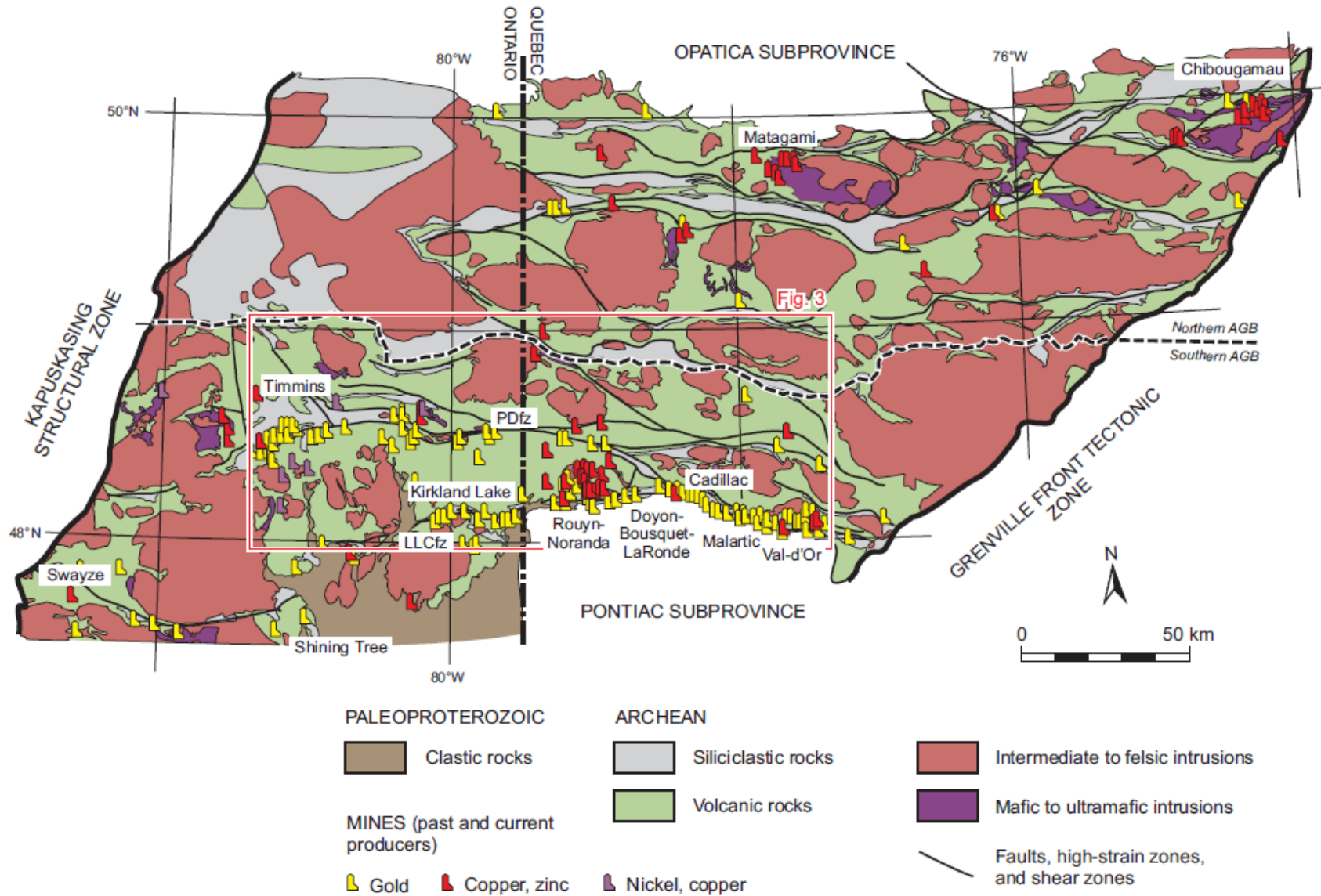


Figure 19. Carte géologique de la ceinture de roches vertes de l'Abitibi montrant la distribution des roches supracrustales et des roches intrusives (tiré de Monecke et al., 2017; reproduit avec permission). LLCfz = zone de faille de Larder Lake-Cadillac, PDfz = zone de faille de Porcupine-Destor.

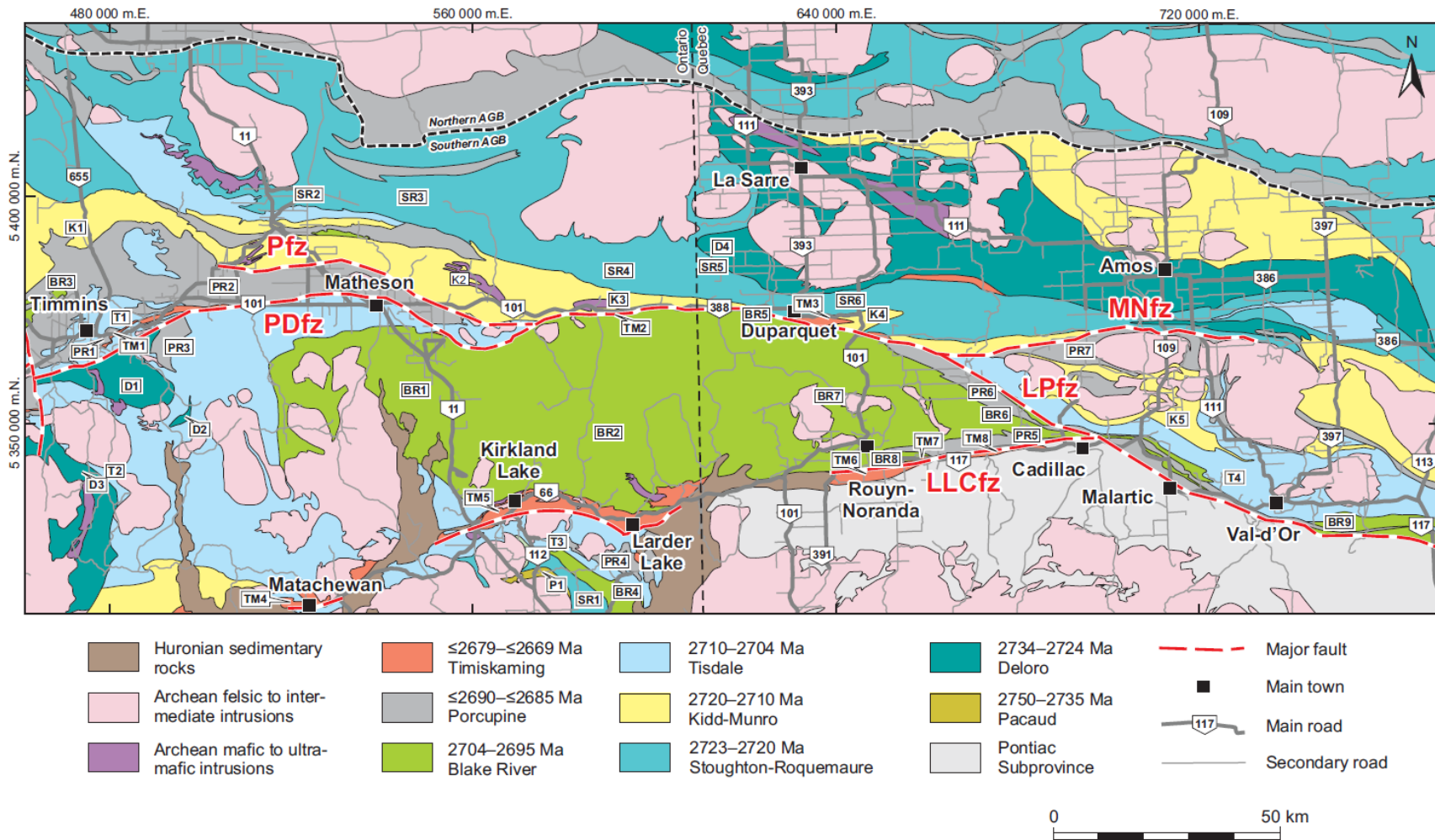


Figure 20. Carte géologique de la ceinture de roches vertes du sud de l'Abitibi montrant la distribution des roches volcaniques et sédimentaires (tiré de Monecke et al., 2017; reproduit avec permission). Localisé par l'encadré de la **Figure 19**.

3.1.1 Gaz dans les mines d'Abitibi

Des gaz combustibles, en particulier le méthane et l'hydrogène, sont documentés dans de nombreuses mines souterraines implantées dans les cratons archéens et protérozoïques de par le monde, notamment en Afrique du Sud, dans les pays de l'ex URSS, en Scandinavie et au Canada. Dans l'immense majorité des cas, ces gaz sont détectés dans des fractures remplies d'eau de formation salée et les volumes impliqués sont généralement faibles, mais Zgonnik (2020) rapporte des cas où le dégazage a duré plusieurs jours ainsi que des cas où le dégazage a contaminé la ventilation des galeries de mine (ex : 734 m³/jour d'un flux de gaz contenant 13,7% d'hydrogène en Ukraine).

Au Canada, des travaux débutés à la fin des années 1980 ont permis d'étudier en détail la nature et l'origine des gaz combustibles dans les eaux de formation de plusieurs mines souterraines, depuis les Territoires-du-Nord-Ouest jusqu'aux mines d'or de l'Abitibi au Québec. Les principales caractéristiques de ces gaz et les études qui leur sont consacrées sont présentées dans Séjourné et al. (2023). La concentration en hydrogène n'est pas systématiquement analysée pour tous les échantillons du Bouclier canadien. Lorsqu'elle est mesurée, cette teneur est très variable, s'étalant de 0,06 à 57,8% H₂, avec seulement deux points de données disponibles pour le Québec (**Tableau 1**). Au Québec, des analyses isotopiques du deutérium et du carbone sont disponibles pour le gaz naturel mais pas pour le deutérium du dihydrogène (**Tableau 2**).

Tableau 1. Composition des produits de dégazage de quatre mines d'Abitibi. « - » : Non analysé; « n.d. » : Non détecté.

Mine (Région)	No Échantillon	H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ +	He	Ar	Source
La Ronde (Cadillac)	LR6480-L2900-LR	1,83	0,63	15,2	-	66,1	-	-	-	5,09	1,33	Li et al. (2021)
	LR6480-L2900-LR	3,63	0,15	8,92	-	72,1	-	-	-	7,2	0,79	Li et al. (2021)
Sigma (Val-d'Or)	Sigma 10680, 1985	0,51	0,07	55,1	0,27	37,8	0,66	-	-	-	5,61	Fritz et al. (1987)
	Sigma 10680	0,51	-	55	0,27	37,9	0,66	-	-	-	5,62	Sherwood Lollar et al. (1993)
Lac Matagami (Matagami)	2004(90, R36, '84)	-	0,24	11,1	0,28	85,1	2,08	0,24	< 0,03	1,6	0,23	Fritz et al. (1987)
	2004(90, R36, '85)	-	0,48	11,3	< 0,02	82,1	1,81	0,14	< 0,07	1,88	0,01	Fritz et al. (1987)
	2000(90, R36, 1986)	-	n.d.	8,26	0,02	83,2	2,27	0,13	0,03	1,22	0,13	Sherwood et al. (1988)
	2000-R36	-	-	8,53	0,02	87,6	2,34	0,13	0,03	1,26	0,13	Sherwood Lollar et al. (1993)
	2002(90, R46)	-	0,72	21,4	0,22	75,9	1,55	0,12	< 0,03	1,1	1,51	Fritz et al. (1987)
	2002-R46	-	-	18,9	0,22	76,6	1,56	0,12	< 0,03	1,11	1,49	Sherwood Lollar et al. (1993)
Norita (Matagami)	N18-4W-85c-1985	-	< 0,07	6,73	0,26	89,5	2,71	0,18	< 0,03	1,03	0,52	Fritz et al. (1987)
	N18-4W	-	-	6,67	0,26	88,7	2,69	0,18	< 0,03	1,02	0,52	Sherwood Lollar et al. (1993)
	UN-243 (28)-1985	-	< 0,07	16,7	0,1	78,8	1,91	0,09	< 0,03	1,11	1,5	Fritz et al. (1987)
	UN-243(28)	-	-	16,7	0,1	78,6	1,91	0,09	< 0,03	1,11	1,5	Sherwood Lollar et al. (1993)
	N256 - 1985	-	1,59	28,6	0,46	62,3	2,1	0,26	< 0,03	-	3,17	Fritz et al. (1987)
	N256	-	-	24,9	0,5	68,5	2,31	0,29	< 0,03	< 0,01	3,41	Sherwood Lollar et al. (1993)
	UN398-1986	-	0,17	4,49	0,04	82,5	4,08	0,41	0,18	0,83	0,07	Sherwood et al. (1988)
	UN-398	-	-	4,13	0,04	89,9	4,36	0,44	0,19	0,88	0,06	Sherwood Lollar et al. (1993)

Tableau 2. Composition isotopique du méthane, de l'éthane et du carbone inorganique dissout (CID) dans les eaux de quatre mines d'Abitibi.

Mine (Région)	No Échantillon	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$	$\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{C}_2\text{H}_6}$	$\delta^2\text{H}_{\text{C}_2\text{H}_6}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{C}_3\text{H}_8}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$	$\delta^2\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{N}_2}$	Source
La Ronde (Cadillac)	LR6480-L2900-LR	-	-	-	-	-	-	-	7,4	Li et al. (2021)
	LR6480-L2900-LR	-	-	-	-	-	-	-	6,5	Li et al. (2021)
Sigma (Val-d'Or)	Sigma 10680, 1985	-46,3	-301	-37,5	-	-	-15,5	-97	-	Fritz et al. (1987)
	Sigma 10680	-	-	-	-	-	-	-	9,1	Sherwood Lollar et al. (1993)
	Sigma 12042, 1984	-46,3	-332	-42,1	-	-	-16,3	-153	-	Fritz et al. (1987)
Lac Matagami (Matagami)	2004(90, R28, '85)	-	-	-	-	-	-16,3	-111	-	Fritz et al. (1987)
	R28	-	-	-	-	-	-	-	8,6	Sherwood Lollar et al. (1993)
	2004(90, R36, '84)	-50,9	-437	-	-	-	-18	-63	-	Fritz et al. (1987)
	2004(90, R36, '85)	-53,7	-	-43,5	-	-	-20,2	-55	-	Fritz et al. (1987)
	2000-R36	-52	-356	-47,2	-	-	-	-	-	Sherwood Lollar et al. (1993)
	2002(90, R46)	-54,5	-396	-	-	-	-	-	-	Fritz et al. (1987)
Norita (Matagami)	N18-4W-85c-1985	-47,7	-423	-	-	-	-	-69	-	Fritz et al. (1987)
	UN-243 (28)-1985	-55,5	-398	-	-	-	-	-	-	Fritz et al. (1987)
	N256 - 1985	-48,6	-470	-	-	-	-	-	-	Fritz et al. (1987)
	UN-257(28)-1985	-	-	-	-	-	-	-96	-	Fritz et al. (1987)
	UN398-1986	-50,2	-404	-44,9	-439	-35,8	-	-90	-	Sherwood et al. (1988)
	UN-398	-	-	-	-	-	-	-	11,8	Sherwood Lollar et al. (1993)

De ces travaux il ressort que les hydrocarbures des mines ontariennes ont une origine abiotique claire. Dans le cas des autres localités (Territoires du Nord-Ouest, Manitoba et Québec), l'interprétation des données montre que les hydrocarbures ont une origine mixte, résultant du mélange entre une source abiotique comparable à celle reconnue en Ontario avec une source biogénique. La composante biogénique représente de 30 à 50% du volume total des gaz (voir Figures 15 et 16 de Séjourné et al., 2023). Dans le cas des gaz pour lesquels une composante biogénique du méthane est mise en évidence, la concentration en hydrogène est toujours inférieure à 1% (0,51%, pour la mine Sigma à Val-d'Or) sauf dans le cas de la mine La Ronde au Québec où une concentration de 3,63% est mesurée (Li et al., 2021) et dans le cas de la mine Copper Cliff à Sudbury (Sherwood Lollar et al., 2006), où la concentration en hydrogène peut s'élever jusqu'à 57,8% en dépit d'une composante bactérienne responsable de 23% du méthane mesuré.

Les faibles concentrations en hydrogène dans les mines sont souvent corrélées avec des évidences d'activité bactérienne dans les cratons archéens et protérozoïques. Un cas extrême est mis en évidence dans le craton de Kaapvall en Afrique du Sud, où Karolytè et al. (2022) ont comparé des sites où l'hydrogène est présent avec d'autres sites dépourvus d'hydrogène en dépit de l'abondance de l'hélium (jusqu'à 15%). Ces auteurs modélisent le comportement de l'activité bactérienne aux sites étudiés et en concluent que l'absence d'hydrogène dans les gaz analysés résulte de sa consommation par des bactéries. Warr et al. (2019) observent également des concentrations anormalement faibles en hydrogène dans deux mines ontariennes (Nickel Rim et Fraser), que les auteurs expliquent par des processus bactériens ou abiotiques qui peuvent consommer de 55 à 98% de l'hydrogène initialement présent.

Sherwood Lollar et al. (2007) proposent un modèle de mélange entre des eaux salines riches en hydrogène et pauvres en micro-organismes, avec des eaux météoriques peu salines et au contenu organique plus diversifié. Dans ce modèle, le mélange se produit de manière épisodique par la connexion de fractures naturelles autrement isolées du point de vue hydrogéologique, à la faveur d'un événement tectonique ou de l'activité minière qui réactive ces fractures : lorsque des eaux météoriques riches en micro-organismes sont mises en contact avec des eaux salines riches en hydrogène, ce dernier est rapidement consommé par les bactéries méthanogènes (**Figure 21**). Ce modèle est par ailleurs supporté par les observations de Telling et al. (2017) dans le cas de la mine Thompson au Manitoba.

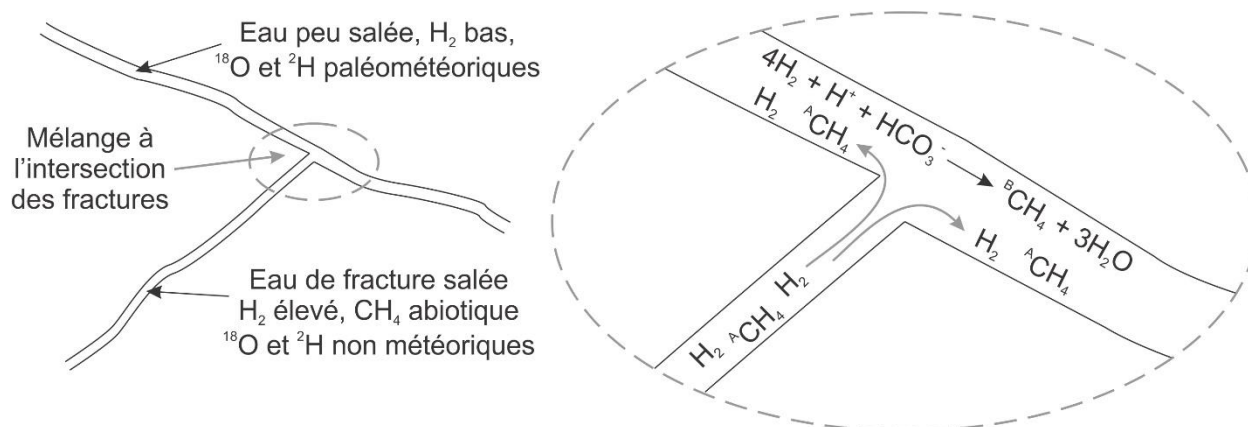


Figure 21. Modèle conceptuel du mélange de fluides contrôlé par la connexion de fractures hydrauliquement isolées, menant à la consommation de l'hydrogène abiotique ($^A\text{CH}_4$) et à la production de méthane biogénique ($^B\text{CH}_4$) (adapté de Sherwood Lollar et al., 2007).

3.2 Éléonore (M1)

La mine d'or Éléonore (4,3 M onces d'or) se situe dans la municipalité Eeyou Istchee Baie-James (**Figure 22**). Les minéralisations aurifères de la mine sont principalement encaissées dans la Formation de Low (< 2,71-2,68 Ga), les roches sédimentaires parmi les plus jeunes de la région. Majoritairement composées de wackes mais aussi de conglomérats, d'arénites et de formations de fer, elles appartiennent aux séquences volcano-sédimentaires de la Sous-province de La Grande (domaine de la rivière Eastmain). Situées dans une zone de fort gradient métamorphique, au sud de terrains de haut-grade métamorphique (Sous-province de l'Opinaca), ces roches sédimentaires sont métamorphosées au faciès supérieur des amphibolites et recoupées par plusieurs types d'intrusions de nature et de composition variées. Les roches sédimentaires sont affectées par une déformation polyphasée (Fontaine, 2019).

Les zones minéralisées de la mine Éléonore consistent majoritairement en des veines de quartz et des brèches hydrothermales et des pegmatites granitiques. Le minerai s'est formé, déformé et métamorphosé durant un épisode tectonométamorphique de longue durée (entre 2,64 et 2,60 Ga). Ce dernier est associé à un front de migmatisation et la mise en place de pegmatites granitiques localement aurifères (2,62-2,60 Ga).

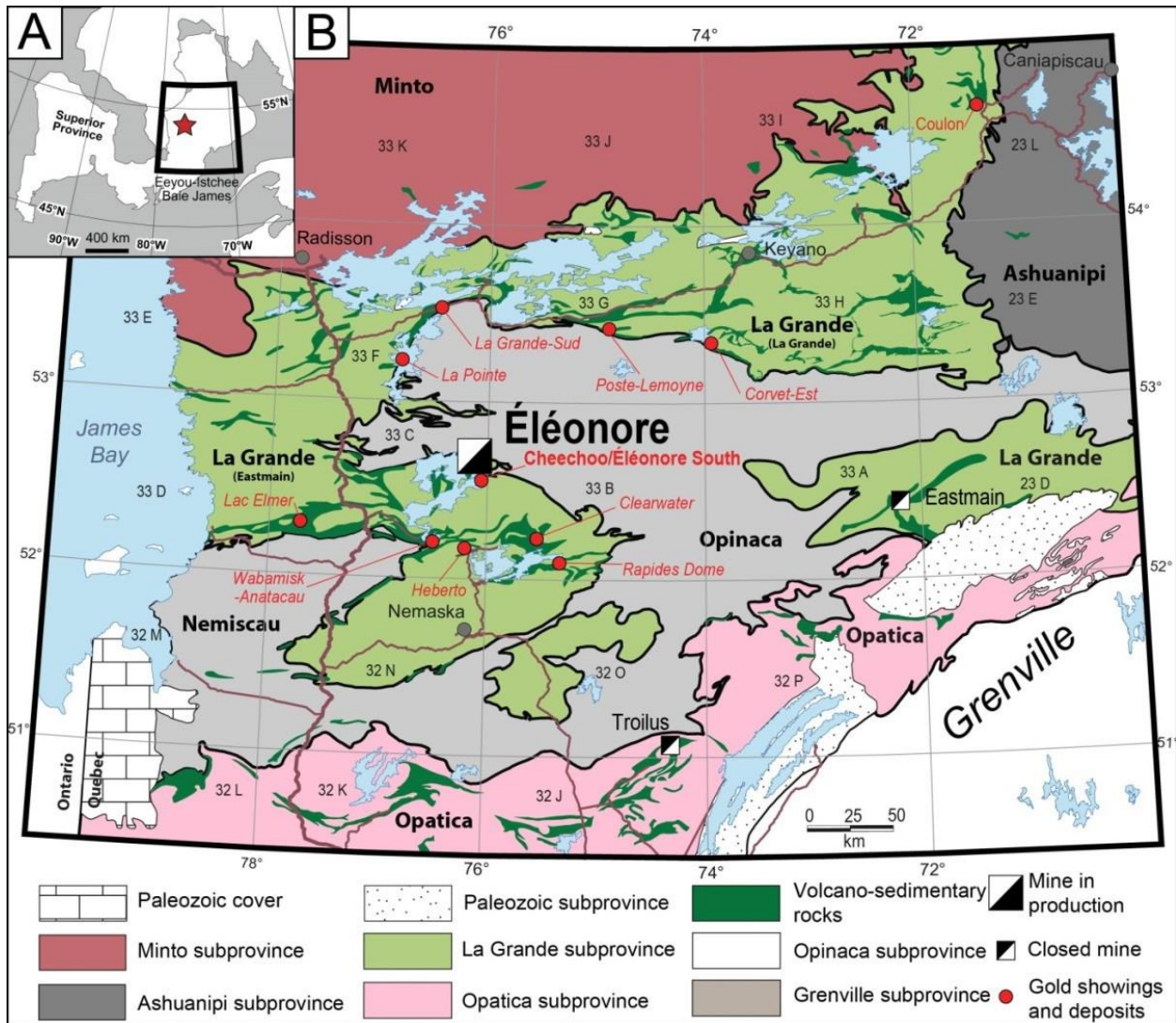


Figure 22. Localisation géologique de la mine Éléonore (tiré de Fontaine, 2019; reproduit avec permission).

3.3 Casa Berardi (M2)

La mine Casa Berardi se situe à 180 km au nord de Rouyn-Noranda, dans la partie nord de la Sous-province de l'Abitibi, et ses gisements sont contenus dans le couloir de déformation de Casa-Berardi (CCB; **Figure 23**). Il s'agit d'une structure de direction est-ouest d'une largeur de 15 km qui est reconnue sur une distance de plus de 200 km. Une déformation ductile très intense affecte des ensembles lithostratigraphiques de nature sédimentaire et volcanique.

Le CCB juxtapose des ensembles lithostratigraphiques de nature sédimentaire et volcanique, montrant des polarités localement opposées. Au sein du CCB, on distingue la faille Casa-Berardi, une structure au comportement fragile dans laquelle le mouvement reconnu est inverse. Cette faille représente un élément distinct associé probablement à la progression de la déformation dans le CCB et apparaît tardivement dans l'évolution géodynamique de ce couloir. Deux autres couloirs de déformation ont été identifiés dans cette région; il s'agit (i) du couloir de Boivin-Paradis, de direction est-ouest, d'extension latérale limitée et située à la bordure d'une intrusion granitoïde, et (ii) du couloir de Laberge, qui représente une structure variant en orientation de nord-ouest à est-ouest et sécante au grain tectonique régional.

Dans le gisement de Casa-Berardi, la majeure partie de la minéralisation aurifère économique se présente dans la deuxième des quatre générations de veines de quartz et de fractures reconnues. Les veines minéralisées sont contenues dans des zones de forte déformation qui se développent préférentiellement près des contacts entre des unités volcaniques et sédimentaires. La géométrie présentée par les différentes générations de veines de quartz, leur chronologie relative et les altérations hydrothermales associées peuvent être expliquées par la progression de la déformation dans le CCB et permettent d'estimer un âge relatif syn- à tardi-tectonique pour la minéralisation aurifère. Certaines caractéristiques du CCB contrastent avec les deux autres couloirs de déformation voisins, telles sa grande extension latérale, la juxtaposition de domaines lithologiques distincts, la complexité des fabriques internes et la durée relative de sa période active. Ces points permettent d'expliquer qu'au contraire des deux autres couloirs de déformation, le CCB a été le site d'un système minéralisé majeur (Pilote et al., 1990).

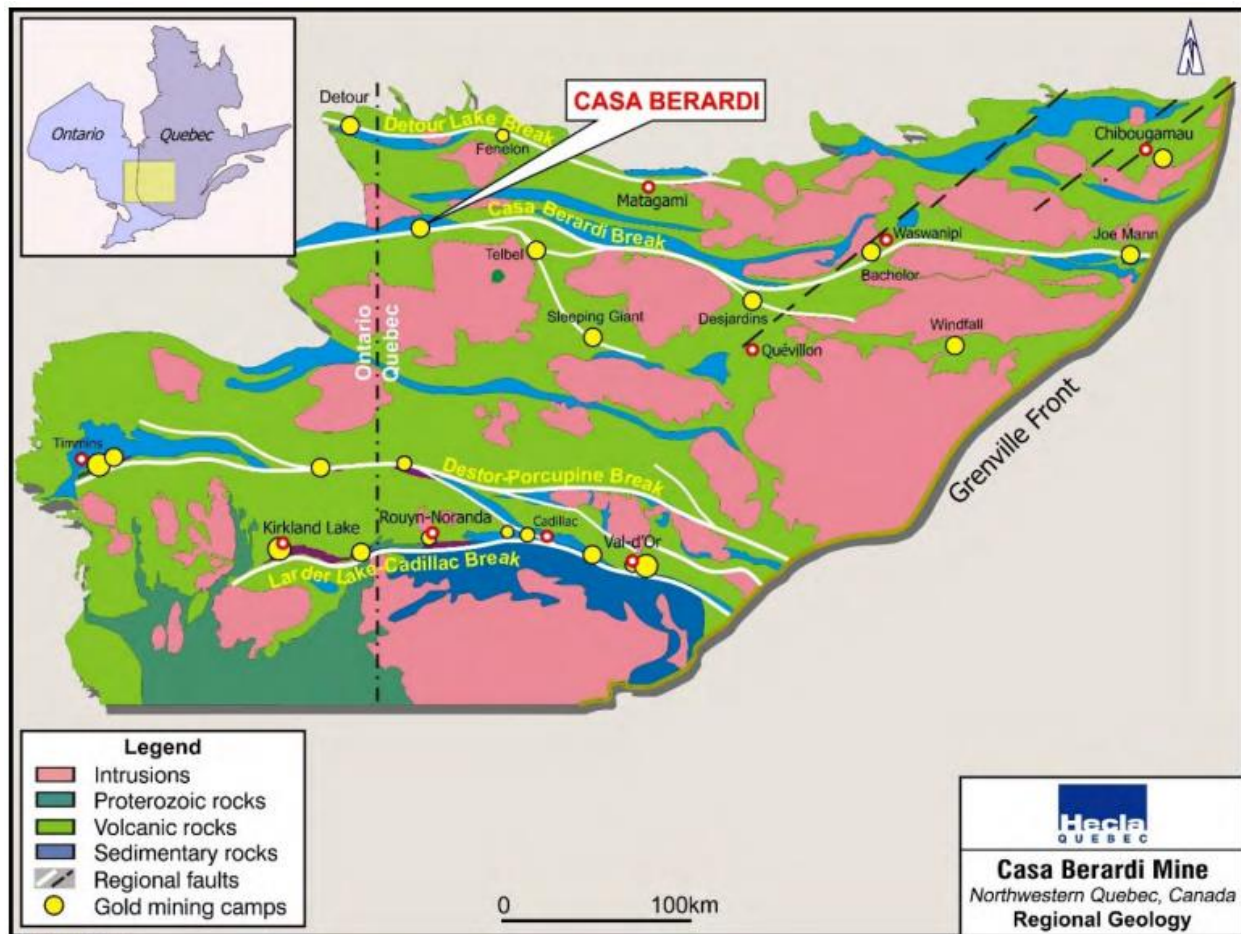


Figure 23. Géologie régionale de la mine Casa Berardi (tiré de Pilote, 1989; © Gouvernement du Québec).

3.4 Chibougamau (M3)

Le secteur de Chibougamau est situé dans la portion nord-est de la Sous-province archéenne de l'Abitibi de la Province du Supérieur (**Figure 24**). Il est caractérisé par des ensembles volcano-sédimentaires et plutoniques du faciès des schistes verts qui se poursuivent vers l'ouest dans la région de Chapais. Au nord de Chapais et de Chibougamau, la Sous-province archéenne d'Opatika est dominée par des dômes kilométriques de tonalite, de granodiorite et de monzodiorite encaissés dans des unités discontinues de gneiss tonalitiques, de gneiss mafiques, d'amphibolites et de roches ultramafiques (Benn et Moyen, 2008; Daoudene et al., 2014). À l'est et au sud-est, la Zone Parautochtone de la Province de Grenville comprend des roches archéennes qui ont été métamorphosées au faciès moyen des amphibolites jusqu'au faciès des granulites, au Protérozoïque, à la suite d'une série d'événements tectonométamorphiques (Rivers et Corrigan, 2000; Cadéron et al., 2005).

La région de Chibougamau (**Figure 25**) comprend des roches d'âge néoarchéen (2,730 à 2,691 Ga, **Tableau 1**), quelques lambeaux d'érosion de roches sédimentaires et des dykes de gabbro-diabase

protérozoïques). La base de l'empilement stratigraphique est formée par le Groupe de Roy qui comprend deux cycles volcaniques. Le premier cycle regroupe les formations d'Obatogamau et de Waconichi (2,730-2,726 Ga), alors que le deuxième cycle est constitué des formations de Bruneau, de Blondeau et de Bordeleau (2,724-2,717 Ma). À la base des cycles volcaniques, les roches volcaniques mafiques présentent une affinité tholéiitique et passent vers le sommet à des roches volcanoclastiques et des métasédiments d'affinité transitionnelle à calco-alcaline.

Entre 1955 à 2008, le camp minier de Chibougamau a produit environ 55 millions de tonnes de minerai correspondant à 994 802 tonnes de cuivre, 120 tonnes d'or, 102 tonnes d'argent et 72 066 tonnes de zinc (Leclerc et al., 2017). Les minéralisations peuvent être classées en six catégories :

- a) les dépôts de Fe-Ti-V d'origine magmatique;
- b) les dépôts de sulfures massifs volcanogènes (SMV);
- c) les dépôts porphyriques à Cu-Au \pm Mo;
- d) les filons polymétalliques (Au-Ag-Cu-Zn) dans les failles et les zones de cisaillement précoces (pré-D2);
- e) les filons à Cu-Au dans les zones de cisaillement NO-SE et E-O;
- f) les filons à Au et Au-Cu dans les zones de cisaillement E-O (or de type orogénique).

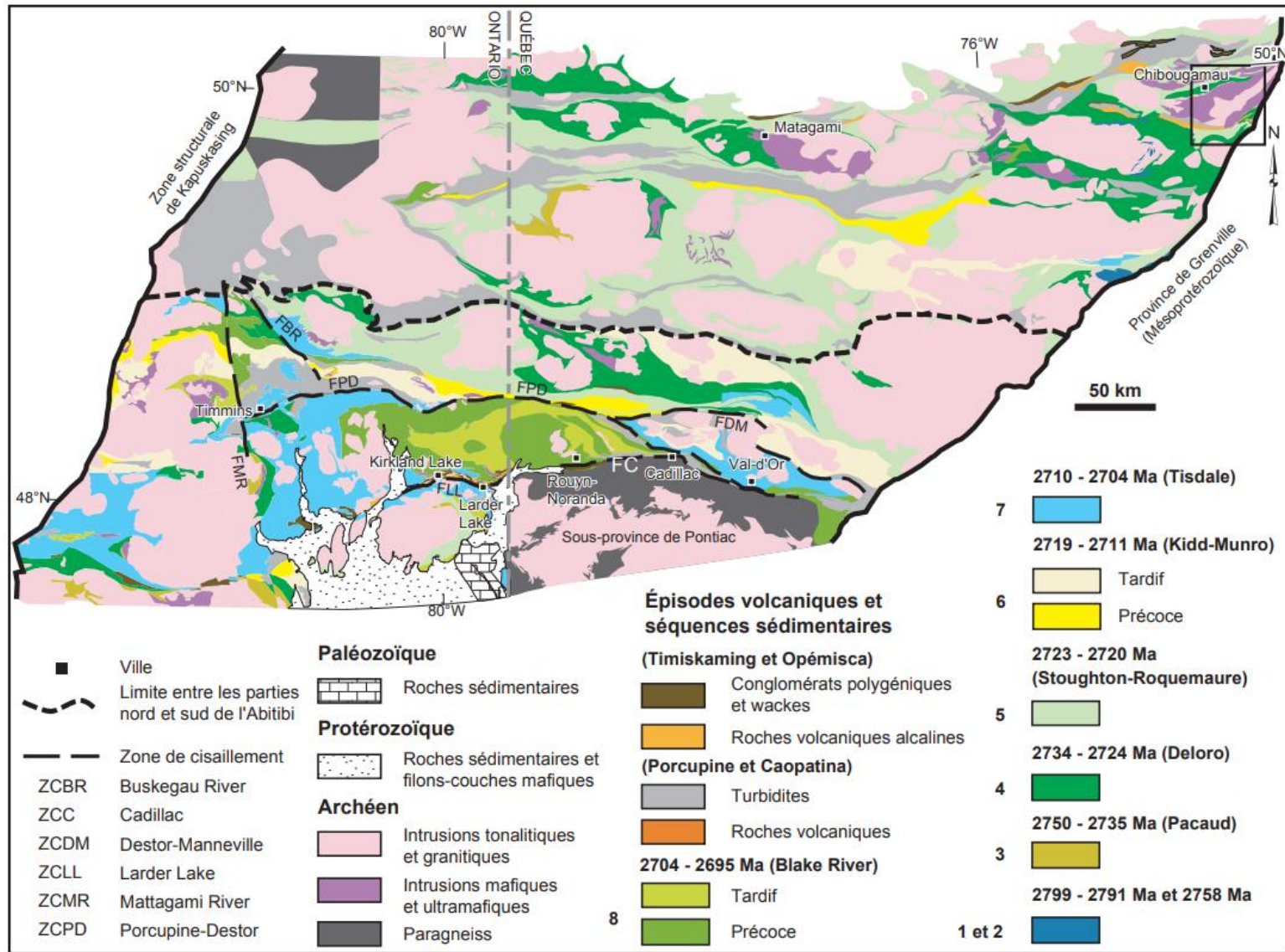


Figure 24. Carte des épisodes volcaniques et des séquences sédimentaires de la Sous-province de l'Abitibi (tiré de Leclerc et al., 2017; © Gouvernement du Québec).

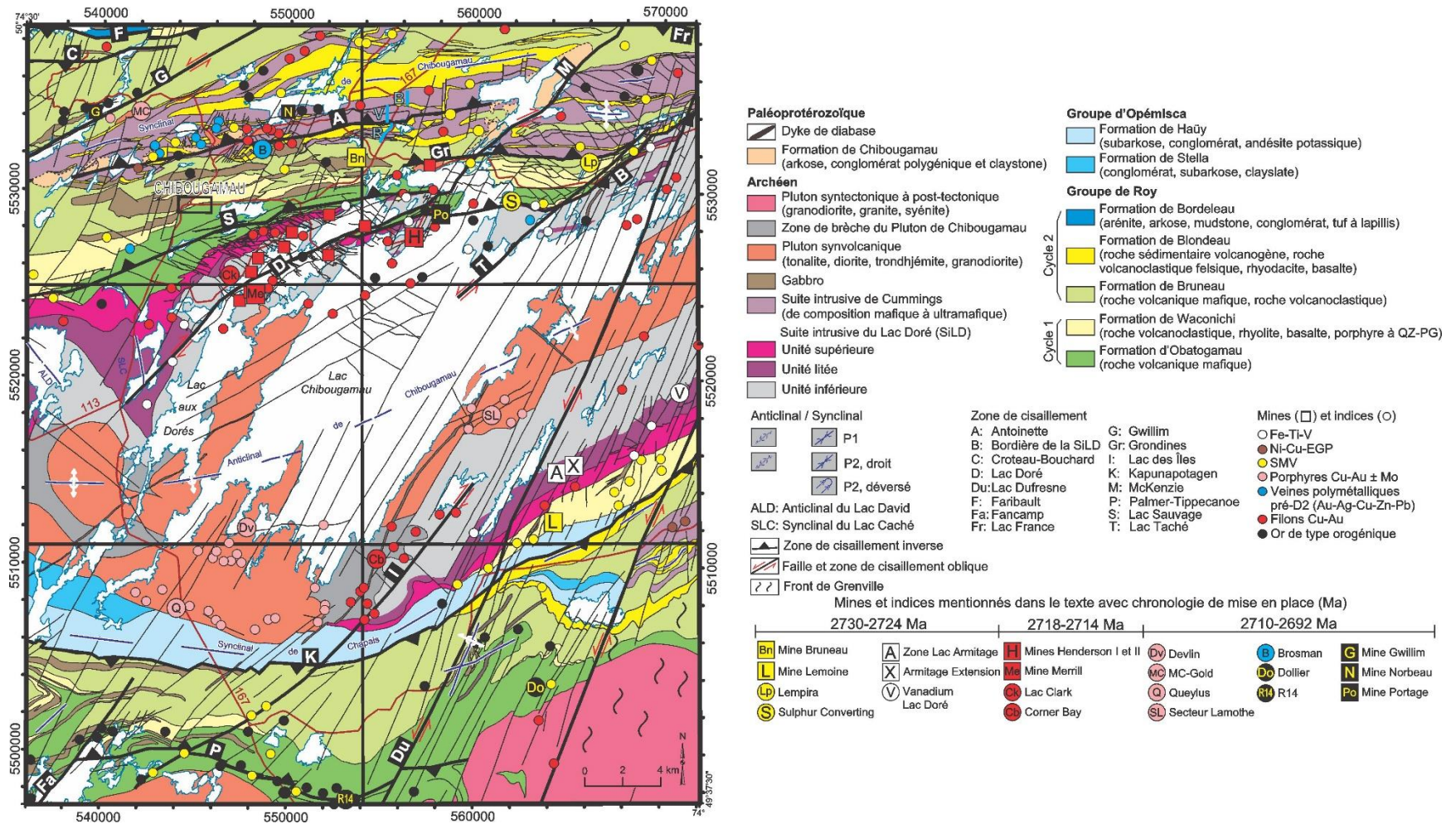


Figure 25. Géologie simplifiée du secteur de Chibougamau, incluant la localisation des mines et des indices (tiré de Leclerc et al., 2017; © Gouvernement du Québec).

3.5 Anneaux forestiers d'Ontario et du Québec

Des anomalies de surface correspondant à des émanations d'hydrogène sont documentées en de nombreuses localités dans le monde (voir Séjourné et al., 2023). Ces structures ont typiquement une forme circulaire, plus rarement ovoïde, et sont caractérisées par une dépression centrale peu marquée et une différence dans la végétation ou dans la santé de la végétation, qui est dégradée par rapport au milieu environnant. Ces dépressions de surface représentent un indicateur direct de la présence d'hydrogène en sous-surface.

Un autre type d'anomalie de surface, très différent, a été documenté dans les forêts d'épinette noire principalement en Ontario (**Figure 26**) et mais aussi dans l'ouest du Québec (**Figure 27**). Ces anomalies se présentent sous la forme d'un contraste de végétation marqué par un anneau parfaitement circulaire dans lequel la population d'épinettes est moins dense. On les désigne généralement sous le terme d'« anneaux forestiers ». Veillette et Giroux (1999) et Giroux et al. (2001) ont montré que ces anneaux coïncident avec des dépressions de la surface du roc (et parfois de la surface du sol) remplies de tourbe et sont associés préférentiellement aux régions dont le substratum est recouvert de dépôts quaternaires glacio-marins riches en carbonates. En Ontario, Hamilton et al. (2004) ont par ailleurs confirmé que plus de 80% des anneaux forestiers étaient développés sur un substratum marin ou glacio-marin. Suivant cette observation, l'extension maximale des anneaux forestiers au Québec devrait être circonscrite aux régions de l'Abitibi et du Témiscamingue à l'ouest de la moraine de Haricana, où l'on retrouve les dépôts quaternaires les plus riches en carbonates (till de Cochrane; Vincent, 1989), et possiblement dans le secteur sud du Lac Mistassini (DiLabio, 1981). Plus de 2 000 anneaux forestiers ont été cartographiés en Ontario et au Québec (Brauneder et al., 2016).



Figure 26. Exemples d'anneaux forestiers en Ontario (49°29'42"N, 80°06'10"O). Localisation rapportée par Hamilton et Hattori (2008). Source : Google Earth (2023).

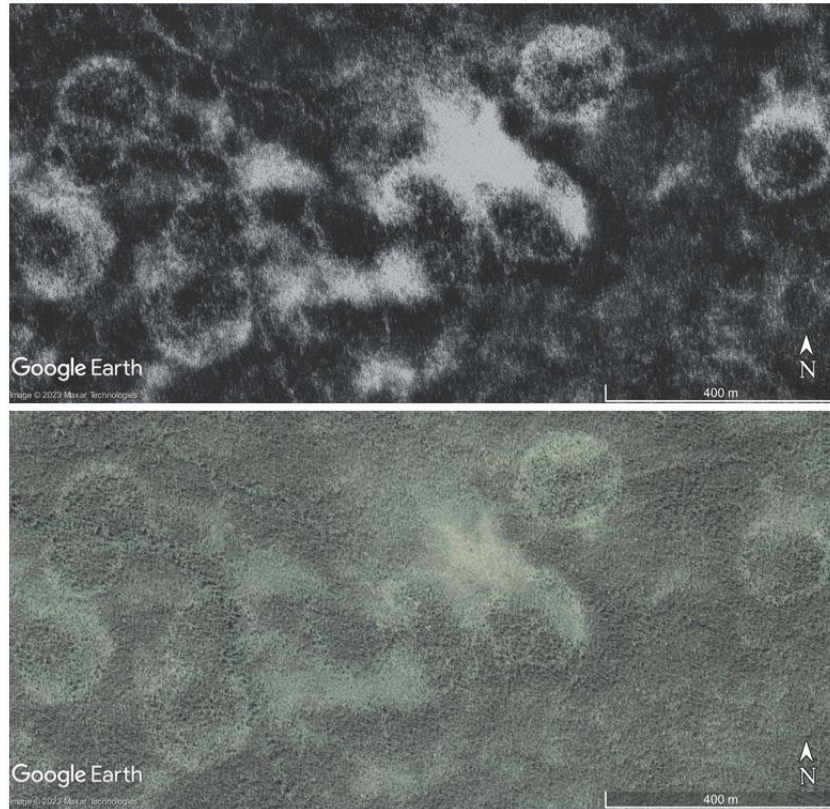


Figure 27. Exemples d’anneaux forestiers coalescents au Québec, environ 10 km au nord-ouest de la mine Casa Berardi (49°37’50’’N, 79°20’38’’O). Source : Google Earth (2023).

Diverses théories ont été proposées pour expliquer la formation des anneaux forestiers, en particulier l’influence de minéralisations en sous-surface ou une surmortalité causée par la présence de champignons. Cependant les travaux d’exploration réalisés sur certains de ces anneaux n’ont pas permis de découvrir de corps minéralisés d’importance économique, et les travaux de Veillette et Giroux (1999) et de Giroux et al. (2001) sur les anneaux du Québec ont permis d’écarter une origine biologique. Les travaux de la Commission géologique de l’Ontario menés depuis les vingt dernières années ont montré que les anneaux forestiers sont l’expression en surface de cheminées réductrices riches en méthane et parfois en H_2S (**Figure 28**), comparables à celles développées dans les sols au-dessus de certains corps minéralisés. Dans le cas des anneaux forestiers toutefois, la présence de minéralisations ne semble pas être le facteur déterminant à l’origine du développement de l’environnement réducteur. Les publications consultées traitent principalement du mécanisme de formation des anneaux et n’abordent pas la question de l’origine du milieu réducteur qui en est la cause ultime. Dans une localité en Ontario (Jog Lake, dans le district de Cochrane), Hamilton (2005) observe que plusieurs anneaux forestiers sont alignés, mais n’investiguent pas plus avant le possible lien avec une fracture ou une faille dans le roc sous-jacent.

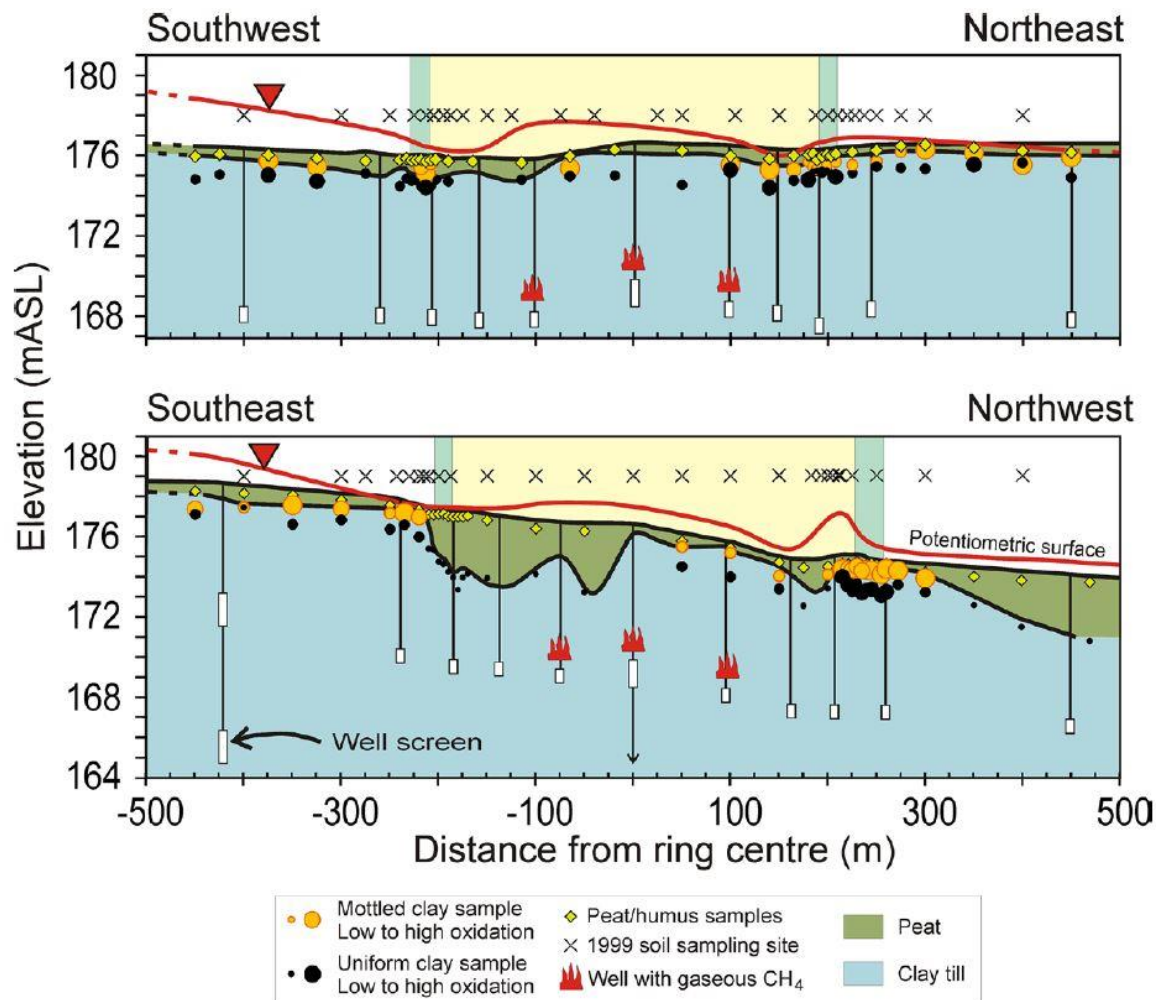


Figure 28. Coupes stratigraphiques à travers deux anneaux forestiers au nord de Timmins, en Ontario. Le méthane est rapporté comme étant présent à des « concentrations inflammables » dans certains des puits d'observation (Brauneder et al., 2016; reproduit avec permission).

Quelle que soit la cause du milieu réducteur au centre de l'anneau, à la périphérie de celui-ci les fluides réducteurs entrent en contact avec un milieu plus oxydant. Un front d'oxydo-réduction se développe en périphérie des cheminées réductrices, qui entraîne des changements dans la minéralogie (Brauneder, 2012) et dans le potentiel spontané (Hamilton et Hattori, 2008) des sols. En particulier, la production d'acides organiques provoque la dissolution partielle des carbonates du substratum, créant ainsi une dépression dans l'anneau et libérant du CO₂ (Figure 29). Certains des anneaux forestiers étudiés sont en outre caractérisés par des communautés de microorganismes autotrophes spécifiques (von Gunten et al., 2018). Le méthane dissout échantillonné au centre des anneaux forestiers est d'origine biogénique (Hamilton et al., 2004) de même que le CO₂ échantillonné dans les sols de l'anneau (Majeed, 2020).

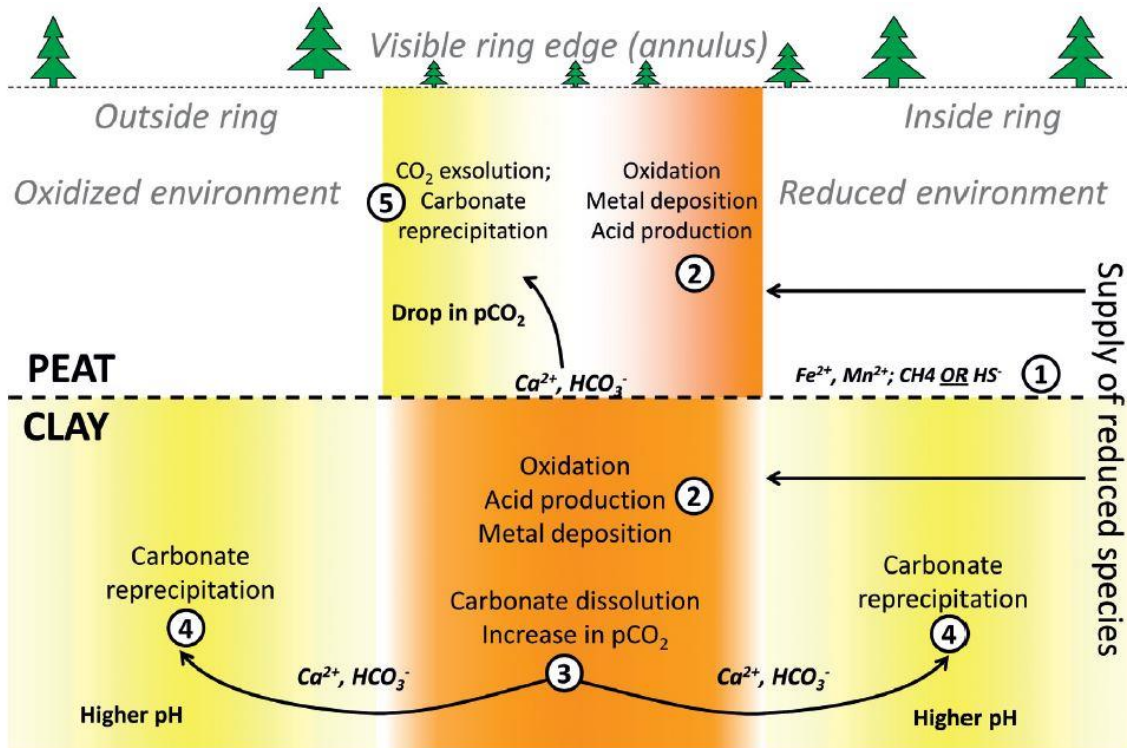


Figure 29. Modèle proposé pour expliquer la variation du potentiel d'oxydo-réduction et du contenu en carbonate dans l'anneau des anneaux forestiers (Brauneder et al., 2016; reproduit avec permission). (1) : Migration des espèces réduites vers la périphérie de l'anomalie, (2) : oxydation des espèces et production d'acides organiques, (3) : dissolution des carbonates et dispersion du carbone inorganique et du calcium, (4) : précipitation des carbonates à l'extérieur de l'anneau, (5) : migration ascendante du carbone inorganique dissout et du calcium vers la tourbe, précipitation des carbonates dans la tourbe et augmentation du pH.

Malvoisin et Brunet (2023) ont postulé que les anneaux forestiers documentés en Ontario et au Québec pouvaient être des indicateurs de la présence d'hydrogène en sous-surface, notamment sur la base de la coïncidence spatiale entre la région où ces anomalies sont reconnues et la présence de mines d'or dans lesquelles de l'hydrogène a été détecté (voir Séjourné et al., 2023). Si la coïncidence spatiale régionale des anneaux forestiers avec des indices d'hydrogène dans certaines mines d'or et la présence d'un environnement fortement réducteur dans les sols des anneaux sont deux indices recevables pour soupçonner un possible lien entre les anneaux forestiers et la présence d'hydrogène, il ne s'agit encore que de pistes de réflexion qui demeurent à confirmer par des mesures d'hydrogène sur le terrain. Des échantillons de gaz ont été prélevés dans plusieurs anneaux forestiers en Ontario, mais les gaz analysés consistaient essentiellement en méthane et CO₂ (Hamilton et al., 2004). Des analyses d'hydrogène ont été réalisées pour deux anomalies et n'ont pas révélé la présence d'hydrogène (Majeed, 2020). Cependant l'échantillonnage a été effectué selon une méthodologie qui paraît inadaptée à la préservation de l'hydrogène jusqu'au laboratoire : forage à la tarière, purge des gaz du sous-sol avant le prélèvement, échantillonnage dans des sacs Tedlar© (Hamilton et al., 2019). Un échantillonnage dédié pour détecter la présence d'hydrogène dans les anneaux forestiers du Québec et d'Ontario demeure à réaliser.

3.6 Potentiel

Les mines d'or de la Province du Supérieur sont localisées dans des roches archéennes qui comprennent notamment des roches mafiques et plus rarement ultramafiques, ainsi que des intrusions de granitoïdes. La région de la mine Éléonore comprend de surcroît des roches sédimentaires qui incluent des formations de fer.

Les mines d'or de la région de l'Abitibi sont par ailleurs localisées dans une ceinture de roches vertes qui s'étend également en Ontario, où de l'hydrogène dissous est documenté dans l'eau de plusieurs mines à des concentrations très variables, allant de 0,06 à 57,8% H₂. Du méthane et de l'azote d'origine abiotique sont associés à l'hydrogène. Une origine biogénique est parfois documentée pour le méthane, l'activité bactérienne pouvant alors consommer l'hydrogène initialement présent, ou à mesure que celui-ci est produit. Lorsque l'origine de l'hydrogène peut être déterminée dans les mines ontariennes, des processus de serpentinisation et/ou de radiolyse sont identifiés. Les gaz dissous dans l'eau des mines d'or du Québec n'ont pas fait l'objet d'études aussi approfondies que dans le cas de leurs analogues ontariens, mais des concentrations de l'ordre de 0,5 à 1,8% H₂ sont cependant rapportées dans deux cas.

Des anneaux de végétation dégradée sont documentés dans ces mêmes régions en Ontario et au Québec. Ces anneaux n'ont pas les mêmes caractéristiques que les dépressions circulaires qui sont associées à des émanations d'hydrogène ailleurs dans le monde, mais ils témoignent *a minima* d'un environnement réducteur qui pourrait être associé à la présence d'hydrogène naturel dans les sols. Cette hypothèse demeure à confirmer par des vérifications sur le terrain.

4. LES KIMBERLITES

Au Québec, l'exploration diamantifère a été surtout concentrée dans le nord-ouest de la province, dans le craton du Supérieur. Deux endroits ont été particulièrement actifs, soit la région du rift du Témiscamingue dans la Sous-Province du Pontiac et la région adjacente au village de Desmaraisville, situé dans la partie nord de la Sous-Province de l'Abitibi (**Figure 30**; Moorhead et al., 1999). Des cheminées et des dykes de kimberlite ont aussi été découverts dans la région des monts Torngat et la région des monts Otish (Moorhead et al., 1999). Dans cette dernière région, la Mine Renard extrait des diamants depuis 2016 (localisation à la **Figure 31**).

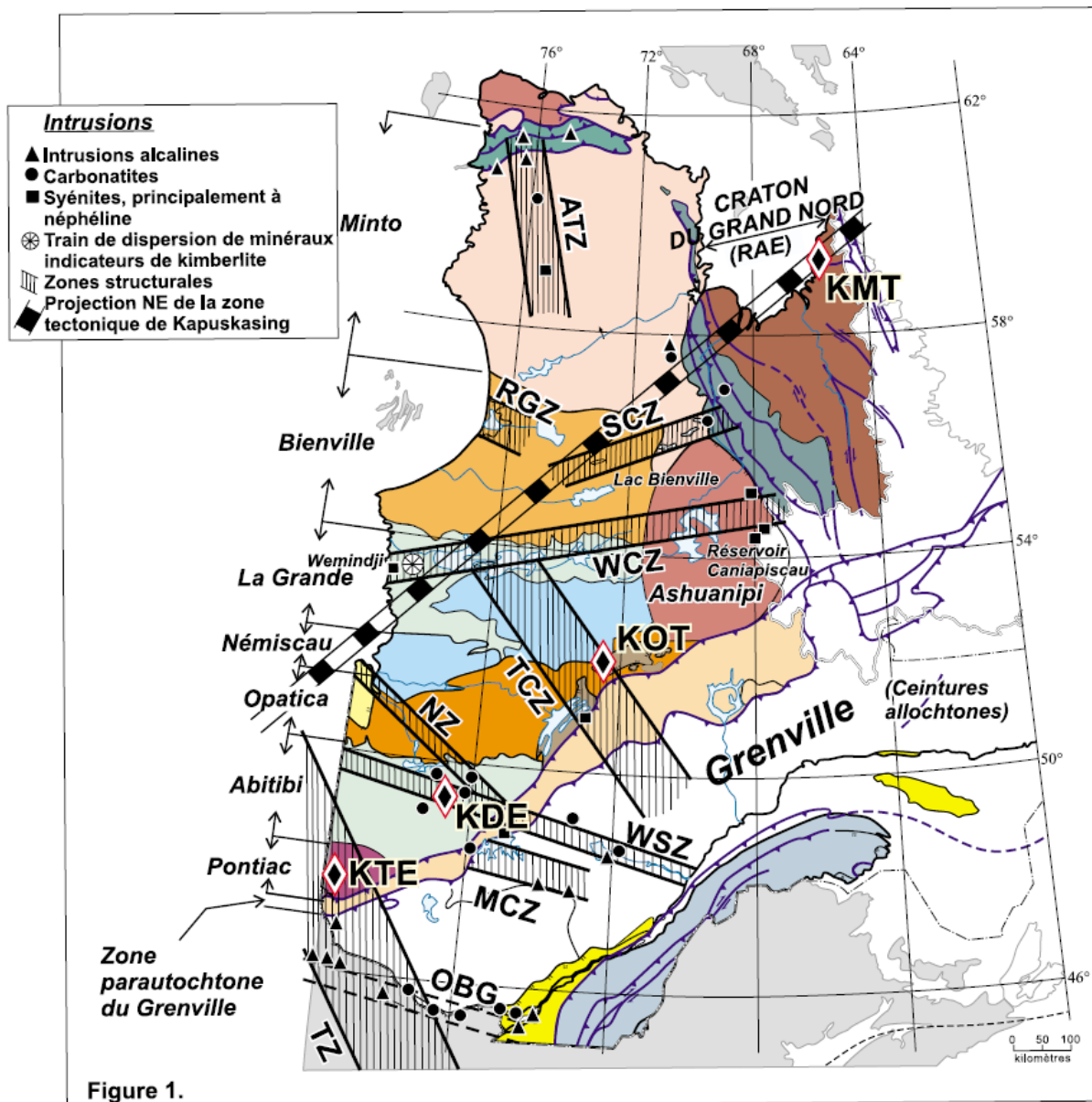


Figure 30. Localisation des grandes zones de failles et des intrusions alcalines au Québec (tiré de Moorhead et al., 2000; © Gouvernement du Québec). Champs de kimberlites : Torngat (KMT), Otish (KOT), Desmaraisville (KDE), Témiscamingue (KTE).

4.1 Monts Torngat (K1)

Le champ des Torngat est localisé sur la côte NE de la baie d'Ungava dans le secteur du Fjord d'Abloviak (Digonnet et al, 1996a, b; Digonnet, 1997). Une douzaine de dykes de kimberlite, d'une épaisseur maximale de 2 m, ont été découverts dans ce secteur. Un macrodiamant de qualité gemme y a été découvert. Ces dykes ont été datés par la méthode Ar/Ar sur des phlogopites à 544 ± 12 Ma.

Les travaux de Faure (2004; 2005) suggèrent qu'en Amérique du Nord les diamants se retrouvent où les intrusions de kimberlites et autres roches de la même famille ont pu échantillonner la zone de genèse des diamants, soit dans le manteau à une profondeur de 180-200 km (**Figure 31**). Ainsi les zones se trouvant où la racine des cratons atteint cette profondeur ont le plus de potentiel. Les kimberlites diamantifères des Torngat sont fort probablement liées à la marge du Craton Nord Atlantique comme le seraient celles en Terre de Baffin et celles retrouvées au Groenland (Longuée et Popiela, 2018).

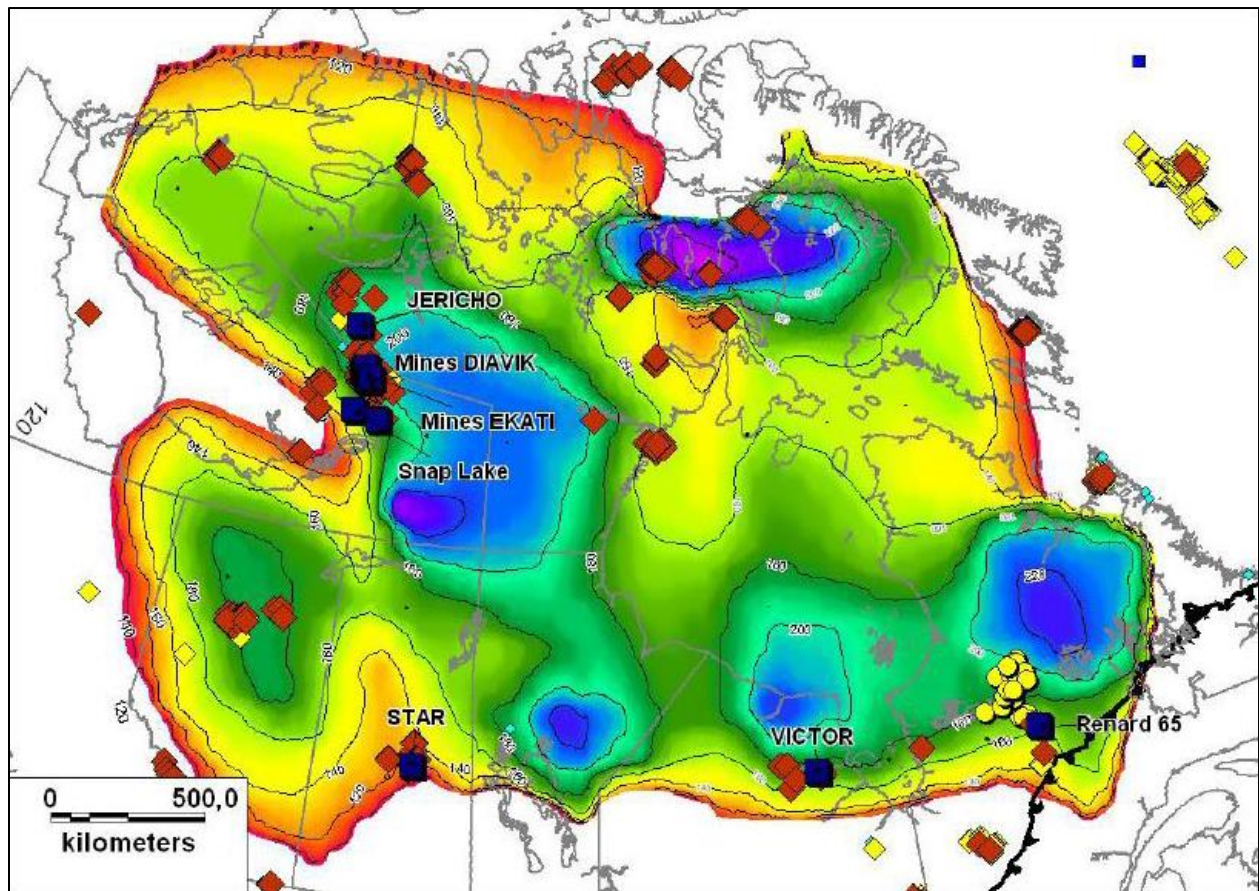


Figure 31. Carte montrant l'épaisseur de la croûte terrestre dans le nord du Canada et la position des indices (losanges rouges et jaunes) et les mines de diamants (carrées bleus). Tirée de Faure (2004; © Gouvernement du Québec).

4.2 Otish (K2)

Une campagne d'exploration d'uranium d'envergure couvrant l'ensemble du bassin des monts Otish a été réalisée à partir du début des années 1970 jusqu'au milieu des années 1980. En 1978, au cours de travaux d'exploration sur des cibles géophysiques et radiométriques, trois forages ont intercepté des dykes de kimberlite (Gehrish et al., 1979; DITEM, 1997). Cette zone est située sur le flanc nord de la partie occidentale du bassin protérozoïque des monts Otish (**Figure 32**), à environ 4 km au NE de la position présumée de la discordance entre les sédiments protérozoïques du Groupe d'Otish et les roches sous-jacentes d'âge archéen de la partie est de la Sous-Province d'Opatica (Moorhead et al., 1999).

Les dykes de kimberlite se situent approximativement à 500 m à l'ouest d'un gîte d'uranium, découvert en 1975. Ce gîte est encaissé dans des gneiss à biotite et cordiérite à proximité d'un granite. Une faible anomalie magnétique coïncide avec la position du gîte. Plus à l'ouest, les levés géophysiques et radiométriques ont détecté des cibles d'intérêt qui ont fait l'objet de 14 forages pour un total de 914 m, sans intercepter de minéralisation significative en uranium (Gehrish et al., 1979). Trois des forages ont recoupé des kimberlites sur des largeurs variant de 10 cm à 38 m.

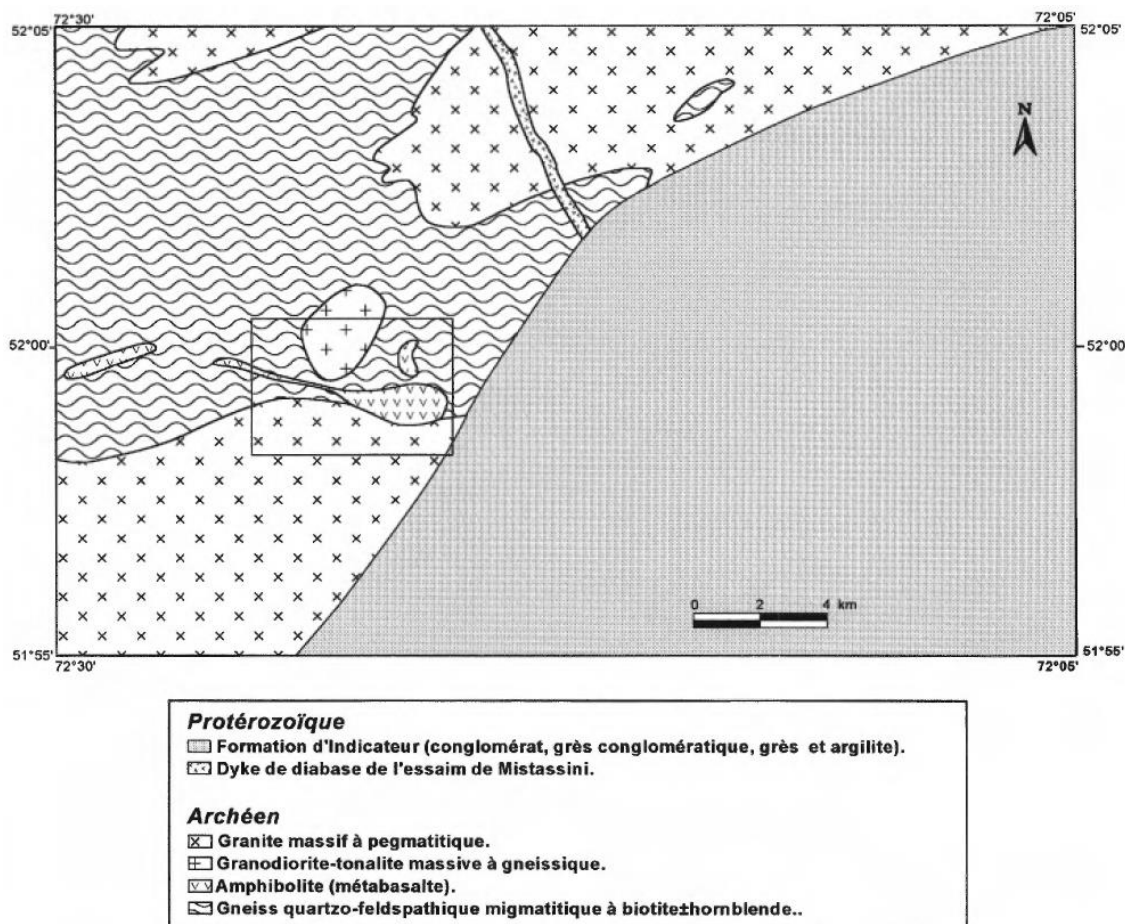


Figure 32. Géologie du secteur au NE de la partie Ouest du bassin des monts Otish, d'après Gehrish et al. (1979) (© Gouvernement du Québec).

4.3 Desmaraisville (K3)

Le champ de Desmaraisville (**Figure 33**) est localisé dans la partie centre-nord de la Sous-Province de l'Abitibi, à environ 125 km à l'ouest de Chibougamau. Il forme une zone elliptique, allongée vers le nord-ouest, de 55 km de long par 40 km de large. Les cheminées de kimberlite sont concentrées dans deux secteurs, celui du canton d'Ailly au nord et celui du canton Le Tac au sud. Ce champ renferme cinq cheminées de kimberlite et de brèche kimberlitique de faciès hypabyssal, localement diamantifères, ainsi qu'une multitude de minces dykes, généralement de moins de 1 m d'épaisseur. Un dyke a été daté à 1,1 Ga (Watson, 1967) à proximité de la mine Coniagas, dans le canton Le Sueur.

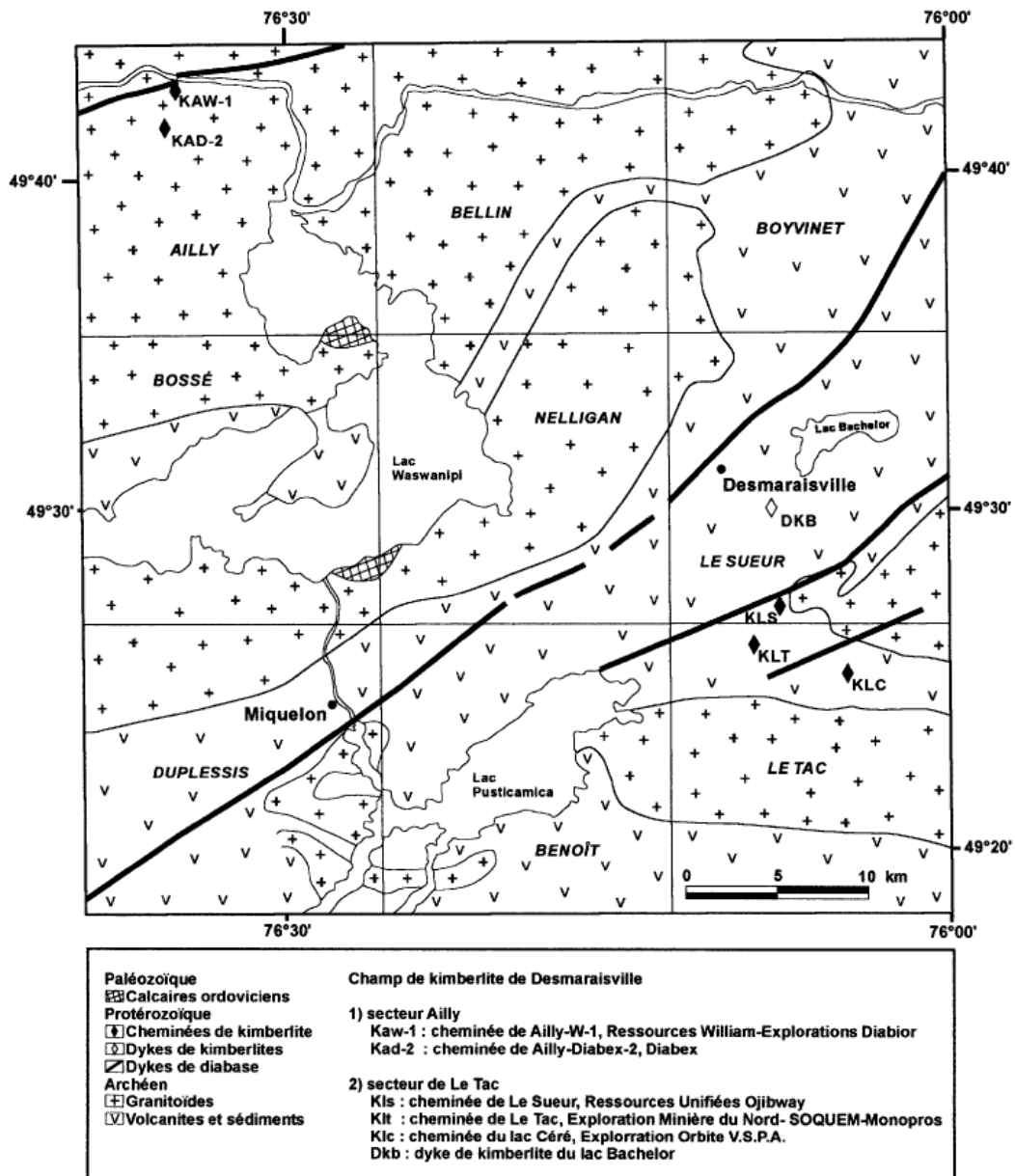


Figure 33. Localisation des cheminées de kimberlite du champ de Desmaraisville (tiré de Moorhead et al, 1999; © Gouvernement du Québec).

4.4 Témiscamingue (K4)

Le champ de kimberlites du Témiscamingue, localisé surtout en Ontario, est centré sur la zone de rift du Témiscamingue (**Figure 34**). Il forme une zone elliptique, allongée vers le NNO à 340°, de 125 km de long par environ 40 km de large (Brummer et al., 1992b; Pegg, 1993; Sage, 1996). Il est englobé par la zone structurale du lac Témiscamingue (Brummer et al., 1992b). Les kimberlites sont regroupées dans deux secteurs, celui de Kirkland Lake au nord et celui de Cobalt au sud. Trois cheminées de diatrème du secteur de Cobalt sont localisées au Québec. Le champ renferme au total 17 cheminées de diatrèmes et 12 occurrences de dykes, localement diamantifères (Sage, 1996). Plusieurs cheminées et dykes ont été datées, les âges se distribuent entre 125 et 159 Ma (Brummer et al., 1992b; Sage, 1996).

Sader et al. (2007) se sont intéressés aux signatures géochimiques des eaux souterraines des cheminées kimberlitiques diamantifères des régions de Kirkland Lake et du lac Témiscamingue, à la frontière Québec-Ontario. Ils ont identifié des anomalies qui sont caractéristiques des réactions de serpentinisation à basse température.

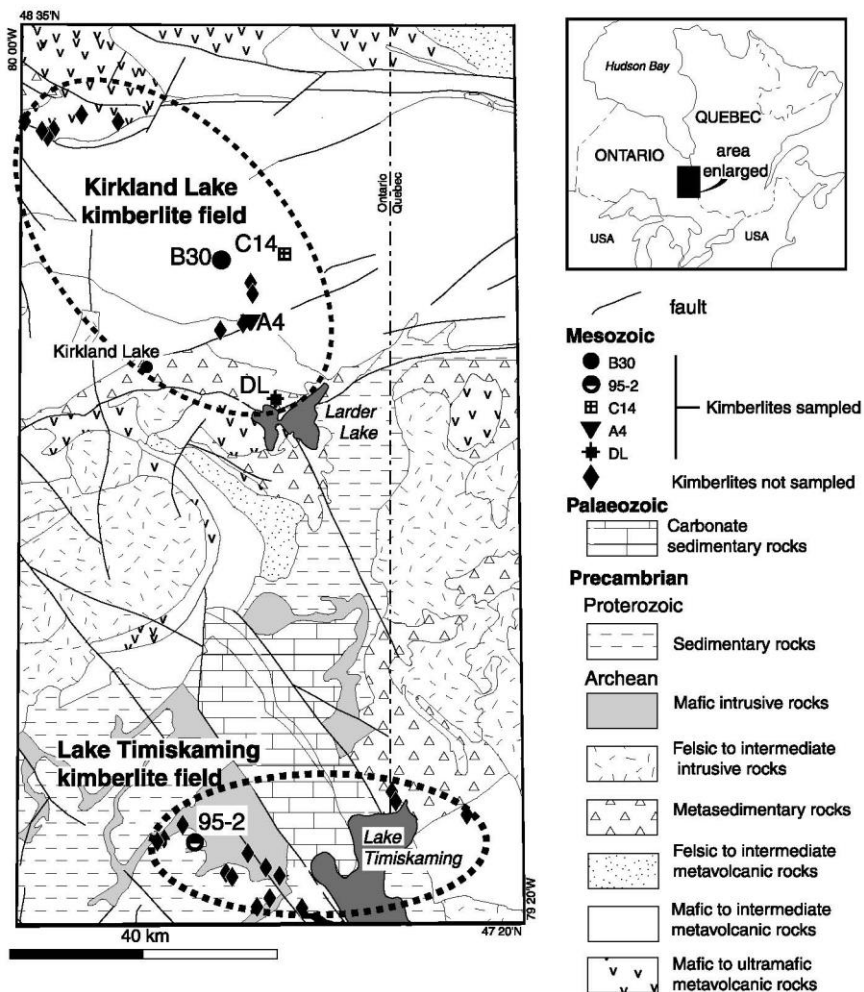


Figure 34. Emplacement des champs de kimberlite de Kirkland Lake et du lac Témiscamingue dans le nord-est de l'Ontario et l'ouest du Québec (tiré de Sader et al., 2007; reproduit avec permission).

4.5 Potentiel

Les kimberlites sont des roches ultramafiques très riches en volatils et qui proviennent du manteau. La littérature documente, dans le monde, de nombreuses évidences de la présence d'hydrogène moléculaire et d'eau présents en inclusions fluides dans des diamants associés aux kimberlites. Ces roches sont également susceptibles d'être serpentinisées. Si l'on ne dispose pas de données sur la présence d'hydrogène naturel associé aux kimberlites contrairement au cas des mines d'or (voir Section 3.6), un phénomène de serpentinisation à basse température a été mis en évidence dans le cas du champ de kimberlites de Témiscamingue. En outre, la présence de kimberlites peut également être associée à des fractures crustales susceptibles de servir de conduit pour la migration de fluides profonds.

5. LES INTRUSIONS ALCALINES

5.1 Pluton du Lac Brisson (I1)

Cette unité, reconnue pour son potentiel en éléments des terres rares, a été introduite sous le terme de « Granite peralcalin du lac Brisson » par Pillet (1985). Elle avait été précédemment décrite par Taylor (1979) comme une roche adamellitique (monzonite quartzifère) et par Bélanger (1984) comme un granite hyperalcalin à amphibole. Ce granite a été renommé « Pluton du Lac Brisson » lors de la compilation régionale réalisée par les géologues du Ministère en 2003. Le Pluton du Lac Brisson est équivalent au *Strange Lake peralkaline complex* au Labrador, qui a été décrit par Zajac et al. (1984), Currie (1985) et Miller (1985).

Le Pluton du Lac Brisson occupe une superficie de 28 km² dans la partie centre-est du Domaine de Mistinibi-Raude (Charette et al., 2019) à cheval sur la frontière du Québec et du Labrador (Figure 35).

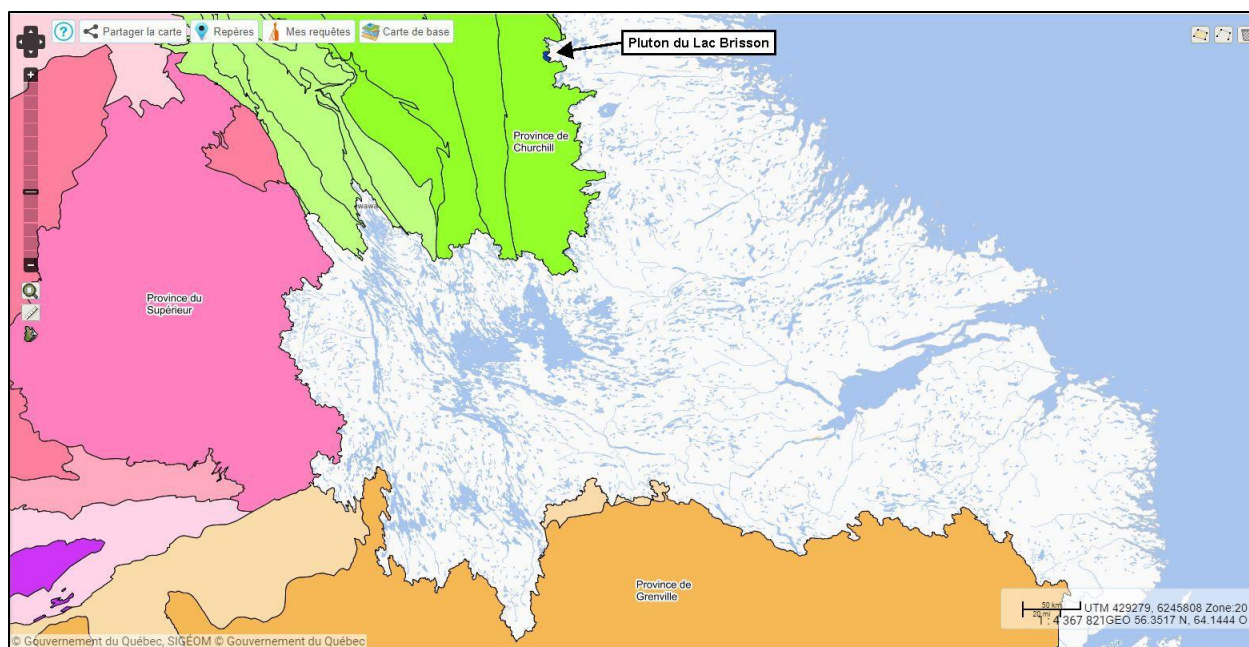


Figure 35. Localisation géologique du Pluton du Lac Brisson (en bleu); SIGÉOM (2023).

Le Pluton du Lac Brisson comprend plusieurs faciès qui se distinguent principalement par leur minéralogie (Figure 36). Ces faciès, définis par Nassif (1993), incluent un granite hypersolvus et un granite subsolvus. Au sein d'un même faciès, la granulométrie de la roche peut varier grandement. Des zones de brèches à fluorite et hématite ont été rapportées par Pillet (1985) en bordure de l'intrusion, plus précisément au nord-ouest et au sud-est. L'âge de cristallisation autour de 1,240 Ga a été obtenu dans un granite hypersolvus à grain fin. Plusieurs âges de refroidissement entre 1,275 et 1,120 Ga ont été obtenus à partir d'analyses K-Ar sur les amphiboles et d'analyses Rb-Sr sur les roches totales (Currie, 1985; Pillet et al., 1989).

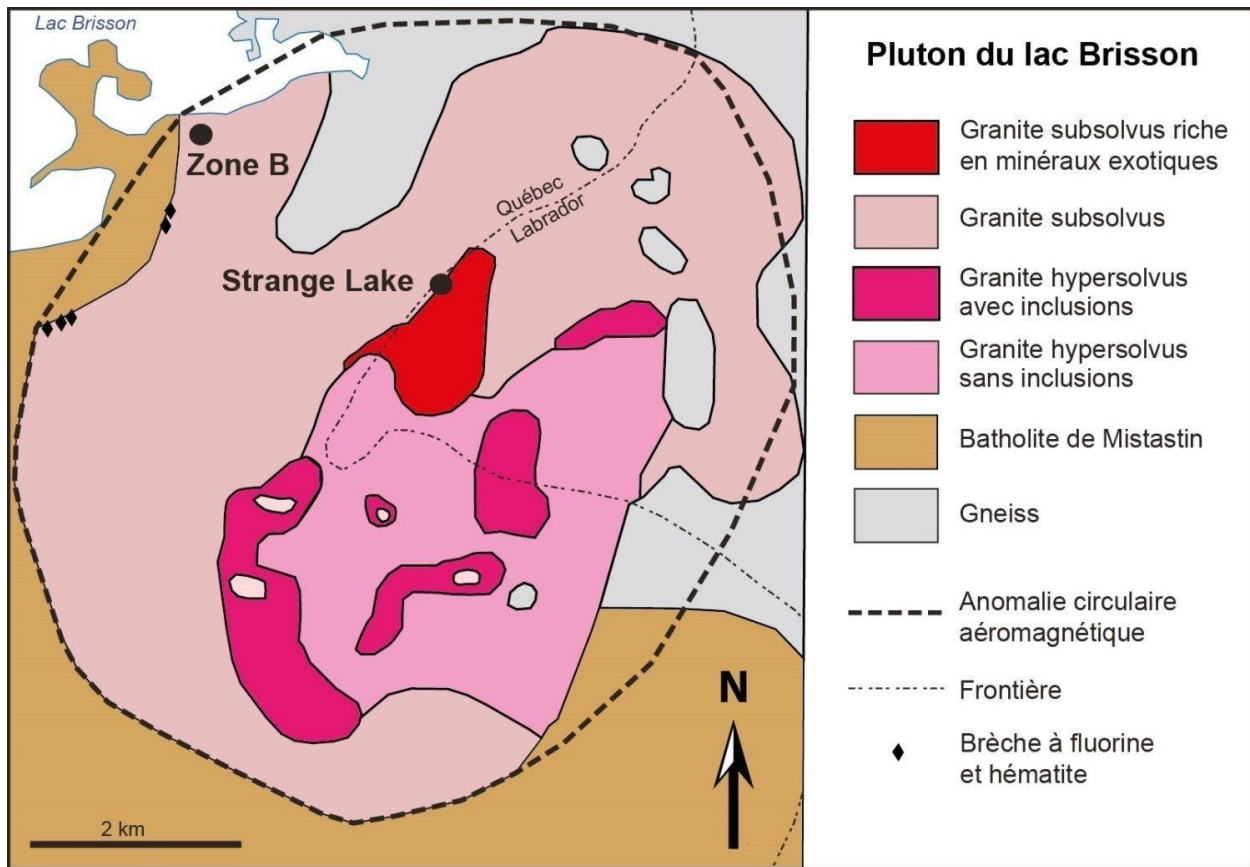


Figure 36. Carte géologique simplifiée du Pluton du Lac Brisson (modifiée de Miller et al., 1993; reproduit avec permission).

5.2 Syénite de Misery (I2)

L'intrusion syénitique de Misery a été découverte en 2007 et fut l'objet d'une étude dans le cadre d'un projet de maîtrise (Petrella, 2012), après avoir été introduite pour la première fois par Petrella (2011). Le terme « Syénite de Misery » a été formalisé par Lafrance et al. (2018) dans leur synthèse régionale du sud-est de la Province de Churchill (**Figure 37**).

La Syénite de Misery (mPsyn) s'injecte dans le Batholite de Mistastin (mPmit). Petrella et al. (2014) rapportent que le contact avec le batholite est graduel et caractérisé par la disparition de la structure rapakivi dans le Mistastin. L'âge de cristallisation obtenu sur un échantillon de la Syénite de Misery a été défini autour de 1 410 Ma (David et al., 2012).

La Syénite de Misery est associée à une anomalie magnétique annulaire nettement visible sur la carte du champ magnétique total résiduel (**Figure 38**). Elle a été divisée en deux unités par Petrella et al. (2014) : une unité de ferrosyénite et une unité de syénite (**Figure 39**).

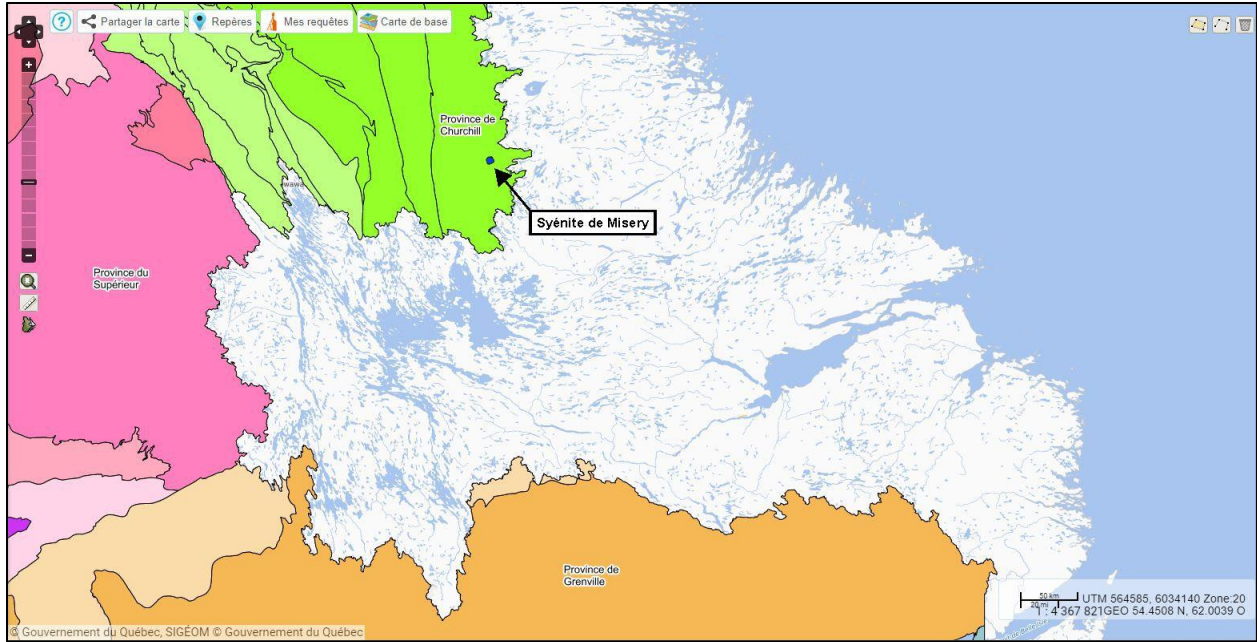


Figure 37. Localisation géologique de la Syénite de Misery (en bleu); SIGÉOM (2023)

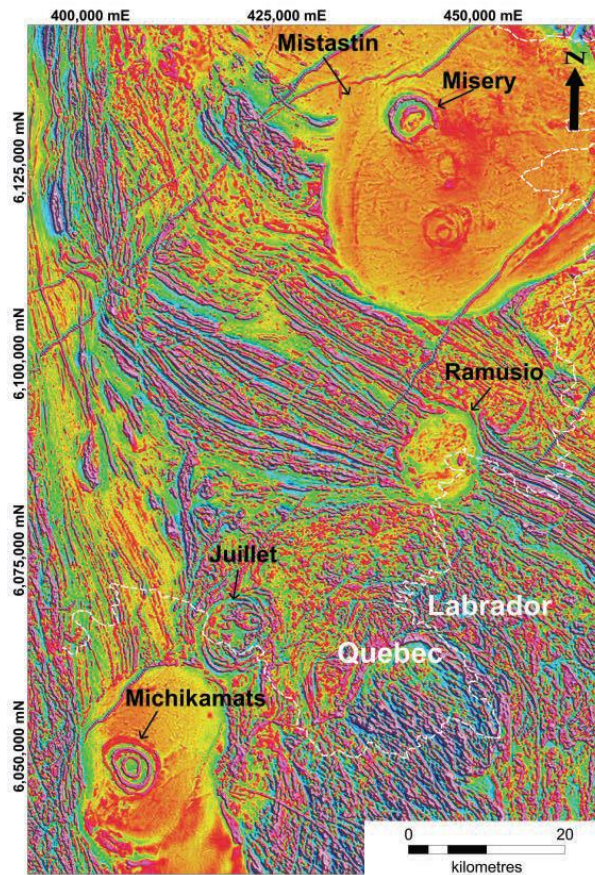


Figure 38. Carte du gradient magnétique de la Province de Churchill d'après Dumont et al. (2010) (© Gouvernement du Québec). Au moins cinq intrusions sont visibles sur la carte: Misery, Michikamats, et Juillet sont des syénites, tandis que Ramusio et Mistastin sont des granites.

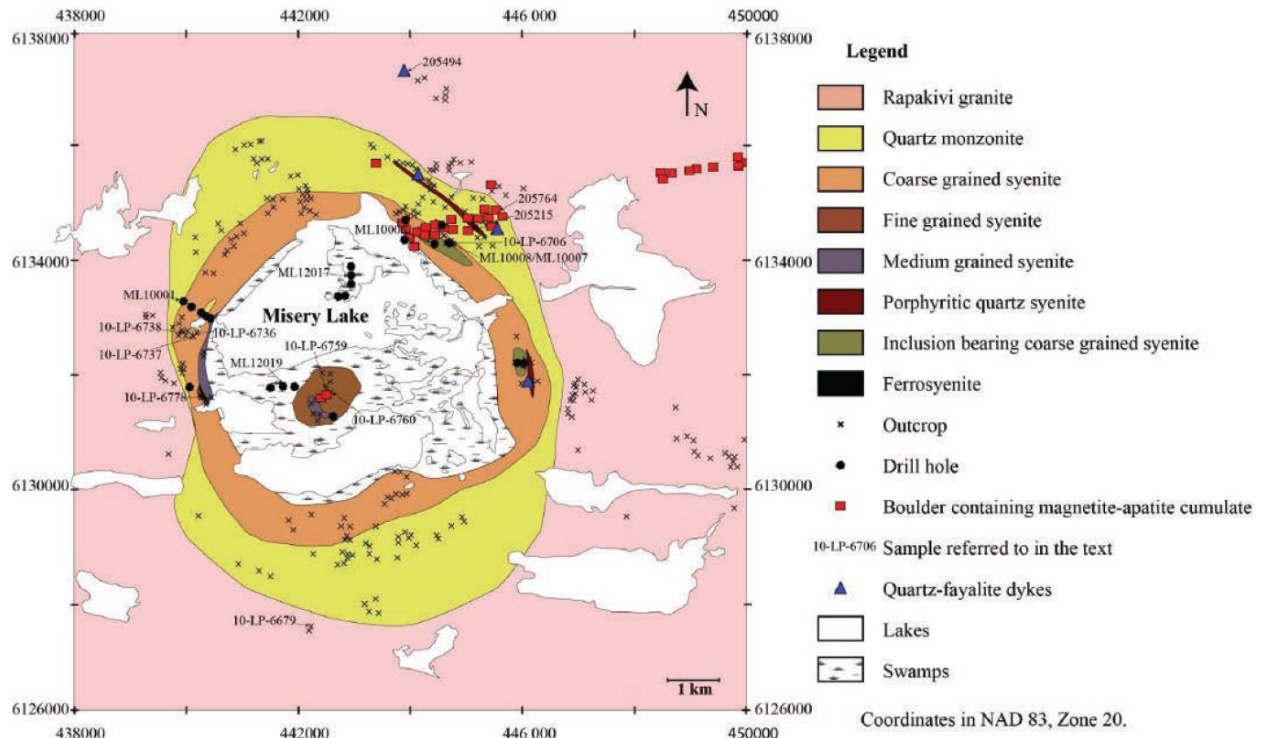


Figure 39. Carte géologique de la Syénite de Misery (Petrella et al., 2014; reproduit avec permission).

5.3 Syénite de Juillet (I3)

Taner (1992) a pour la première fois décrit cette unité de forme circulaire et l'a nommée « Intrusion syénitique du lac Juillet ». Ce nom a été modifié par Hammouche et al. (2012) pour le terme simplifié de « Syénite de Juillet ». L'unité tire son nom du lac Juillet, situé directement à l'est, en bordure duquel elle se trouve.

La Syénite de Juillet forme une intrusion circulaire d'environ 8 km de diamètre dans le secteur sud du Domaine lithotectonique de Mistinibi-Raude (**Figure 40**), à la frontière avec le Labrador, et correspond à un arrangement concentrique de zones plus magnétiques que les roches environnantes (Charette et al., 2019). Elle comprend deux unités informelles (**Figure 41**) : une unité de syénite à feldspath alcalin (mPjui1) et une unité de gabbro (mPjui2). Le gabbro de l'unité mPjui2 couvre une superficie limitée (1 km²) au centre de l'intrusion et forme localement quelques masses au sein de la syénite à feldspath alcalin de l'unité mPjui1 (52 km²).

La Syénite de Juillet a été échantillonnée pour la géochronologie lors des travaux de cartographie d'Hammouche et al. (2012). Les analyses confirment l'âge de cristallisation mésoprotérozoïque autour de 1,480 Ga (David et al., 2012).

La Syénite de Juillet recoupe les gneiss et la tonalite du Complexe de Jannière (ApPjai). Des enclaves décamétriques de paragneiss, de formations de fer et de métavolcanites mafiques des unités archéennes à paléoprotérozoïques sont présentes dans la syénite à feldspath alcalin (mPjui1). Les dykes de monzonite (lamprophyres ?) recoupant l'unité mPjui1 pourraient représenter une

roche mafique associée à la syénite selon Taner (1992). Cet auteur mentionne aussi que la Syénite de Juillet pourrait représenter une intrusion satellite de la Suite de Michikamau. Ces deux unités sont d'ailleurs approximativement du même âge.

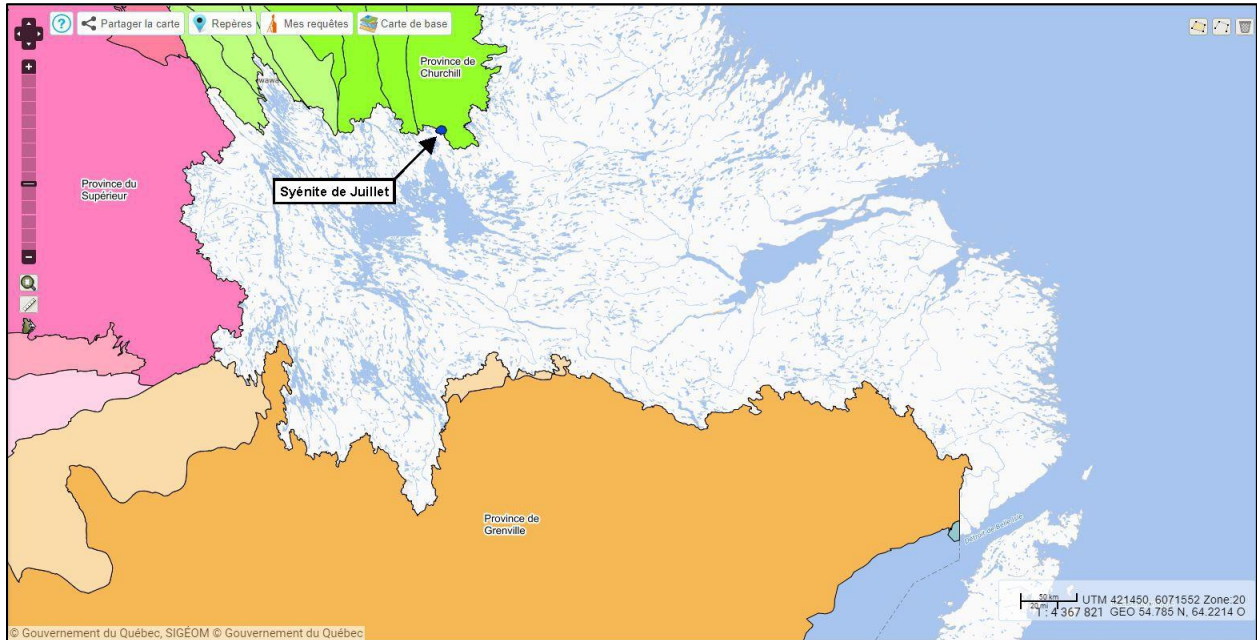


Figure 40. Localisation géographique de la Syénite de Juillet (en bleu); SIGÉOM (2023).

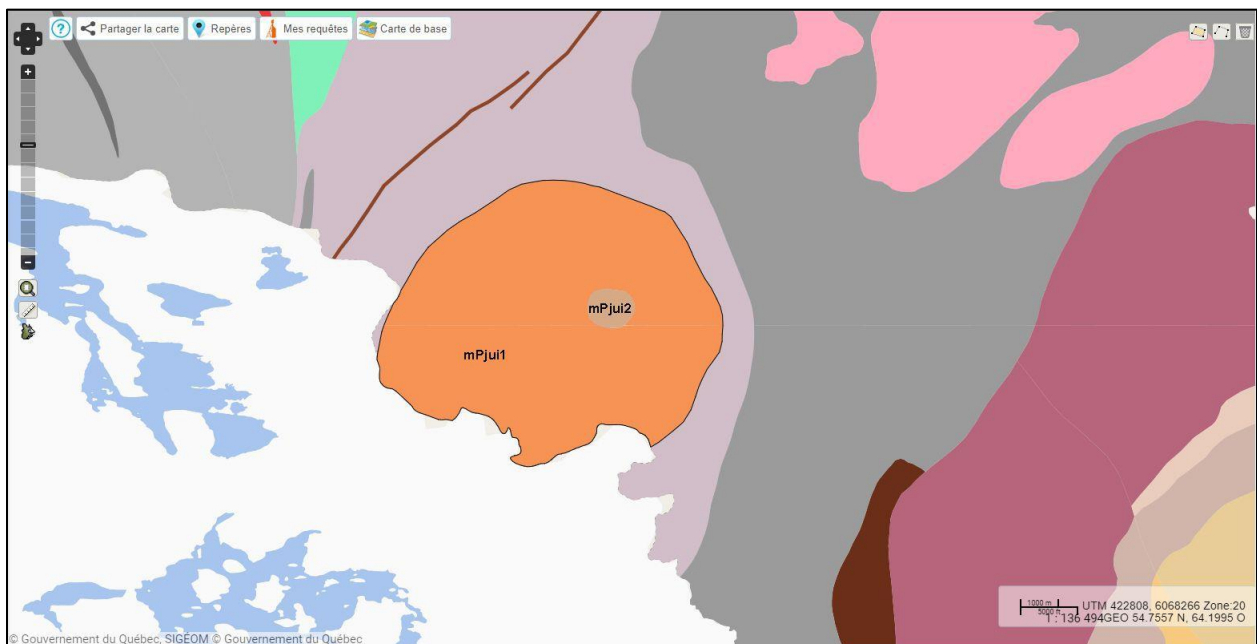


Figure 41. Unité de la Syénite de Juillet: syénite à feldspath alcalin (mPjui1) et gabbro (mPjui2); SIGÉOM (2023).

5.4 Intrusion alcaline de Crevier (I4)

L'intrusion a tout d'abord été nommée complexe alcalin de Crevier et a été découverte par la SOQUEM en 1975 (dans Bergeron, 1980) à la suite d'un levé radiométrique aéroporté. Cette découverte a été suivie de plusieurs travaux d'exploration par cette société, qui a découvert plusieurs minéralisations de Nb-Ta. Bergeron (1980) a réalisé une maîtrise traitant de la pétrographie et de la géochimie des différents faciès formant le complexe ainsi que de son encaissant. En 2012, le Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles a supporté un projet de maîtrise pour l'étude de cette minéralisation en Nb-Ta (Groulier et al., 2014). L'intrusion a alors été renommée « Intrusion alcaline de Crevier » pour montrer son caractère intrusif tardi-grenvillien. Par la suite, Moukhsil et El Bourki (2021) et El Bourki et Moukhsil (2021) l'ont étudiée lors des travaux de cartographie dans le secteur de Girardville et du lac Blondelas, respectivement (feuille 32H07), dans la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean (**Figure 42**).

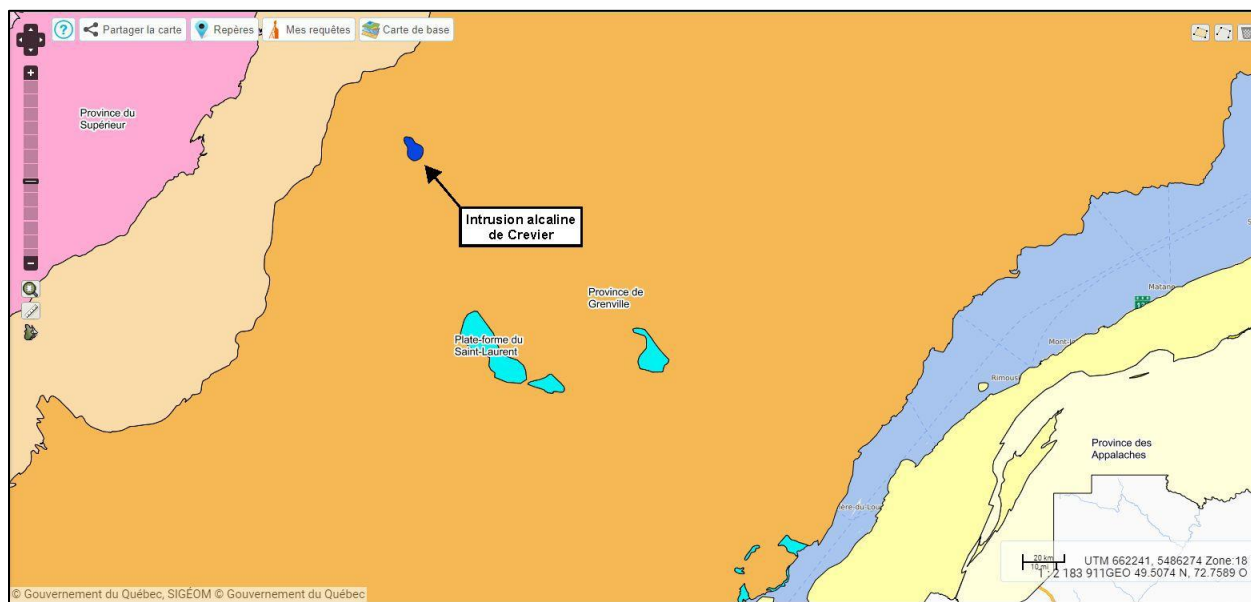


Figure 42. Localisation géologique de l'Intrusion alcaline de Crevier (en bleu); SIGÉOM (2023).

L'intrusion alcaline de Crevier a une forme de poire et est allongée selon un axe orienté à 320°. La partie sud est plus ou moins subcirculaire et la partie nord est plus allongée. Elle affleure surtout dans le feuillet 32H07 et continue vers le nord (feuille 32H10).

L'Intrusion alcaline de Crevier (nPiac1) est constituée d'un batholite polyphasé formé de roches alcalines associées à la carbonatite (**Figure 43**). Ce batholite est injecté de plusieurs essaims de dykes mégacristiques à composition de syénite à néphéline et il renferme plusieurs zones minéralisées en Nb-Ta (contenus dans le pyrochlore).

L'intrusion alcaline de Crevier est injectée dans la Suite plutonique de la Vertu (mPvet2), constituant ainsi son encaissant. La bordure de l'intrusion (nPiac1a) est très déformée au contact de l'encaissant. L'intrusion contient quelques rares enclaves de paragneiss du Complexe de Barrois (mPboi4).

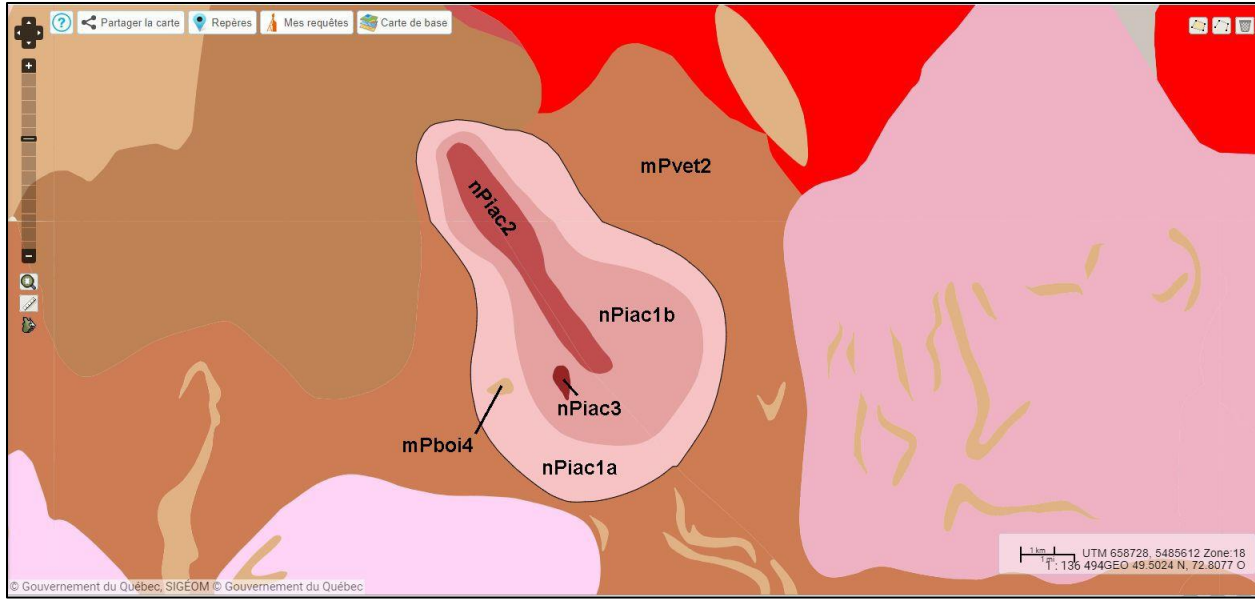


Figure 43. Unités géologiques de l'Intrusion alcaline de Crevier (SIGÉOM, 2023).

Une datation isotopique réalisée sur un échantillon de syénite à grain grossier et à néphéline a donné un âge tardi-grenvillien pour la mise en place de l'Intrusion alcaline de Crevier (Groulier et al., 2020).

5.5 Suite syénitique de Kipawa (I5)

La Suite syénitique de Kipawa se situe à 60 km au nord-est de la ville de Témiscamingue et à 140 km au sud de Rouyn-Noranda, au Québec. Elle est localisée dans la ceinture parautochtone de la Province de Grenville, à 55 km au sud du contact avec la Province archéenne du Supérieur (**Figure 1**, **Figure 7** et **Figure 44**). La Suite syénitique de Kipawa est l'hôte d'un gîte en terres rares actuellement en cours de développement (Wavrant et al., 2017; Matte et al., 2022).

Le gîte de Kipawa est encaissé dans le complexe alcalin intrusif de Kipawa, mis en place il y a 1,033 Ga (van Breemen et Currie, 2004). Le complexe comprend deux unités lithologiques principales, soit un granite gneissique peralcalin recouvrant une syénite gneissique contenant localement des lits de roches calco-silicatées (**Figure 45**; Saucier et al., 2013). La syénite gneissique est la lithologie hôte de la minéralisation en terres rares et est principalement composé d'eudialyte, de mosandrite et de britholite, ainsi que de minéraux moins abondants tels que le xénotime, la monazite ou l'euxénite. Le complexe de Kipawa affleure sous la forme d'une série d'imbrications en feuillets minces et plissés, situés entre des métasédiments régionaux, suggérant un contrôle tectonique régional (**Figure 46**). Plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer l'origine du complexe, mais les résultats les plus récents suggèrent que les magmas alcalins du complexe/dépôt de Kipawa pourraient s'être formés par fusion partielle du manteau suivie d'une forte contamination crustale ou par fusion de la croûte terrestre métasomatisée (Matte et al., 2022).

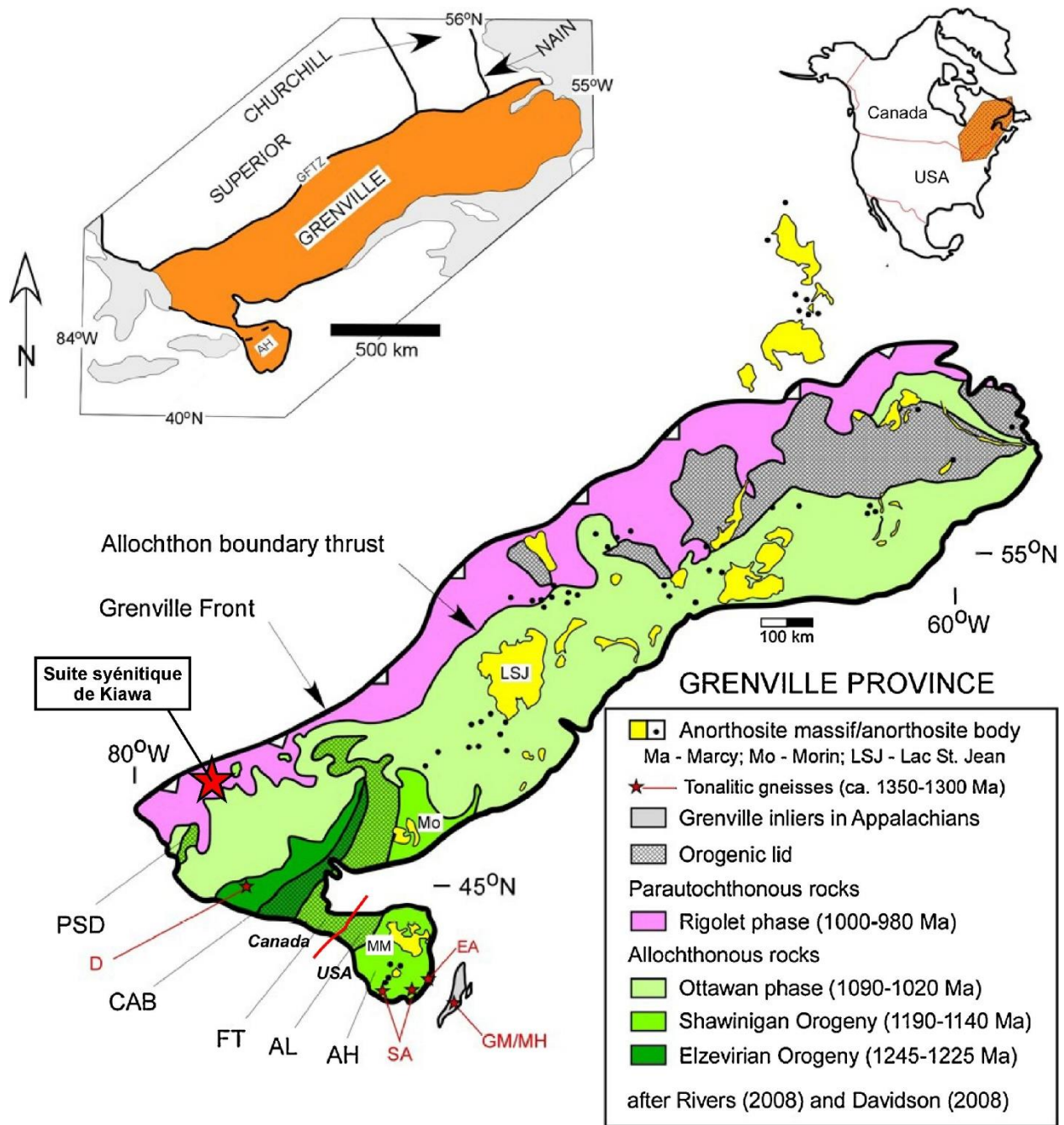


Figure 44. La province géologique du Grenville et ses principales subdivisions, avec la localisation de la Suite syénitique de Kipawa (adapté de Valentino et al., 2019; reproduit avec permission).

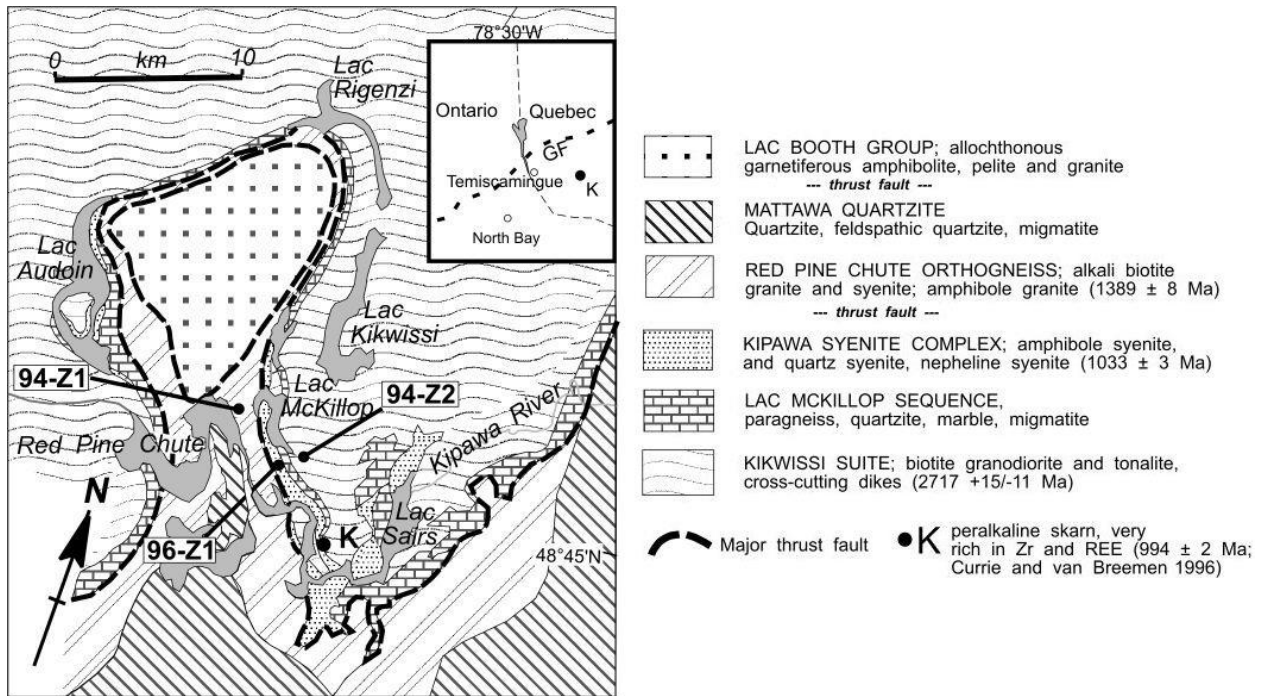


Figure 45. Carte géologique de la région de Kipawa (tiré de van Breemen et Currie, 2004; © Gouvernement du Québec)

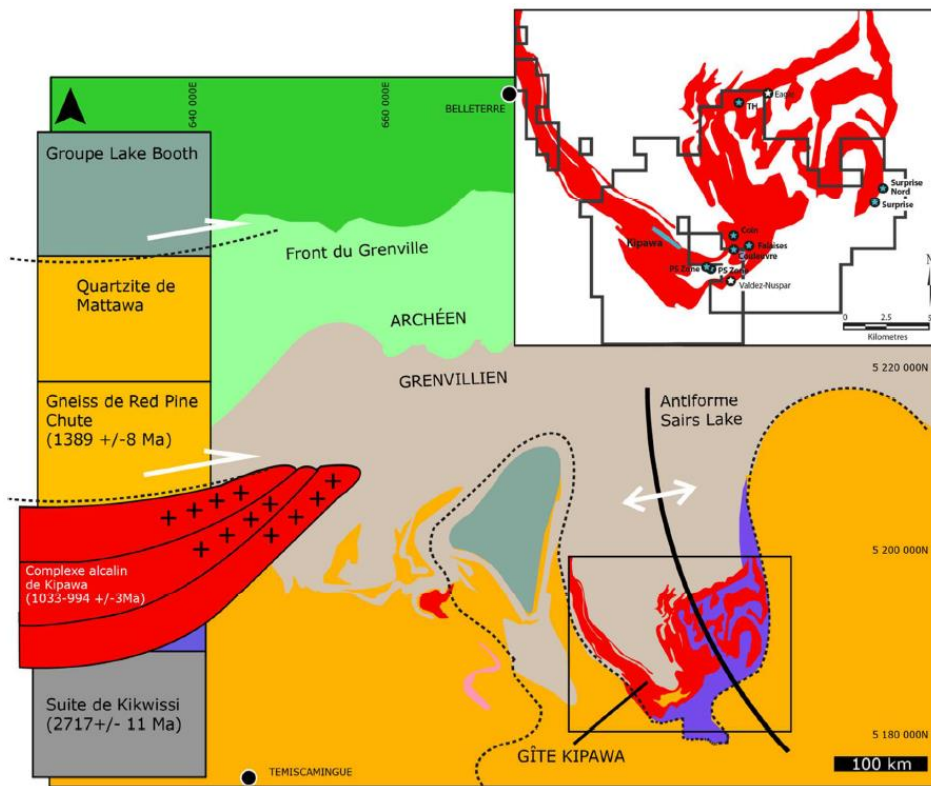


Figure 46. Carte géologique régionale et colonne stratigraphique de la Suite syénitique de Kipawa (d'après Saucier et al., 2013; © Gouvernement du Québec). Les datations U-Pb sur zircons sont tirées de Currie et van Breemen (1996) et van Breemen et Currie (2004).

5.6 Potentiel

Certains granites peralcalins sont reconnus pour contenir de l'hydrogène en inclusions fluides. C'est le cas notamment du massif d'Ilimaussaq au Groenland et de celui de Khibiny en Russie. Un autre exemple documenté est le cas du Pluton du Lac Brisson / Strange Lake à la frontière entre le Québec et le Labrador, où de l'hydrogène est documenté dans des inclusions fluides à des concentrations variant de 1,1 à 35% (Salvi et Williams-Jones, 1997). Truche et al. (2021) ont étudié ces occurrences d'hydrogène au Lac Brisson et identifient l'altération hydrothermale de l'arfvedsonite, une amphibole riche en fer ferreux, comme étant le mécanisme à l'origine de l'hydrogène détecté.

Dans le cas du Pluton du Lac Brisson, les occurrences d'hydrogène documentées à ce jour sont limitées à des inclusions fluides, mais de l'hydrogène gazeux libre est documenté dans d'autres granites peralcalins, notamment dans le cas du massif de Khibiny où l'hydrogène est également présent dans des réseaux de fractures naturelles (jusqu'à 16,7% H₂, Zgonnik, 2020).

Outre l'altération de l'arfvedsonite, d'autres roches riches en fer peuvent être également présentes localement, comme c'est le cas pour la Syénite de Juillet, qui comprend des enclaves de formations de fer et de métavolcanites mafiques.

6. CLASSEMENT DES SECTEURS D'INTÉRÊT

La notation des différents secteurs d'intérêt pour l'hydrogène naturel au Québec tient compte de quatre critères fondamentaux auxquels sont attribuées des pondérations différentes (**Tableau 3**).

Tableau 3. Classification retenue pour noter les attributs des différents secteurs d'intérêt pour l'hydrogène naturel au Québec.

Critère	Valeur	Pondération
Valeur des indices géologiques de la roche source potentielle		
Indices significatifs	3	4
Indices raisonnables	2	
Indices anecdotiques	1	
Existence d'analogues dans le monde pour la roche source identifiée		
Très bien documenté et/ou Volumes importants	3	3
Moyennement documenté et/ou Volumes moyens	2	
Peu documenté ou Volumes marginaux	1	
Meilleur type de réservoir envisageable dans le secteur d'intérêt		
Conventionnel de type gazier bien compris	3	2
Conventionnel de type gazier peu documenté	2	
Roche source in situ	1	
Proximité des utilisateurs finaux		
Utilisateurs nombreux, dans la même région	3	1
Utilisateurs peu nombreux, dans la même région	2	
Région éloignée	1	

La valeur des indices géologiques et des attributs de la roche source potentielle reçoit une pondération de 4, supérieure à celles des autres catégories. Ce critère reflète la qualité des indicateurs géologiques documentés dans un secteur donné, qui laissent penser que de l'hydrogène peut être produit, ou avoir été produit, par la roche source de ce secteur.

L'existence d'analogues connus ailleurs dans le monde pour la roche source concernée reçoit une pondération de 3. Ce critère a été introduit pour nuancer le poids de la note attribuée aux indices géologiques locaux. L'objectif est d'éviter de sous-évaluer un secteur (effet de « faux négatif ») si celui-ci ne dispose que de peu de données géologiques. Une pondération inférieure à celle de la première catégorie permet de préserver la prépondérance des indices géologiques documentés directement.

La nature du meilleur type de réservoir envisageable dans le secteur d'intérêt reçoit une pondération de 2. Si des travaux futurs permettent de confirmer la présence d'hydrogène naturel dans l'un des secteurs d'intérêt, la forme que pourrait y prendre une possible accumulation d'hydrogène influencera la décision de pousser plus avant les travaux d'exploration. Dans cette optique, ce critère reflète le contexte géologique et les enjeux technologiques associés à la recherche et à l'exploitation d'une possible accumulation d'hydrogène naturel.

La proximité du secteur d'intérêt avec des utilisateurs finaux reçoit une pondération de 1. Ce critère est indépendant des attributs géologiques du secteur et vise à renseigner sur le potentiel de développement de la ressource advenant une découverte. Une pondération inférieure à celle des autres critères a été appliquée afin de ne pas défavoriser excessivement un secteur autrement bien noté, considérant qu'une découverte en milieu éloigné peut en retour attirer de nouveaux utilisateurs et conduire au développement de nouvelles infrastructures.

La notation pondérée pour un secteur donné peut avoir une note qui varie de 10 à 30 en valeur absolue, soit de 33% à 100%. La possibilité d'obtenir une valeur nulle n'est pas introduite dans ce système de notation car l'exercice porte sur des secteurs d'intérêts qui ont déjà fait l'objet d'une sélection préalable pour leur potentiel en roches sources d'hydrogène. À l'inverse, le score maximal ne signifie pas qu'il y a 100% de chances que de l'hydrogène soit produit dans un secteur donné, car la notation est relative aux autres secteurs : ainsi un réservoir d'hydrogène qui serait découvert dans un secteur donné ne serait pas noté sur cette échelle et serait classé hors-catégorie. Par ailleurs, il n'est pas possible de quantifier objectivement les critères considérés faute de disposer d'indicateurs directs de la présence d'hydrogène naturel, comme par exemple des mesures de gaz dans le sol. Une courte explication est donc proposée à côté de chacun des critères pour justifier la notation. Les différents secteurs d'intérêt dans le Bouclier canadien sont localisés avec leur notation à la **Figure 47**. Le classement général des différents secteurs d'intérêt est présenté par région géographique au **Tableau 4** et par score au **Tableau 5**. Le détail de la notation pour chaque secteur est présenté au **Tableau 6**.

Le classement des secteurs d'intérêt fait ressortir deux secteurs très bien notés : les mines d'or des zones de faille de l'Abitibi (87%) et les bassins de Mistassini et d'Otish (87%). Le détail de la notation pour ces trois secteurs montre que les notes obtenues sont identiques pour les critères de la géologie et des analogues : à toutes fins pratiques, ces deux secteurs peuvent être considérés comme étant d'intérêt égal (et élevé) en ce qui a trait à la qualité des sources possibles d'hydrogène, la distinction entre les secteurs se faisant seulement au niveau des réservoirs d'hydrogène potentiels ou de la proximité avec des utilisateurs finaux.

Un second groupe de secteurs d'intérêt correspond à des notes moyennes entre 57 et 70% : les mines d'or en dehors de la ceinture de roches vertes d'Abitibi, un vaste bassin sédimentaire, le champ de kimberlites de Témiscamingue et le Pluton du Lac Brisson. Enfin, un troisième groupe de secteurs de sources potentielles d'hydrogène regroupe les secteurs ayant obtenu les plus basses notes, entre 40 et 47% (pour un minimum possible de 33%). Une faible note pour les critères de la géologie et des analogues est toujours à l'origine de cette position dans le classement.

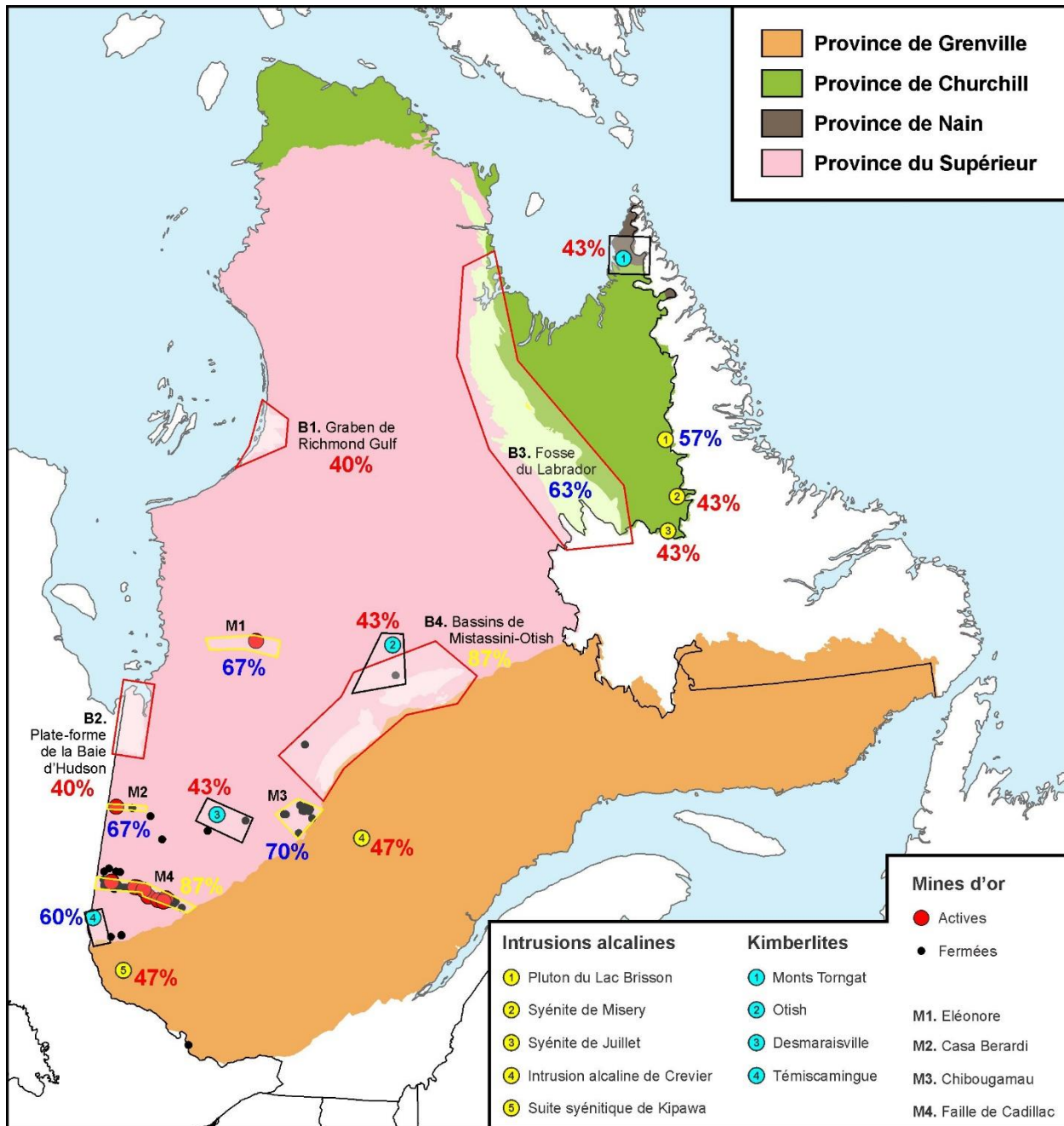


Figure 47. Carte de localisation et notation des secteurs de sources potentielles d'hydrogène dans le Bouclier canadien du Québec.

Tableau 4. Sommaire par région géographique du classement des différents secteurs d'intérêt pour les roches sources d'hydrogène naturel dans le Bouclier canadien.

Région	Secteur d'intérêt pour les roches sources d'hydrogène	Note (%)
Supérieur	B1 et B2 Bassins Hudson et Richmond Gulf	40
	B4 Bassins Mistassini/Otish	87
	K2, K3 Kimberlites Otish/Desmaraisville	43
	K4 Kimberlites Témiscamingue	60
	M1 et M2 Mines Éléonore et Casa Berardi	67
	M3 Chibougamau	70
	M4 Mines des zones de faille de l'Abitibi	87
Churchill	B3 Fosse du Labrador	63
	I1 Pluton du Lac Brisson	57
	I2 et I3 Syénites Misery/Juillet	43
	K1 Kimberlites des Monts Torngat	43
Grenville	I4 et I5 Intrusions de Crevier et Kipawa	47

Tableau 5. Sommaire par score du classement des différents secteurs d'intérêt pour les roches sources d'hydrogène naturel dans le Bouclier canadien.

Secteur d'intérêt pour les roches sources d'hydrogène	Note (%)
M4 Mines des zones de faille de l'Abitibi	87
B4 Bassins Mistassini/Otish	87
M3 Chibougamau	70
M1 et M2 Mines Éléonore et Casa Berardi	67
B3 Fosse du Labrador	63
K4 Kimberlites Témiscamingue	60
I1 Pluton du Lac Brisson	57
I4 et I5 Intrusions de Crevier et Kipawa	47
K1, K2, K3 Kimberlites Torngat/Otish/Desmaraisville	43
I2 et I3 Syénites Misery/Juillet	43
B1 et B2 Bassins Hudson et Richmond Gulf	40

Tableau 6. Détail de la notation des différents secteurs d'intérêt pour les roches sources d'hydrogène naturel dans le Bouclier canadien.

Secteur	Classement	Catégorie	Note	Justification
B1	12/30 (40 %)	Géologie (x4)	1	Inféré d'après la géologie régionale
Graben de Richmond Gulf		Analogues (x3)	1	Sources mantelliques ou fractures crustales
B2		Réservoir (x2)	2	Couverture sédimentaire peu diversifiée et peu documentée
		Éloignement (x1)	1	Jamésie et Nunavik
B3	19/30 (63 %)	Géologie (x4)	2	Formations de fer
Fosse du Labrador		Analogues (x3)	2	Production d'H ₂ actuelle documentée dans cet environnement
		Réservoir (x2)	2	Possibilité de pièges stratigraphiques sédimentaires, mais peu documentés
		Éloignement (x1)	1	Nunavik
B4	26/30 (87 %)	Géologie (x4)	3	Formations de fer, indices d'uranium/or et kimberlites à proximité
Bassins de Mistassini et d'Otish		Analogues (x3)	3	Production d'H ₂ actuelle documentée dans plusieurs environnements
		Réservoir (x2)	2	Couverture sédimentaire peu diversifiée et peu documentée
		Éloignement (x1)	1	Très peu d'infrastructures, faible densité de population
I1	17/30 (57 %)	Géologie (x4)	2	Présence d'H ₂ identifiée à l'intérieur d'inclusions fluides dans la roche
Pluton du Lac Brisson		Analogues (x3)	2	Intrusions alcalines
		Réservoir (x2)	1	Roche source in situ
		Éloignement (x1)	1	Nunavik
I2	13/30 (43 %)	Géologie (x4)	1	Inféré d'après la géologie régionale
Syénite de Misery		Analogues (x3)	2	Intrusions alcalines
I3		Réservoir (x2)	1	Roche source in situ
		Éloignement (x1)	1	Nunavik
I4	14/30 (47 %)	Géologie (x4)	1	Inféré d'après la géologie régionale
Intrusion alcaline de Crevier		Analogues (x3)	2	Intrusions alcalines
I5		Réservoir (x2)	1	Roche source in situ
		Éloignement (x1)	2	Bassin de population faible/moyen, peu d'industries (Laurentides)

Secteur	Classement	Catégorie	Note	Justification
K1 Monts Torngat K2 Otish K3 Desmaraisville	13/30 (43 %)	Géologie (x4) Analogues (x3) Réservoir (x2) Éloignement (x1)	1 2 1 1	Inféré d'après la géologie régionale Kimberlites Roche source in situ Région éloignée
K4 Témiscamingue	18/30 (60 %)	Géologie (x4) Analogues (x3) Réservoir (x2) Éloignement (x1)	2 2 1 2	Failles crustales; présence de serpentinisation; mines d'or à proximité Kimberlites Roche source in situ Bassin de population faible/moyen, peu d'industries
M1 Éléonore M2 Casa Berardi	20/30 (67 %)	Géologie (x4) Analogues (x3) Réservoir (x2) Éloignement (x1)	2 3 1 1	Inféré d'après la géologie régionale; présence de cercles forestiers Mines d'or avec présence de H ₂ Roche source in situ Région éloignée
M3 Chibougamau	21/30 (70 %)	Géologie (x4) Analogues (x3) Réservoir (x2) Éloignement (x1)	2 3 1 2	Plusieurs gisements regroupés Mines d'or avec présence de H ₂ Roche source in situ Bassin de population moyen, peu d'industries
M4 Mines des zones de faille de l'Abitibi	26/30 (87 %)	Géologie (x4) Analogues (x3) Réservoir (x2) Éloignement (x1)	3 3 1 3	Présence de CH ₄ dans l'eau de deux mines Mines d'or avec présence de H ₂ Roche source in situ Beaucoup d'infrastructures, bonne densité de population

7. CONCLUSIONS

La présence de roches sources potentielles d'hydrogène a été évaluée pour la région du Bouclier canadien sur la base des connaissances actuelles sur les sources d'hydrogène naturel dans le monde.

Ainsi, dix-sept secteurs d'intérêt ont été identifiés dans le Bouclier canadien, et peuvent être regroupés en quatre catégories, soit : 1) les bassins sédimentaires, 2) les mines d'or, 3) les kimberlites, 4) les intrusions alcalines.

L'évaluation des données publiques issues des travaux de cartographie géologique a mis en évidence la présence d'hydrogène en inclusions fluides dans certains secteurs, mais également sous forme dissoute dans des analyses chimiques d'eau de mines.

Enfin, un classement relatif des secteurs d'intérêt a été élaboré, qui fait ressortir deux secteurs en particulier : 1) les mines d'or des zones de faille de l'Abitibi, ainsi que 2) des bassins sédimentaires de Mistassini et d'Otish. Ces secteurs méritent donc de retenir l'attention en priorité.

Ce travail repose sur des données publiques qui n'ont pas été collectées dans le but de détecter de l'hydrogène naturel et il n'a pas pour objectif de démontrer la présence d'hydrogène dans le sous-sol des secteurs étudiés, ce qui ne sera possible que par la collecte de données sur le terrain.

8. REMERCIEMENTS

Plusieurs collègues ont été consultés dans le cadre de ce travail, que les auteurs tiennent à remercier ici. Nous tenons à souligner particulièrement Abdelali Moukhsil (Ministère des Ressources naturelles et des Forêts) pour sa contribution significative à l'identification des intrusions alcalines.

9. RÉFÉRENCES

- Bélangier, M., 1984. Région du lac Brisson, Territoire du Nouveau-Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec; DP 84-20, 2 cartes annotées.
<https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/DP8420/>
- Benn, K. et Moyen, J.-F., 2008. The Late Archean Abitibi- Opatca terrane, Superior Province: A modified oceanic plateau. Dans: When Did Plate Tectonic Begin on Planet Earth? (Condie, K.C. and Pease, editors). Geological Society of America; Special Paper 440: 173-197.
[https://doi.org/10.1130/2008.2440\(09\)](https://doi.org/10.1130/2008.2440(09))
- Bergeron, A., 1980. Pétrographie et géochimie du complexe igné alcalin de Crevier et de son encaissant métasomatisé. Université du Québec à Chicoutimi; mémoire de maîtrise, 142 p.
<https://constellation.uqac.ca/id/eprint/1824/>
- Blanchet, R. et Dépatie, J., 1971. Les Basses-Terres de la Baie James et leurs possibilités en ressources pétrolières (territoire québécois). SOQUIP, Rapport SOQ-00696, 21 p.
<https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/SOQ00696/>
- Brauneder, K.M., 2012. Geochemistry of forest rings in Northern Ontario: Identification of ring edge processes in peat and soil. Univeristy of Ottawa, Thèse de maîtrise, 71 p.
https://ruor.uottawa.ca/bitstream/10393/23205/1/Brauneder_Kerstin_2012_thesis.pdf
- Brauneder, K., Hamilton, S.M., Hattori, K., 2016. Geochemical processes in the formation of "forest rings": Examples of reduced chimney formation in the absence of mineral deposits. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 16: 85-99.
<https://doi.org/10.1144/geochem2015-360>
- Brummer, J.J., Macfadyen, D.A., Pegg, C.C., 1992a. Discovery of kimberlites in the Kirkland Lake area northern Ontario, Canada, Part I: early surveys and the surficial geology. *Exploration Mining Geology* 1: 339-350.
<https://store.cim.org/en/discovery-of-kimberlites-in-the-kirkland-lake-area-northern-ontario-canada-part-i-early-surveys-and-the-surficial-geology>
- Brummer, J.J., Macfadyen, D.A., Pegg, C.C., 1992b. Discovery of kimberlites in the Kirkland Lake area northern Ontario, Canada, Part II: kimberlite discoveries, sampling, diamond content, ages and emplacement. *Exploration Mining Geology* 1: 351-370.
<https://store.cim.org/en/discovery-of-kimberlites-in-the-kirkland-lake-area-northern-ontario-canada-part-ii-kimberlite-discoveries-sampling-diamond-content-ages-and-emplacment>
- Buchan, K.L. et Ernst, R.E., 2004. Essaims de dykes de diabase et unités apparentées au Canada et dans les régions avoisinantes. Commission géologique du Canada, Carte 2022A, échelle de compilation: 1/5 000 000. <https://publications.gc.ca/pub?id=9.626496&sl=0>
- Cadéron, S., Roy, P., Bandyayera, D., Sharma, K., 2005. Étude métamorphique d'un segment du Front du Grenville. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec; RP 2005-03, 12 p. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/RP200503/>
- Cameron, K.L., Lopez, L., Ortega-Gutiérrez, F., Solari, L.A., Keppie, J., Schulze, C., 2004. U-Pb geochronology and Pb isotopic compositions of leached feldspars: Constraints on the origin and evolution of Grenville rocks from eastern and southern Mexico. Dans: Proterozoic Tectonic Evolution of the Grenville Orogen in North America. Edited by Richard P. Tollo, James McLelland, Louise Corriveau and Mervin J. Bartholomew. Geological Society of America 197: 755-771. <https://doi.org/10.1130/0-8137-1197-5.755>

- Card, K.D., 1990. A review of the Superior Province of the Canadian Shield, a product of Archean accretion. *Precambrian Research* 48: 99-156.
[https://doi.org/10.1016/0301-9268\(90\)90059-Y](https://doi.org/10.1016/0301-9268(90)90059-Y)
- Card, K.D. et Poulsen, K.H., 1998. Geology and mineral deposits of the Superior Province of the Canadian Shield. Dans: *Geology of the Precambrian Superior and Grenville Provinces and Precambrian Fossils in North America* (Lucas, S. and St-Onge, M.R., co-ordinators). Commission géologique du Canada; *Geology of Canada* 7: 15-232.
<https://doi.org/10.4095/210102>
- Card, K.D. et Ciesielski, A., 1986. Subdivisions of the Superior Province of the Canadian Shield. *Geoscience Canada* 13: 5-13.
<https://journals.lib.unb.ca/index.php/GC/article/view/3439/3953>
- Chandler, F.W., 1988. The Early Proterozoic Richmond Gulf Graben, East coast of Hudson Bay, Quebec. Commission géologique du Canada; *Bulletin* 362, 76 p.
<https://doi.org/10.4095/126313>
- Charette, B., Lafrance, I., Vanier, M.-A., Godet, A., 2019. Domaine de Mistinibi-Raude, sud-est de la Province de Churchill, Nunavik, Québec, Canada: synthèse de la géologie. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Québec. BG 2019-07.
<https://gq.mines.gouv.qc.ca/bulletins-geologiques/churchill/mistinibi-raude/>
- Cherns, L. et Wheeley, J.R., 2009. Early Palaeozoic cooling events: Peri-Gondwana and beyond. *Geological Society Special Publication* 325: 257-278. <https://doi.org/10.1144/SP325.13>
- Chown, E.H., 1984. Mineralization controls in the aphebian Formations, Chibougamau, Mistassini and Otish areas. Dans: *Chibougamau - Stratigraphy and Mineralization*, Edited by Jayanta Guha and Edward H. Chown. Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Special Volume 34: 229-243.
- Clark, T., 1994. Géologie et gîtes de l'Orogène du Nouveau-Québec et de son arrière-pays. Dans: *Géologie du Québec* (M. Hocq, coordonnateur). Ministère des Ressources naturelles, Québec; MM 94-01: 47-65. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/MM9401/>
- Clark, T. et Wares, R., 2004. Synthèse lithotectonique et métallogénique de l'Orogène du Nouveau-Québec (Fosse du Labrador). Ministère des Ressources naturelles de la Faune et des Parcs, Québec; MM 2004-01, 182 p.
<https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/MM200401/>
- Corrigan, D., Pehrsson, S., Wodicka, N., De Kemp, E., 2009. The Palaeoproterozoic Trans-Hudson Orogen: a prototype of modern accretionary processes. *Geological Society, London, Special Publications* 327: 457-479. <https://doi.org/10.1144/SP327.19>
- Currie, K.L., 1985. An unusual peralkaline granite near Lac Brisson, Quebec-Labrador. Commission géologique du Canada; *Études* 85-1A: 73-80. <https://doi.org/10.4095/120018>
- Currie, K.L. et van Breemen, O., 1996. The origin of rare minerals in the Kipawa syenite complex, western Quebec. *The Canadian Mineralogist* 34(2): 435-451.
- Daoudene, Y., Tremblay, A., Ruffet, G., Leclerc, F., 2014. Étude structurale et métamorphique de la bordure nord-est de la Ceinture de roches vertes de l'Abitibi, Québec, Canada: Apport de la thermochronologie $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ et implications tectoniques. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Québec; MB 2014-04, 57 p.
<https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/MB201404/>
- David, J., Simard, M., Bandyayera, D., Goutier, J., Hammouche, H., Pilote, P., Leclerc, F., Dion, C., 2012. Datations U-Pb effectuées dans les Provinces du Supérieur et de Churchill en 2010-

2011. Ministère de l'Énergie, des Ressources naturelles et de la Faune, Québec; RP 2012-01, 33 p. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/RP201201/>
- Davidson, A., 1998. An overview of Grenville Province Geology, Canadian Shield; Chapter 3. Dans: Geology of the Precambrian Superior and Grenville Provinces and Precambrian Fossils in North America (S.B. Lucas and M.R. St-Onge, editors.). Commission géologique du Canada 7: 205-270. <https://doi.org/10.4095/210100>
- Digonnet, S., Goulet, N., Bourne, J., Stevenson, R., 1996a. Modèle de mise en place des kimberlites diamantifères dans les Torngats, Nouveau-Québec. Dans: Vers de Nouvelles découvertes, Séminaire d'information sur la recherche géologique, programme et résumés, Ministère des Ressources naturelles, Québec, Séminaire. DV 96-02: 18. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/DV9602/DV9602.pdf>
- Digonnet, S., Goulet, N., Bourne, J., Stevenson, R., 1996b. Petrographical geochemical study and petrogenetic model of kimberlite dykes, Eastern part of Ungava Bay, Quebec. Geological Association of Canada – Mineralogical Association of Canada 21: A-22.
- Digonnet, S., 1997. Étude pétrochimique de kimberlites dans les Monts Torngat, Nouveau-Québec. Université du Québec à Montréal, Mémoire de maîtrise, 80 p.
- DiLabio, R.N.W., 1981. Glacial dispersal of rocks and minerals at the south end of Lac Mistassini, Quebec, with special reference to the icon dispersal train. Commission géologique du Canada, Bulletin No 323, 46 p. <https://doi.org/10.4095/109534>
- Dimroth, E., 1978. Région de la Fosse du Labrador (54°30'-56°30'). Ministère des Richesses naturelles, Québec; RG-193, 396 p. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/RG193/>
- DITEM Explorations Inc., 1997. Rapport Annuel, 1997, 12 p.
- Dumont, R., Fortin, R., Hefford, S., Dostaler, F., 2010, Série des cartes géophysiques, parties des SNRC 13L, 13M, 23-I et 23P, levé géophysique Lac Ramusio, Région de Schefferville: Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, DP2010-01, 6 p. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/DP201001/>
- El Bourki, M. et Moukhsil, A., 2021. Géologie de la région de Dolbeau-Blondelas, Province de Grenville, région du Saguenay-Lac-Saint-Jean, Québec, Canada. MERN; BG 2022-02, 1 plan. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/bulletins-geologiques/dolbeau-blondelas/>
- Evangelatos, J., Butler, K.E., Spray, J.G., 2009. A marine magnetic study of a carbonate-hosted impact structure: Ile Rouleau, Canada. Geophysical Journal International 179: 171-181. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04304.x>
- Faure, S., 2004. Fertilité en diamants et géométrie 3D du Craton nord-américain par tomographie sismique et modèle thermique. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles; Manuscrits bruts, MB 2004-14, 27 p. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/MB200414/>
- Faure, S., 2005. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles; Manuscrits bruts, MB 2005-05, 33 p. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/MB200505/>
- Faure, S., 2010. Perméabilité crustale dans le Moyen-Nord québécois: Guides d'exploration géophysique pour l'or, l'uranium et le diamant. CONSOREM, Projet 2009-10. Ministère des Ressources naturelles et de l'Énergie, Québec. Manuscrits bruts, MB 2014-17, 58 p. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/MB201417/>
- Fontaine, A., 2019. Géologie des minéralisations aurifères de la mine Éléonore, Eeyou Istchee Baie-James, province du Supérieur, Québec, Canada. Institut national de la recherche scientifique, Québec. Thèse de Doctorat, 526 p. <https://espace.inrs.ca/id/eprint/9060/>

- Frarey, M.J. et Duffell, S., 1964. Revised stratigraphic nomenclature for the central part of the Labrador Trough. Commission géologique du Canada; Études 64-25, 13 p.
<https://doi.org/10.4095/123909>
- Fritz, P., Frape, S.K., Miles, M., 1987. Methane in the crystalline rocks of the Canadian Shield. Dans: Fritz, P., Frape, S.K. (Eds.), Saline Water and Gases in Crystalline Rocks, Geological Association of Canada Special Paper 33: 211-223.
<https://gac.ca/product/saline-water-and-gases-in-crystalline-rocks/>
- Fryer, B.J., 1972. Age determinations in the Circum-Ungava Geosyncline and evolution of Precambrian banded iron formations. Canadian Journal of Earth Sciences 9: 652-663.
<https://doi.org/10.1139/e72-055>
- Gehrisch, W., Jenkins, C., Leppin, M., 1979. Report on exploration works with 14 DDH logs, Uranerz Mining and Exploration Ltd.. Ministère des Ressources naturelles, Québec, GM 34787, 82 p. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/GM34787/>
- Genest, S., 1989. Histoire géologique du bassin d'Otish, du Protérozoïque inférieur, Québec. Université de Montréal, Thèse de Doctorat, 394 p.
<https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/TH1415/>
- Giroux, J.-F., Bergeron, Y., Veillette, J.J., 2001. Dynamics and morphology of giant circular patterns of low tree density in black spruce stands in northern Quebec. Canadian Journal of Botany 79: 420-428. <https://doi.org/10.1139/b01-022>
- Groulier, P.-A., Ohnenstetter, D., Andre-Mayer, A.-S., Zeh, A., Solgadi, F., Moukhsil, A., El Basbas, A., 2014. Étude des minéralisations en Nb-Ta de l'intrusion alcaline de Crevier. UMR 7359 Géoressources, AQAT – URSTM, Goethe Universitat, MERN; MB 2014-33, 68 p, 11 plans. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/MB201433/>
- Groulier, P.-A., Turlin, F., André-Mayer, A.-S., Ohnenstetter, D., Crépon, A., Boulvais, P., Poujol, M., Rollion-Bard, C., Zeh, A., Moukhsil, A., Solgadi, F., El Basbas, A., 2020. Silicate-Carbonate Liquid Immiscibility: Insights from the Crevier Alkaline Intrusion (Quebec). Journal of Petrology 61: 1-39. <https://doi.org/10.1093/petrology/egaa033>
- Hamblin, A.P., 2008. Hydrocarbon potential of the Paleozoic succession of Hudson Bay / James Bay: preliminary conceptual synthesis of background data. Commission géologique du Canada, Dossier public 5731, 15 p. <https://doi.org/10.4095/225183>
- Hamilton, S.M., 2005. "Forest rings" and their implications for geochemical exploration of oil, gas and mineral deposits. Association of Applied Geochemists Distinguished Lecturer Series, 63 p. https://www.appliedgeochemists.org/sites/default/files/Hamilton_2_Forest_Rings.pdf
- Hamilton, S.M. et Hattori, K., 2008. Spontaneous potential and redox responses over a forest ring. Geophysics 73: B67-B75. <https://doi.org/10.1190/1.2890287>
- Hamilton, S.M., Burt, A.K., Hattori, K.H., Shirota, J., 2004. The distribution and source of forest ring-related methane in northeastern Ontario. Ontario Geological Survey, Dossier public Report No 6145: 21-26.
<http://www.geologyontario.mndm.gov.on.ca/mndmfiles/pub/data/imaging/OFR6145//OFR6145.pdf>
- Hamilton, S.M., von Gunten, K., Sherwood Lollar, B., DiLoreto, Z.A., Alam, M.S., Snihur, K., Majeed, H., Alessi, D.S., Dittrich, M., Konhauser, K.O., Dell, K.M., 2019. Soil gas compositional changes and electrical field (SP) responses at the edges of the Thorn North forest ring. Dans: Summary of Field Work and Other Activities, 2019, Ontario Geological Survey, Dossier public Report No 6360: 19-1 à 19-9.

- <http://www.geologyontario.mndm.gov.on.ca/mndmfiles/pub/data/imaging/OFR6360//OFR6360.pdf>
- Hammouche, H., Legoux, C., Goutier, J., Dion, C., 2012. Géologie de la région du lac Zéni. Ministère des Ressources naturelles, Québec; RG 2012-02, 35 p., 1 plan.
<https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/RG201202/>
- Heaman, L.M., 1994. 2.45 Ga global mafic magmatism: Earth's oldest superplume? 8th International Conference on Geochronology and Isotope Geology, Program with Abstracts, U.S. Geological Survey, Circular 1107: 132.
- Héroux, Y., Chagnon, A., Diagona, B., Richer-Lafleche, M., Moar, R., 2004. Potentiel minéral du bassin de Mistassini: une réévaluation basée sur des outils empruntés de l'exploration pétrolière. Ministère des Ressources naturelles et de l'Énergie, Québec. Manuscrits bruts, MB 2004-07, 185 p., 1 plan.
<https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/MB200407/>
- Hocq, M., Verpaelst, P., Clark, T., Lamothe, D., Brisebois, D., Brun, J., Martineau, G., 1994. Géologie du Québec. Les publications du Québec, Québec. Ministère des Ressources naturelles; MM 94-01, 166 p. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/MM9401/>
- Hoffman, P.F., 1988. United Plates of America, the birth of a Craton: Early Proterozoic assembly and growth of ProtoLaurentia. Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences 16: 543-603. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.16.050188.002551>
- Hoffman, P.F., 1990. Subdivision of the Churchill Province and extent of the Trans-Hudson Orogen. Dans: The Early Proterozoic Trans-Hudson Orogen of North America: Lithotectonic Correlations and Evolution (J.F. Lewry and M.R. Stauffer, editors). Geological Association of Canada; Special Paper 37: 15-39.
<https://gac.ca/product/the-early-proterozoic-trans-hudson-orogen/>
- Hu, K. et Dietrich, J., 2012. Hydrocarbon reservoir potential in Paleozoic strata in the Hudson Bay Basin, northern Canada. Commission géologique du Canada, Dossier public 7052, 36 p.
<https://doi.org/10.4095/290119>
- James, D.T., Connelly, J.N., Wasteneys, H.A., Kilfoil, G.J., 1996. Paleoproterozoic lithotectonic divisions of the southeastern Churchill Province, western Labrador. Canadian Journal of Earth Sciences 33: 216-230. <https://doi.org/10.1139/e96-019>
- Karlstrom, K.E., Harlan, S.S., Williams, M.L., McLelland, J., Geissman, J.W., Ahall, K.-I., 1999. Refining Rodinia: Geologic evidence for the Australia-Western U.S. connection in the Proterozoic. GSA Today 9: 1-7. <https://10.1130/GSAT-1999-10-01-science>
- Karolytè, R., Warr, O., van Heerden, E., Flude, S., de Lange, F., Webb, S., Ballentine, C.J., Sherwood Lollar, B., 2022. The role of porosity in H₂/He production ratios in fracture fluids from the Witwatersrand Basin, South Africa. Chemical Geology 595: 120788.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.120788>
- Labbé, J.-Y. et Lacoste, P., 2004. Minéralisations en Cu-Ag dans les basaltes protérozoïques de la région du lac Guillaume-Delisle, Nouveau-Québec. Ministère des Ressources naturelles et de l'Énergie, Québec. Études terminales, ET 2004-02, 34 p.
<https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/ET200402/>
- Lafrance, I., Charette, B., Vanier, M.-A., 2018. Sud-est de la Province de Churchill, Nunavik, Québec, Canada: synthèse de la géologie. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Québec. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/bulletins-geologiques/churchill/>
- Lavoie, D., Pinet, N., Dietrich, J., Zhang, S., Hu, K., Asselin, E., Chen, Z., Bertrand, R., Galloway, J., Decker, V., Budkewitsch, P., Armstrong, D., Nicolas, M., Reyes, J., Kohn, B.P.,

- Duchesne, M.J., Brake, V., Keating, P., Craven, J., Roberts, B., 2013. Geological framework, basin evolution, hydrocarbon system data and conceptual hydrocarbon plays for the Hudson Bay and Foxe basins, Canadian Arctic. Commission géologique du Canada, Dossier public No 7363, 210 p. <https://doi.org/10.4095/293119>
- Leclerc, F., Roy, P., Houle, P., Pilote, P., Bédard, J.H., Harris, L.B., McNicoll, V.J., Van Breemen, O., David, J., Goulet, N., 2017. Géologie de la région de Chibougamau. Ministère de l'Énergie et Ressources naturelles du Québec, Québec. Rapports géologiques RG 2015-03, 97 p., 3 plans. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/RG201503/>
- Lewry, J.F. et Collerson, K.D., 1990. The Trans-Hudson Orogen: extent, subdivision, and problems. Dans: The Early Proterozoic Trans-Hudson Orogen of North America: Lithotectonic Correlations and Evolution (J.F. Lewry and M.R. Stauffer, editors). Geological Association of Canada; Special Paper 37: 1-14. <https://gac.ca/product/the-early-proterozoic-trans-hudson-orogen/>
- Li, L., Li, K., Giunta, T., Warr, O., Labidi, J., Sherwood Lollar, B., 2021. N₂ in deep subsurface fracture fluids of the Canadian Shield: Source and possible recycling processes. Chemical Geology 585, no 120571. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120571>
- Longuépée, H. et Popiela, B., 2018. Revue de littérature afin d'évaluer le potentiel diamantifère de la propriété Torngat. Japosat Satellite Mapping; Travaux statutaires, GM 71264, 42 p. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/GM71264/>
- Lorenz, H., Gee, D.G., Larionov, A.N., Majka, J., 2012. The Grenville-Sveconorwegian orogen in the high Arctic. Geological Magazine 149: 875-891. <https://doi.org/10.1017/S0016756811001130>
- Machado, N., Clark, T., David, J., Goulet, N., 1997. U-Pb ages for magmatism and deformation in the New Quebec Orogen. Canadian Journal of Earth Sciences 34: 716-723. <https://doi.org/10.1139/e17-058>
- Majeed, H., 2020. Investigation of Soil Gas Geochemistry at Thorn North Forest Ring. University of Toronto, Thèse de Maîtrise, 59 p. https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/103477/3/Majeed_Hannah_202011_MSc_thesis.pdf
- Malvoisin, B. et Brunet, F., 2022. Barren ground depressions, natural H₂ and orogenic gold deposits: Spatial link and geochemical model. Science of The Total Environment 856, no 158969. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158969>
- Matte, S., Constantin, M., Stevenson, R., 2022. Mineralogical and geochemical characterization of the Kipawa syenite complex, Quebec: implications for rare-earth element deposits. Geological Survey of Canada, Scientific Presentation 129: 36 pages. <https://doi.org/10.4095/329212>
- McMahon, S., Parnell, J., Blamey, N.J.F., 2016. Evidence for seismogenic hydrogen gas, a potential microbial energy source on Earth and Mars. Astrobiology 16: 690-702. <https://doi.org/10.1089/ast.2015.1405>
- Miller, R.R., 1985. Geology of the Strange Lake alkalic complex and the associated Zr-Y-Nb-Be-REE mineralization. Dans: Granite-related mineral deposit; Geology, Petrogenesis and Tectonic setting (R.P. Taylor and D.F. Strong, editors). Canadian Institute of Mining and Metallurgy conference on granite-related mineral deposits: 193-196.
- Miller, R.R., Heaman, L.M., Birkett, T.C., 1993. U-Pb zircon age of the Strange Lake peralkaline complex: implications for Mesoproterozoic peralkaline magmatism in north-central

- Labrador. Precambrian Research 81: 67-82. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(96\)00024-1](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(96)00024-1)
- Monecke, T., Mercier-Langevin, P., Dubé, B., Frieman, B.M., 2017. Chapter 1: Geology of the Abitibi Greenstone Belt. *Dans Archean Base and Precious Metal Deposits, Southern Abitibi Greenstone Belt, Canada*; Society of Economic Geologists 19, 43 p. <https://doi.org/10.5382/Rev.19.01>
- Moorhead, J., Beaumier, M., Lefebvre, D.L., Bernier, L., Martel, D., 1999. Kimberlites, linéaments et rifts crustaux au Québec. Ministère des Ressources naturelles et de l'Énergie, Québec. Manuscrits bruts, MB 99-35, 129 p., 1 plan. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/MB9935/>
- Moorhead, J., Perreault, S., Berclaz, A., Sharma, K., Beaumier, M., Cadieux, A.M., 2000. Kimberlites et diamants dans le nord du Québec. Ministère des Ressources naturelles et de l'Énergie, Québec. Documents promotionnels, PRO 2000-05, 10 p. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/PRO200005/>
- Moukhsil, A. et Solgadi, F., 2018. Géologie, potentiel minéral et cadre géodynamique des roches de la région du réservoir Daniel-Johnson (Manicouagan) partie centrale de la Province de Grenville. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Québec; MM 2017-01, 307 p., 1 plan. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/MM201701/>
- Moukhsil, A. et El Bourki, M., 2021. Géologie de la région de Girardville, Province de Grenville, région du Saguenay – Lac-Saint-Jean, Québec, Canada. MERN; BG 2021-02, 2 plans. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/bulletins-geologiques/girardville/>
- Nassif, G.J., 1993. The Strange Lake peralkaline Complex, Québec-Labrador: the hypersolvus-subsolvus granite transition and feldspar mineralogy. Université McGill, Mémoire de Maîtrise, 104 p. <https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/7h149q66x>
- Petrella, L., 2011. Caractérisation lithologique et pétrographique de l'intrusion syénitique de Misery (Québec). Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec; MB 2011-01, 34 p. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/MB201101/>
- Petrella, L., 2012. The nature and origin of REE mineralization in the Misery syenitic Intrusion, northern Quebec, Canada. Université McGill; mémoire de maîtrise, 130 p. <https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/cf95jf701>
- Petrella, L., Williams-Jones, A.E., Goutier, J., Walsh, J., 2014. The nature and origin of the rare earth element mineralisation in the Misery syenitic Intrusion, northern Quebec, Canada. Society of Economic Geologists 109: 1643-1666. <https://doi.org/10.2113/econgeo.109.6.1643>
- Pillet, D., 1985. Le granite peralcalin du lac Brisson, Territoire du Nouveau-Québec: résultats préliminaires. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec; MB 85-37, 52 p., 1 plan. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/MB8537/>
- Pillet, D., Bonhomme, M.G., Duthou, J.L., Chenevoy, M., 1989. Chronologie Rb/Sr et K/Ar du granite peralcalin du lac Brisson, Labrador central, Nouveau-Québec. Canadian Journal of Earth Sciences 26(2): 328–332. <https://doi.org/10.1139/e89-027>
- Pilote, P., 1989. Géologie de la région de Casa-Berardi, Dieppe, Collet et Laberge. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec; MB 89-43, 20 p., 7 plans. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/MB8943/>
- Pilote, P., Guha, J., Daigneault, R., Robert, F., Golightly, J.P., 1990. Contexte structural et minéralisations aurifères des gîtes Casa-Berardi, Abitibi, Québec. Canadian Journal of Earth Sciences 27(12): 1672-1685. <https://doi.org/10.1139/e90-175>

- Remick, J.H., Gillain, P.-R., Durden, C.J., 1963. Géologie de la baie de Rupert - rivière Missisicabi, territoires d'Abitibi et de Mistassini. Ministère des Ressources naturelles, Québec. Rapport Préliminaire RP 498, 27 p.
<https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/RP498/>
- Rivers, T. et Corrigan, D., 2000. Convergent margin on southeastern Laurentia during the Mesoproterozoic: tectonic implications. *Canadian Journal of Earth Sciences* 37: 359-383.
<https://doi.org/10.1139/e99-067>
- Rivers, T., Culshaw, N., Hynes, A., Indares, A., Jamieson, R., Martignole, J., 2012. The Grenville orogen – A post-LITHOPROBE perspective. Chapter 3. Dans: *Tectonic Styles in Canada: The LITHOPROBE Perspective*. Edited by J.A. Percival, F.A. Cook and R.M. Clowes. Geological Association of Canada; Special Paper 49: 97-236.
<https://gac.ca/product/tectonic-styles-in-canada/>
- Rohon, M.-L., Vialette, Y., Clark, T., Roger, G., Ohnenstetter, D., Vidal, Ph., 1993. Apehbian mafic-ultramafic magmatism in the Labrador Trough (New Quebec): its age and the nature of its mantle source. *Canadian Journal of Earth Sciences* 30: 1582-1593.
<https://doi.org/10.1139/e93-136>
- Sader, J.A., Leybourne, M.I., McClenaghan, M.B., Hamilton, S.M., 2007. Low-temperature serpentinization processes and kimberlite groundwater signatures in the Kirkland Lake and Lake Timiskiming kimberlite fields, Ontario, Canada: implications for diamond exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 7: 3-21.
<https://doi.org/10.1144/1467-7873/06-900>
- Salvi, S. et Williams-Jones, A.E., 1997. Fischer-Tropsch synthesis of hydrocarbons during sub-solidus alteration of the Strange Lake peralkaline granite, Quebec/Labrador, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61: 83-99. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(96\)00313-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(96)00313-4)
- Sanford, B.V. et Norris, A.W., 1975. Devonian stratigraphy of the Hudson Platform. Commission géologique du Canada, Mémoire 379, 248 p. <https://doi.org/10.4095/127031>
- Saucier, G., Noreau, C., Casgrain, P., Côté, P., Laroche, E., Bilodeau, M., Hayden, A., Poirier, E., Garon, M., Bertrand, V., Kissiova, M., Mailloux, M., Rougier, M., Camus, Y., Gagnon, G., 2013. Feasibility study for the Kipawa project, Temiscamingue area, Québec, Canada. NI 43-101 technical report, 429 p.
- Séguin, J.M., St-Cyr, R.D., Poisson, P., 2003. Graben du lac Guillaume-Delisle (Nunavik, projet Umiujaq 2003). Ministère des Ressources naturelles et de l'Énergie, Québec. Document des compagnies d'exploration minière, GM 61360, 83 p., 2 plans.
<https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/GM61360/>
- Séjourné, S., Comeau, F.-A., Malo, M., 2023. Étude sur l'évaluation du potentiel en hydrogène naturel au Québec. Volet 1 - État des connaissances scientifiques actuelles sur les sources et les occurrences d'hydrogène naturel pertinentes pour le contexte géologique du Québec. Préparé pour le Ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie. Institut national de recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement, Québec. Rapport de recherche R2181, 84 p. <https://espace.inrs.ca/13568/>
- Sherwood, B., Fritz, P., Frappe, S.K., Macko, S.A., Weise, S.M., Welhan, J.A., 1988. Methane occurrences in the Canadian Shield. *Chemical Geology* 71: 223-236.
[https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90117-9](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90117-9)

- Sherwood Lollar, B., Frapé, S.K., Fritz, P., Macko, S.A., Welhan, J.A., Blomqvist, R., Lahermo, P.W., 1993. Evidence for bacterially generated hydrocarbon gas in Canadian shield and fennoscandian shield rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 57: 5073-5085.
[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90609-Z](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90609-Z)
- Sherwood Lollar, B., Lacrampe-Couloume, G., Slater, G.F., Ward, J., Moser, D.P., Gihring, T.M., Lin, L.-H., Onstott, T.C., 2006. Unravelling abiogenic and biogenic sources of methane in the Earth's deep subsurface. *Chemical Geology* 226: 328-339.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.09.027>
- Sherwood Lollar, B., Voglesonger, K., Lin, L.-H., Lacrampe-Couloume, G., Telling, J., Abrajano, T.A., Onstott, T.C., Pratt, L.M., 2007. Hydrogeologic controls on episodic H₂ release from Precambrian fractured rocks - Energy for deep subsurface life on Earth and Mars. *Astrobiology* 7: 971-986. <https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/ast.2006.0096>
- Taner, M.F., 1992. Reconnaissance géologique de la région du lac Juillet, Territoire du Nouveau-Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec; MB 91-19, 132 p., 7 cartes.
<https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/MB9119/>
- Taylor, F.C., 1979. Reconnaissance geology of a part of the Precambrian Shield, Northeastern Quebec, Northern Labrador and Northwest Territories. Commission géologique du Canada; Mémoire 393, 99 p. <https://doi.org/10.4095/124930>
- Telling, J., Voglesonger, K., Sutcliffe, C.N., Lacrampe-Couloume, G., Edwards, E., Sherwood Lollar, B., 2018. Bioenergetic constraints on microbial hydrogen utilization in Precambrian deep crustal fracture fluids. *Geomicrobiology Journal* 35: 108-119.
<https://doi.org/10.1080/01490451.2017.1333176>
- Truche, L., Bourdelle, F., Salvi, S., Lefeuvre, N., Zug, A., Lloret, E., 2021. Hydrogen generation during hydrothermal alteration of peralkaline granite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 308: 42-59. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.05.048>
- van Breemen, O. et Currie, K.L., 2004. Geology and U–Pb geochronology of the Kipawa Syenite Complex — a thrust related alkaline pluton — and adjacent rocks in the Grenville Province of western Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences* 41: 431-455.
<https://doi.org/10.1139/e04-010>
- Valentino, D.W., Chiarenzelli, J.R., Regan, S.P., 2019. Spatial and temporal links between Shawinigan accretionary orogenesis and massif anorthosite intrusion, southern Grenville province, New York, USA. *Journal of Geodynamics* 129: 80-97.
<https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.04.001>
- Veillette, J.J. et Giroux, J.-F., 1999. The enigmatic rings of the James Bay Lowland: a probable geological origin. Commission géologique du Canada, Dossier public No 3708, 40 p.
<https://doi.org/10.4095/210206>
- Vincent, J.-S., 1989. Quaternary Geology of the southeastern Canadian Shield. Dans: Fulton, R.J. (éd.), *Quaternary Geology of Canada and Greenland*, Chapter 3: Quaternary Geology of the Canadian Shield. Commission géologique du Canada, Geology of Canada Series No. 1: 249-275. <https://doi.org/10.4095/127971>
- von Gunten, K., Hamilton, S.M., Zhong, C., Nesbø, C., Li, J., Muehlenbachs, K., Konhauser, K.O., Alessi, D.S., 2018. Electron donor-driven bacterial and archaeal community patterns along forest ring edges in Ontario, Canada. *Applied Microbiology International* 10: 663-672.
<https://doi.org/10.1111/1758-2229.12678>
- Watson, R.D., 1967. Kimberlites of Eastern North America. Dans: *Ultramafic and related rocks*. Edited by P.J. Wylie. John Wiley and Sons, New York 9: 312-323.

- Wardle, R.J., James, D.T., Scott, D.J., Hall, J., 2002. The southeastern Churchill Province: synthesis of a Paleoproterozoic transpressional orogen. *Canadian Journal of Earth Science* 39: 639-663. <https://doi.org/10.1139/e02-004>
- Warr, O., Giunta, T., Ballentine, C.J., Sherwood Lollar, B., 2019. Mechanisms and rates of 4He , 40Ar , and H_2 production and accumulation in fracture fluids in Precambrian Shield environments. *Chemical Geology* 530, no. 119322. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.119322>
- Wavrant, L.-M., Sappin, A.-A., Beland, C.M.J., Chartier-Montreuil, W., Fleury, F., Zhao, P., Beaudoin, G., Barnes, S.-J., Cheng, L.Z., Chouteau, M., Constantin, M., Dare, S., Dupuis, C., Stevenson, R., et Williams-Jones, A.E., 2017. Projet terres rares au Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Québec. Rapport MB 2017-17, 123 p. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/MB201717/>
- Windley, B.F., 1986. Comparative tectonics of the western Grenville and the western Himalaya. Dans: *The Grenville Province*, (J.M. Moore, A. Davidson and A.J. Baer, editors), St. John's, NF, Canada; GAC Special Paper 31: 341-348.
- Zajac, I.S., Miller, R. R., Birkett, T.C., Nantel, S., 1984. Le gîte de Zr, Y, Nb et Be du complexe alcalin de Strange Lake, Québec-Labrador. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec; DV 84-18: 127-142. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/DV8418/>
- Zgonnik, V., 2020. The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. *Earth-Science Reviews* 203, no 103140. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103140>