

---

# **TYPOLOGIE DES MINÉRALISATIONS AURIFÈRES ASSOCIÉES À LA FAILLE DE CADILLAC**

---

**PROJETS 2011-01 ET 2012-01**

Par : Silvain Rafini  
Mai 2014



**CONSOREM**

Consortium de recherche  
en exploration minérale

---

## AVERTISSEMENT

---

Ce document présente certains résultats des travaux de recherche du CONSOREM (Consortium de Recherche en Exploration minérale) rendus publics pour le bénéfice de l'ensemble de la communauté géologique, ceci après la période de confidentialité prévue aux règlements généraux du CONSOREM.

Bien que ce document ait subi un processus d'évaluation interne, des erreurs ou omissions peuvent s'y retrouver et seul CONSOREM en assume la responsabilité.

Le contenu du document demeure la propriété de son auteur et du CONSOREM et peut être reproduit en totalité ou en partie à des fins non-commerciales en citant la référence suivante :

*Rafini, S., 2014. Typologie des minéralisations aurifères associées à la Faille de Cadillac. Rapport du projet CONSOREM 2011-01 et 2012-01, 45 p.*

Toutefois, la reproduction multiple de ce document, en tout ou en partie, pour diffusion à des fins commerciales est interdite, sauf avec la permission écrite de CONSOREM.

## CONSOREM

Université du Québec à Chicoutimi  
555, boulevard de l'Université  
Chicoutimi, QC, G7H 2B1

Tél. : (418) 545-5011 poste 5634

Courriel : [consorem@uqac.ca](mailto:consorem@uqac.ca)

Site Web : [www.consorem.ca](http://www.consorem.ca)

---

## RÉSUMÉ

---

Avec plus de 4 200 t Au, 37 gîtes aurifères de rang mondial (> 10 t Au) et 4 gisements géants (>100 t Au), la Faille de Cadillac (FC) s'impose comme l'un des plus importants métallotectes aurifères au monde. Cette fertilité s'accompagne d'une grande variété de styles gîtologiques, reliée à l'activité prolongée de cette structure et son profond enracinement crustal permettant la convergence de moteurs hydrothermaux de natures variées (magmatique, métamorphique, météorique). Bien que notoire, cette hétérogénéité de styles gîtologiques était jusqu'ici très mal contrainte et très peu documentée, en l'absence d'une étude synthétique rassemblant la masse colossale d'observations effectuées ponctuellement.

C'est précisément le mandat que se sont fixés les deux projets présentés ici. Il s'agit de réaliser une synthèse des caractéristiques des minéralisations aurifères situées le long de la FC, à partir d'une compilation exhaustive des nombreuses descriptions de gîtes produites par quatre décennies d'exploration minérale intensive sur ce métallotecte. Les documents consultés sont des rapports ministériels ontariens et québécois, des rapports statutaires (rapport technique 43-101, GM, etc.), rapports internes de compagnies, rapports de consultants, articles scientifiques, guides d'excursions, et des documents universitaires. Une bibliothèque de 230 documents, consultés pour ce projet, en constitue un des livrables. Par ailleurs, des fiches textuelles synthétisant les caractéristiques de chaque gîte ont été réalisées. Ces fiches offrent un niveau de détail variable conditionné par la qualité et la quantité d'information disponible, toutefois elles permettent pour la plupart des gîtes d'accéder rapidement à une vision claire et précise des modalités des minéralisations aurifères. Un tableau interrogeable contenant des informations codifiées, et plus restreintes, a été réalisé à partir de ces fiches.

Le projet s'est réparti en deux phases : l'année 2011-2012 a été consacrée aux camps de Val-d'Or, Malartic et Cadillac, au sein desquels 49 gîtes ont été décrits. La deuxième phase (2012-2013) s'est davantage concentrée sur la portion occidentale de la FC, avec notamment les camps de Rouyn-Noranda, Kerr Addison, Kirkland Lake (55 gîtes au total). Au total, les descriptions de 104 gîtes ont été compilées.

Il a été établi que les gîtes aurifères de la FC sont distribués en 8 champs gîtologiques. La nature des caractéristiques discriminantes de ces champs est variable; il peut s'agir de l'assemblage ou de l'abondance des sulfures (p.ex., sulfures très faibles avec PY dominante dans le champ des failles Marbanite-Norbénite vs sulfures abondants avec 30% PY-CPY dans le champ de Bourlamaque), de l'organisation de la minéralisation (p.ex., veines massives rubanées du champ de Bourlamaque vs *stockwork* du champ de Malartic), des altérations caractéristiques (p.ex., intense albitisation proximale très caractéristique du champ « Dykes d'albitite » vs carbonate-fuschite), etc.

Le segment « Ruisseau Davidson – Flexure » est clairement marqué par la présence systématique de pyrrhotite et, de manière plus hétérogène, de biotite, traduisant des conditions de plus haute température que sur le reste de la FC. Les champs « Sulfures disséminés », « Stockwork carbonates-fuschite » et « Dykes d'albitite » montrent une claire superposition spatiale. Ils se distribuent dans différents gîtes, à l'exception de quatre gîtes où l'on retrouve plusieurs styles dans différentes « zones ». C'est le cas notamment du gîte Kerr Addison où ces trois styles, décrits dans les années 90 comme *Flow Ore*, *Carbonate Ore* et *albitite Dyke Ore*, sont interprétés comme étant contemporains, traduisant possiblement différentes expressions d'un même événement hydrothermal contrôlés par la perméabilité et la géochimie des roches encaissantes.

Cette étude permet de mettre en perspective les modalités aurifères de la Faille de Cadillac. Il apparaît que le champ de Malartic se distingue très nettement des styles voisins, avec un très fort gain métasomatique en potassium corroboré par l'observation quasi-systématique de microcline sur le terrain, et un assemblage de sulfures plus polymétallique atypique des minéralisations classiques orogéniques. De plus, cette empreinte efface ou occulte la signature à arsénopyrite observée sur tous les gîtes encaissés directement dans la FC (influence des sédiments clastiques juxtaposés). Cette empreinte hydrothermale est interprétée comme étant associée à un événement aurifère orthomagmatique (série alcaline) postérieur aux minéralisations voisines, lesquelles sont le plus communément encaissées *passivement* dans des intrusions calco-alcalines ante-Au (p.ex. : gîte Norbénite). Enfin, bien que les champs de Kirkland Lake et Malartic présentent des caractéristiques communes (altérations potassiques, encaissant syénitique tardi-tectonique, pyrite-molybdénite, absence d'arsénopyrite), ils ne peuvent constituer un même champ « Syénites tardives » principalement en raison de l'organisation radicalement différente de la minéralisation aurifère traduisant des états de contraintes différents.



---

## TABLE DES MATIERES

---

Avertissement .....	i
RÉSUMÉ .....	ii
Table des Matières .....	iv
Liste des Figures .....	v
Liste des Tableaux .....	vi
1 Introduction .....	1
1.1 Origine du projet .....	1
1.2 Approche adoptée et livrables .....	1
1.3 Mise en contexte de la Faille de Cadillac .....	3
1.3.1 Généralités .....	3
1.3.2 Métallogénie régionale .....	4
1.3.3 Géodynamique .....	6
1.3.4 Formations encaissantes .....	6
1.3.5 Caractéristiques structurales et évolution de la Faille de Cadillac .....	10
2 Caractéristiques spatiales des champs gîtologiques .....	12
2.1 Abondance et paragenèse métallique .....	13
2.2 Organisation de la minéralisation aurifère .....	14
3 Données géochimiques .....	16
4 Champs gîtologiques .....	19
4.1 Le champ « Sulfures disséminés » .....	20
4.2 Le champ « Dykes d'albitite » .....	23
4.3 Le champ « <i>Stockwork</i> tabulaire – carbonates – fuschite » .....	26
4.4 Le champ « Faille Ruisseau Davidson – Flexure Cadillac » .....	29
4.5 Le champ « Bourlamaque » .....	31
4.6 Le champ « Norbénite, Marbénite, Zone K » .....	33
4.7 Le champ « Malartic » .....	35
4.8 Le champ « Kirkland Lake » .....	38
5 Conclusions .....	42
Remerciements .....	43
Références .....	44

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.</b>	Liste des caractéristiques relevées dans les descriptions de gîtes.....	3
<b>Figure 2.</b>	Faille de Cadillac (trait rouge inférieur) et localisation des gîtes aurifères (tous gîtes confondus). L'encart en haut à gauche indique la localisation de la carte dans les limites de la Sous-province d'Abitibi.....	5
<b>Figure 3.</b>	Interpolation du tonnage aurifère surfacique (échelle log) le long de la Faille de Cadillac (excluant les minéralisations d'origine volcanogène).....	5
<b>Figure 4.</b>	Unités stratigraphiques encaissant la Faille de Cadillac; trait pointillé : faille masquée supposée (rejet normal indiqué). Géologie modifiée du Sigéom et de l'OGS.....	8
<b>Figure 5.</b>	Signature en éléments majeurs prédits (méthode des précurseurs modélisés, Projet 2009-01) des intrusions I1, I2, I3 encaissées dans les Formations de Jacola, Dubuisson et dans le secteur de Malartic. Les échantillons de roches alcalines (Nb/Y > 0,7) n'ont pas été considérés. Les données proviennent du Sigéom 2011.....	8
<b>Figure 6.</b>	Assemblages de sulfures répertoriés dans les gîtes aurifères le long de la Faille de Cadillac.....	13
<b>Figure 7.</b>	Abondance de sulfures rapportés dans les descriptions de gîtes aurifères le long de la Faille de Cadillac.....	14
<b>Figure 8.</b>	Organisation de la minéralisation aurifère rapportée dans les descriptions de gîtes le long de la Faille de Cadillac. À l'exception du secteur de la flexure de Cadillac (secteur du gîte Lapa), les veines massives et semi-massives sont injectées dans des couloirs de cisaillement parallèlement au grain mylonitique (ou légèrement oblique).....	15
<b>Figure 9.</b>	Couverture d'échantillons lithogéochimiques de la base de données compilée dans cette étude (portion E). L'encart en bas à gauche permet de situer la figure dans le cadre régional de la FC.....	17
<b>Figure 10.</b>	Interpolation des gains/pertes absolus en K <sub>2</sub> O et Na <sub>2</sub> O calculés par la méthode des bilans de masse avec modélisation des précurseurs (Trépanier, 2009 : projet CONSOREM 2009-01).....	19
<b>Figure 11.</b>	Champs gîtologiques situés le long de la Faille de Cadillac, déterminés par cette étude.....	20
<b>Figure 12.</b>	Gîtes composant le champ « Sulfures disséminés ».....	21
<b>Figure 13.</b>	Sulfures disséminés A) dans la foliation mylonitique (Photo Bruno Lafrance – gîte Cheminis) et B) aux épontes de veinules de quartz (Photo Ispolatov et al., 2005 – gîte Anoki Main Zone).....	21
<b>Figure 14.</b>	A), B) et C) Minerai du champ « dykes d'albitite », Mine Francoeur.....	24
<b>Figure 15.</b>	Alignement ENE des gîtes du champ « Dykes Albitite ». En orange : position hypothétique (en profondeur) de l'intrusion alcaline syn-cinématique produisant les essaims de dykes d'albitite (géologie modifiée de SIGÉOM 2011, voir figure 12 pour référence).....	25
<b>Figure 16.</b>	Champ « Stockwork tabulaire – carbonates – fuschite ».....	26
<b>Figure 17.</b>	Minerai <i>stockwork</i> à carbonates – fuschite. A) et D) gîte Augmitto, B) gîte Kerr Addison, photo Bruno Lafrance, C) et E) gîte Cheminis, photo Bruno Lafrance.....	28
<b>Figure 18.</b>	Champ « Faille Ruisseau Davidson – Flexure Cadillac ».....	30
<b>Figure 19.</b>	Contours du champ « Bourlamaque » (trait noir pointillé) et gîtes. La forme rose correspond à l'intrusion de Bourlamaque. L'encart en bas à gauche permet de situer la figure dans le cadre régional de la FC.....	32
<b>Figure 20.</b>	Contours du champ « Failles Norbénite, Marbénite, Zone K » (trait noir pointillé) et gîtes (en bleu). L'encart en bas à gauche permet de situer la figure dans le cadre régional de la FC.....	34

<b>Figure 21.</b> Contours du champ « Malartic » (trait noir pointillé) et gîtes (en bleu). L’encart en haut à droite permet de situer la figure dans le cadre régional de la FC. ....	36
<b>Figure 22.</b> A) et B) <i>Stockwork</i> de la mine Canadian Malartic. ....	36
<b>Figure 23.</b> A), B), C) et D) Veines des gîtes de Kirkland Lake, tiré d’Ispolatov et al. (2005). ....	39
<b>Figure 24.</b> Détail du champ « Kirkland Lake ». Modifié d’Ispolatov et al. (2008). ....	40
<b>Figure 25.</b> Champs gîtologiques définis dans cette étude, avec résumés de leurs caractéristiques.....	42

---

## LISTE DES TABLEAUX

---

<b>Tableau 1.</b> Tonnage des principaux camps miniers le long de la Faille de Cadillac.....	4
<b>Tableau 2.</b> Caractéristiques discriminantes du champ « Sulfures disséminés ». ....	20
<b>Tableau 3.</b> Caractéristiques des gîtes du champ « Sulfures disséminés ».....	22
<b>Tableau 4.</b> Caractéristiques discriminante du champ « <i>Stockwork</i> tabulaire – carbonates - fuschite ». ....	26
<b>Tableau 5.</b> Caractéristiques des gîtes du champ « <i>Stockwork</i> tabulaire carbonates fuschite». ....	27
<b>Tableau 6.</b> Caractéristiques discriminante du champ « Faille Ruisseau Davidson – Flexure Cadillac ». ....	29
<b>Tableau 7.</b> Caractéristiques discriminante du champ « Bourlamaque ». ....	31
<b>Tableau 8.</b> Caractéristiques discriminantes du champ « Norbénite, Marbénite, Zone K ». ....	33
<b>Tableau 9.</b> Caractéristiques discriminantes du champ « Malartic ». ....	35
<b>Tableau 10.</b> Caractéristiques discriminantes du champ « Kirkland Lake ». ....	38

---

## 1 INTRODUCTION

---

### 1.1 Origine du projet

Les constats suivants, faits par les entreprises du CONSOREM lors de l'exercice de programmation 2011, sont à la source de ce projet :

1. Besoin de créer un outil pratique de documentation sur les différents types de minéralisations associés à la FC, disponible pour les géologues (volet culture gîtologique);
2. Dans une certaine mesure, cet outil devrait contenir des guides d'exploration sectoriels le long de la FC;
3. Il n'existe pas de synthèse gîtologique exclusivement *descriptive* le long de la FC. Les études synthétiques sont rares et davantage axées sur l'aspect structural (Wilkinson et al., 1999; Daigneault et al., 2002) ou sur l'introduction d'un modèle métallogénique (p. ex., Robert, 2001). L'état des connaissances actuel est propice à un exercice de synthèse axé sur la comparaison des caractéristiques des minéralisations aurifères d'un bout à l'autre de la FC;
4. À l'exception des travaux de Robert et al. (1995) qui révèlent un champ de veines aurifères à tourmaline bien circonscrit dans le camp de Val-d'Or, l'existence de champs gîtologiques dans – et entre – les différents camps miniers de la FC n'est pas documentée;
5. Le cas échéant, ces champs gîtologiques constituent des guides d'exploration de premier ordre.

Le CONSOREM a donc été mandaté pour réaliser cette synthèse des minéralisations aurifères associées à la FC. Ce travail a fait l'objet de deux projets, 2011-01 et 2012-01, respectivement attachés à compiler les descriptions des gîtes dans les portions orientale (à l'est de Cadillac) et occidentale de la faille.

D'un point de vue très concret, la question à laquelle ce projet tente de répondre est la suivante : « Est-il possible d'anticiper les caractéristiques de minéralisations aurifères le long de la FC à partir des caractéristiques des gîtes environnants? »

### 1.2 Approche adoptée et livrables

L'approche adoptée est par essence *descriptive*. Il s'agit ici d'une compilation systématique des caractéristiques des gîtes rapportés par les documents publics, affranchie de toute considération conceptuelle métallogénique, géochimique, structurale... À l'instar des travaux de Robert et al. (1995), l'objectif est de vérifier l'existence de caractéristiques communes retrouvées dans des gîtes voisins, géographiquement regroupés dans des secteurs à circonscrire constituant ce que nous appellerons alors des champs gîtologiques.

Plus de 230 documents ont été consultés. Pour la plupart des publications ministérielles (séries MB, MM, rapports de l'*Ontario Geological Survey*) et des rapports statutaires (GM, rapport technique 43-101), ainsi que des publications scientifiques et des documents universitaires (PFE, maîtrises, doctorats). Cette bibliothèque constitue un des livrables du projet.

Afin de réaliser une compilation efficace et la plus harmonieuse et homogène possible dans les délais impartis relativement courts compte-tenu de l'ampleur de la tâche, un inventaire des caractéristiques à relever dans les descriptions de gîte a été préalablement élaboré (**Figure 1**). Lors de la lecture des documents, le focus a donc été fait sur les différents points de cette liste. Au total, 104 fiches de gîte ont ainsi été réalisées. Il est bien évident que rares sont les gîtes pour lesquels l'information disponible a permis de préciser toutes les caractéristiques de la liste. Un indice a été intégré à cet effet procurant une estimation de la qualité de l'information disponible. Toutefois, ces fiches offrent des informations synthétisées et néanmoins détaillées permettant aux lecteurs de se faire très rapidement une idée précise des caractéristiques des minéralisations aurifères dans tous les gîtes répertoriés le long de la FC. Ces fiches constituent en soi un outil d'exploration significatif, et s'intègrent directement dans le volet « culture gîtologique » du projet.

Il est à noter que l'information relevée dans les descriptions de gîte et rapportée dans les fiches est par nature *qualitative* et, dans une certaine mesure, *indicative*. Ceci est dû au fait que les documents consultés ont été rédigés par une grande variété d'auteurs, et les caractéristiques rapportées se réfèrent à autant, sinon plus, d'observateurs. Le biais d'échantillonnage est ici colossal, en particulier en ce qui concerne les descriptions de paragenèses. Différents géologues vont mettre l'emphase sur différents minéraux jugés intéressants et en ignorer d'autres. Certains minéraux peu abondants vont être ignorés par l'un mais relevés par l'autre, à abondance égale. Quant à l'abondance, elle est décrite au moyen d'adjectifs non-calibrés. C'est pourquoi un effort a été fait pour relever préférentiellement les abondances relatives, parfois de manière un peu intuitive à la compréhension du ton d'un document.

## Nom du gîte (tonnage, teneur)

Références des documents

Qualité documentation : x/5

Résumé :

### Caractéristiques

- |  |  |
|--|--|
| -Encaissant :                          | -Distance Faille Cadillac :                            |
| -Foliation /stratification :           | -Distance faille subsidiaire :                         |
| -Métamorphisme :                       | -Chronologie relative minéralisation / intrusions :    |
| -Disposition minéralisation :          | -Chronologie relative minéralisation / plissement :    |
| -Note texture minéralisation :         | -Chronologie relative minéralisation / métamorphisme : |
| -Intrusions :                          | -Chronologie relative minéralisation / cisaillement :  |
| -Dykes :                               | -Chronologie relative intrusions / plissement :        |
| -Altérations :                         | -Chronologie relative intrusions / métamorphisme :     |
| -Minéraux non-métalliques du minerai : | -Chronologie relative intrusions / cisaillement :      |
| -Minéraux métalliques du minerai :     | -Âge absolu encaissant :                               |
| -Signature métallique :                | -Âge absolu intrusions :                               |
| -Plissement :                          | -Âge absolu minéralisation :                           |
| -Attitude structures porteuses :       | -Remarques, ou autres caractéristiques :               |
| -Nature structures porteuses :         |  |
| -Cinématique :                         |  |

**Figure 1.** Liste des caractéristiques relevées dans les descriptions de gîtes.

Les caractéristiques rapportées dans ces fiches textuelles ont ensuite été sélectionnées et codifiées pour élaborer une table interrogeable, fournie en livraison. Cette table permet de faire des recherches automatisées à l'aide de n'importe quel logiciel tableur.

Enfin, un autre livrable est une affiche géoréférencée multi-couche contenant un résumé succinct des caractéristiques des gîtes, les cartes thématiques et les champs gîtologiques.

## 1.3 Mise en contexte de la Faille de Cadillac

### 1.3.1 Généralités

La Faille de Cadillac (FC), ou Faille de Cadillac – Larder Lake est un couloir de déformation ductile à ductile-cassante traversant le sud de l'Abitibi d'est en ouest sur plus de 250 km. Cette large bande mylonitisée se suit relativement bien sur toute sa longueur à l'exception d'un segment de 35 km le long duquel la couverture sédimentaire protérozoïque du Groupe de Cobalt empêche d'observer en surface la continuité de la structure.

Sur le plan lithologique, il s'agit d'une bande décamétrique à hectométrique composée généralement de schistes métavolcaniques mafiques à ultramafiques (komatiitiques), plus localement de schistes métasédimentaires. Elle est injectée de nombreuses intrusions syn-cinématiques intermédiaires à felsiques, concordantes et déformées, d'affinités calco-alcaline et alcaline. Les roches encaissant la faille sont affectées par des altérations variables en intensité et en nature, conditionnées notamment par la nature des protolithes. On trouve ainsi les associations minérales dominantes suivantes:

- talc-carbonates-chlorite (protolithe volcaniques ultramafique) et
- chlorite-quartz-carbonates ± séricite (protolithe volcanique mafique et intermédiaire).

Ces paragenèses résultent typiquement de la superposition d'une altération hydratée abondante (fluides hydrothermaux riches en CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O) sur des faciès métamorphiques du grade schiste-vert supérieur.

Les schistes constituant le corps de la FC sont généralement affectés par plusieurs fabriques tectoniques successives ductiles (foliations mylonitiques *sensu stricto*) à ductile-cassantes (structures C-S, schistosités, clivages, *shear bands*, *kink bands*, etc.), traduisant le caractère prolongé et polyphasé de cette structure. Une relation typique observée en de nombreux affleurements consiste en une schistosité pénétrative parallèle à la FC recoupée par une deuxième fabrique planaire à angle (25°-40° antihoraire) de type clivage et de plan axial de plis asymétriques « en Z » mésoscopiques à fort plongement. Ce type de relation structurale est rapporté d'une extrémité à l'autre de la FC indépendamment de l'azimut de sa trace.

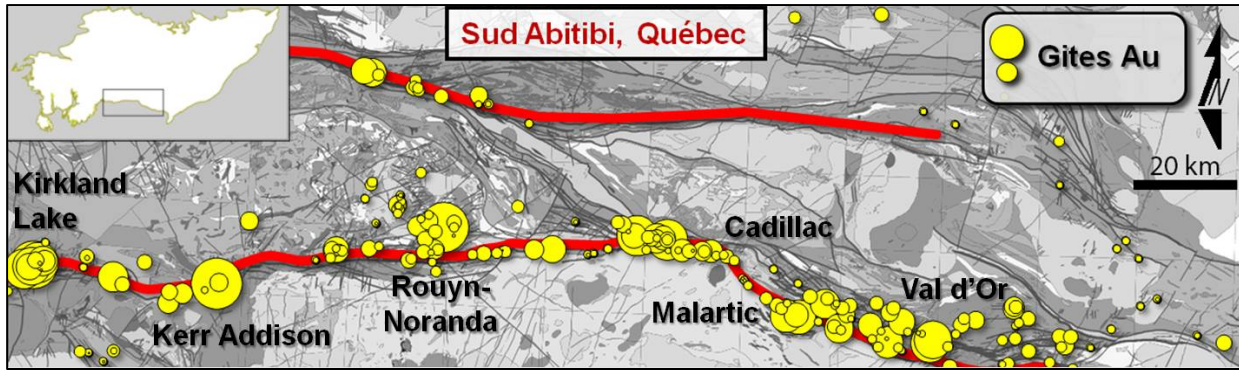
### 1.3.2 Métallogénie régionale

La FC se définit avant tout comme un métallotecte aurifère. Il s'agit en effet d'un alignement de minéralisations aurifères relativement continu (excepté sous la couverture protérozoïque) sur plus de 250 km (**Figure 2**). C'est l'une des structures les plus fertiles au monde, avec plus de 4 200 t Au (entre les gîtes Kirkland Lake et Chimo), et 37 gisements de rang mondial (>10 t Au). Les gîtes sont répartis dans 6 camps miniers historiques (tonnage métal, gîtes non-volcanogènes) :

**Tableau 1.** Tonnage des principaux camps miniers le long de la Faille de Cadillac.

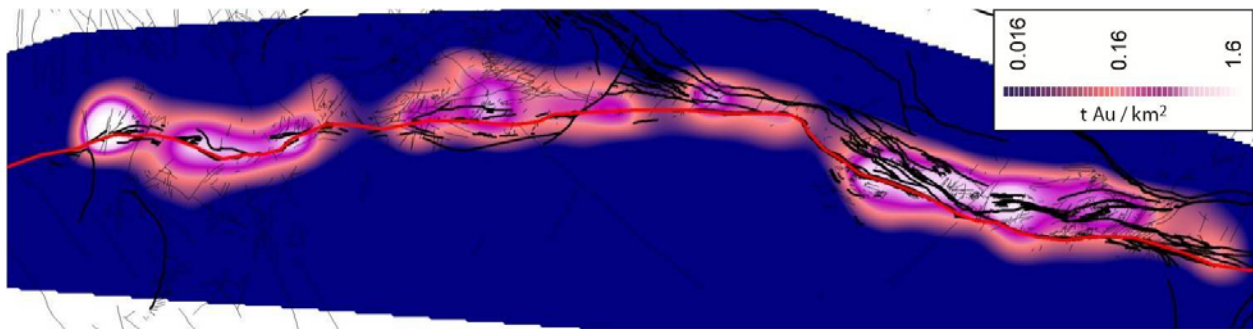
Camp	t Au	Note
Kirkland Lake	748,88	
Kerr Addison	347,42	
Rouyn-Noranda	293,8	excluant camp central, incluant Joanna et Francoeur-Wasamac
Cadillac	55,43	
Malartic	824,2	
Val-d'Or	557,93	





**Figure 2.** Faille de Cadillac (trait rouge inférieur) et localisation des gîtes aurifères (tous gîtes confondus). L'encart en haut à gauche indique la localisation de la carte dans les limites de la Sous-province d'Abitibi.

L'interpolation du tonnage surfacique présentée à la **Figure 3**, permet de visualiser la zone d'influence aurifère de la FC. Celle-ci forme une bande large d'une vingtaine de kilomètres.



**Figure 3.** Interpolation du tonnage aurifère surfacique (échelle log) le long de la Faille de Cadillac (excluant les minéralisations d'origine volcanogène).

La plupart des camps miniers contiennent un ou plusieurs gisements géants (> 100 t Au) qui sont bien documentés. Un rapide coup d'œil à cette documentation permet d'apprécier la grande variété de styles gîtologiques associés à la FC et à mettre en parallèle l'enracinement crustal profond de cette structure confirmé par les profils LITHOPROBE (Calvert et Ludden, 1999). Cette racine profonde, doublée d'une activité tectonique prolongée, est vraisemblablement responsable de l'hydrothermalisme particulièrement intense et diversifié associé à la Faille de Cadillac où convergent plusieurs moteurs hydrothermaux à différents stades de son évolution géodynamique. En particulier, il y a convergence entre des fluides métamorphiques drainés verticalement depuis des réservoirs profonds surpressurisés générés par la déshydratation de roches supracrustales volcanosédimentaires subductées ou enfouies, des fluides hydrothermaux orthomagmatiques associés à des magmas syn-cinématiques injectés à la faveur de cette discontinuité crustale possiblement lors de mouvements chevauchants et/ou décrochants syn- à tardi-tectoniques, et de fluides météoriques mobilisés par convection thermique.



### 1.3.3 Géodynamique

La synthèse géodynamique du Sud-Abitibi réalisée par Daigneault et al. (2002) avance que la Faille de Cadillac est à l'Archéen une limite de terrane conduisant la subduction du bloc S sous le bloc N. Ceci lors des phases précoces de l'orogénie kénoréenne, soit 2695-2685 Ma, au cours desquelles se produisent l'accrétion des arcs et le plissement isoclinal général associé à une schistosité de plan axial régionalement dominante très pénétrative. Les phases compressives tardives (< 2 685 Ma) sont caractérisées par une convergence oblique NO-SE à NNO-SSE générant un régime de déformation régional transpressif dextre et des mouvements décrochants le long de la Faille de Cadillac. Ces derniers sont matérialisés par des plis d'entraînement « en Z » typiquement à fort plongement, un clivage secondaire généralement NE à ENE et des linéations d'étirement localement développées à faible plongement. L'observation sur le terrain des relations chronologiques entre la déformation et la minéralisation aurifère, ainsi que les diverses phases d'intrusions syn-tectoniques sur lesquelles des datations absolues ont été réalisées, situent généralement la formation des gîtes de la FC durant ces phases tardives. L'ascension de fluides hydrothermaux profonds et de magmas syn-cinématiques pourrait être alors favorisée par les mouvements horizontaux sur cette structure transcrustale. Toutefois, il s'agit là d'une association non systématique, plusieurs gîtes orogéniques montrant des minéralisations plus précoces et/ou polyphasées. Nous reviendrons en discussion sur ces aspects.

### 1.3.4 Formations encaissantes

La **Figure 4** présente les principales unités lithostratigraphiques encaissant la Faille de Cadillac. On retrouve :

1. Les unités volcaniques précoces constituées au Québec par les Formations de Val-d'Or, Jacola, Héva, Dubuisson, et en Ontario par l'Assemblage de Tisdale appartenant au Groupe de Larder Lake, mises en place entre 2714 et 2701 Ma;
2. Le Groupe de Blake River constitué de volcanites mafiques et felsiques (2703 – 2698 Ma) ;
3. Les unités sédimentaires clastiques des Formations de Kewagama et de Cadillac (2700 – 2685 Ma) ;
4. Le Groupe de Timiskaming, composé de sédiments clastiques (2682 à 2669±1,4 Ma) ;
5. Les sédiments clastiques du Groupe de Pontiac (> 2683 Ma) ;
6. Plusieurs intrusions syn- et post-Timiskaming d'affinité alcaline ;
7. Le Groupe de Cobalt d'âge protérozoïque.

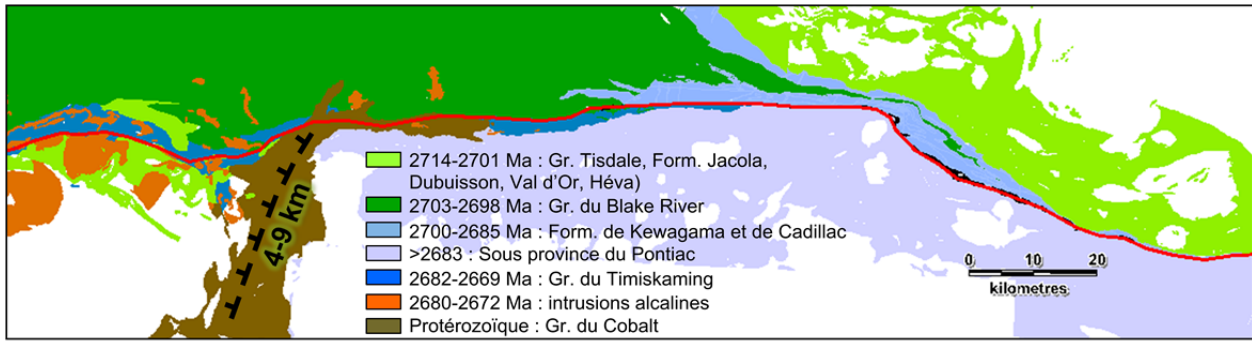
Des détails supplémentaires sont donnés ci-après sur les principales unités.

*Unités volcaniques précoces (Formations de Val-d'Or, Jacola, Héva, Dubuisson, Assemblage de Tisdale)*

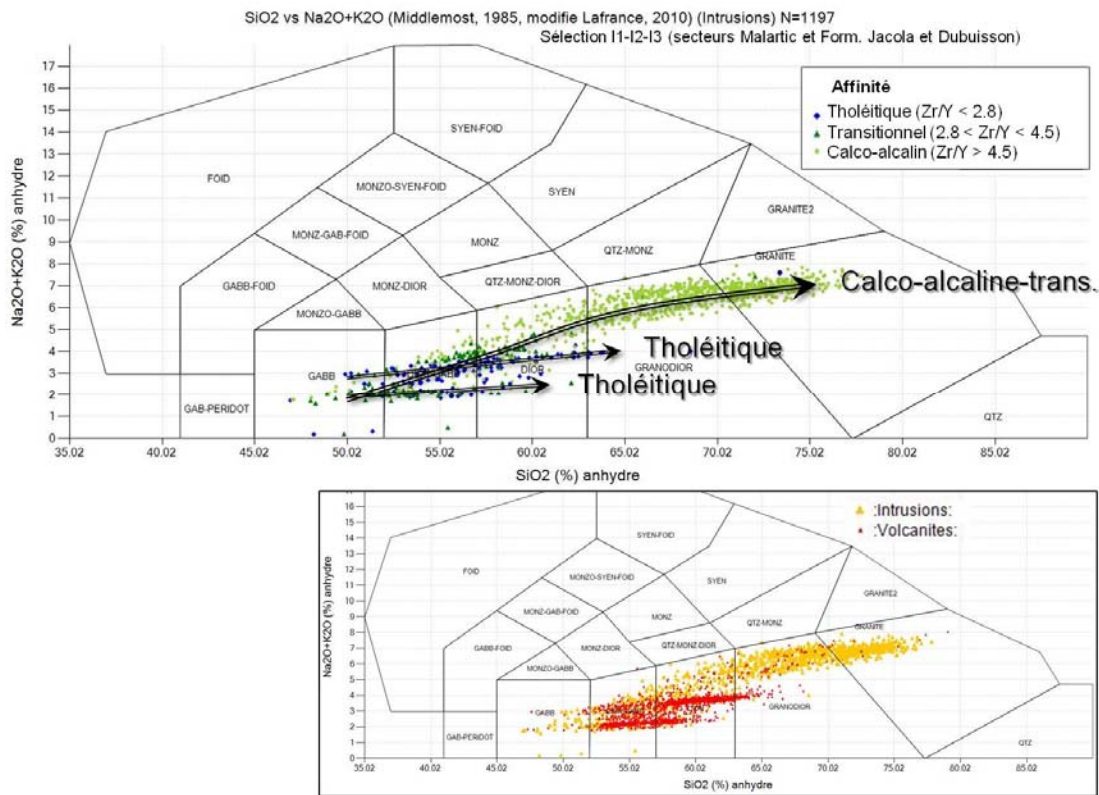
Ces unités se mettent en place dans les mêmes intervalles chronologiques : entre 2714 et 2701 Ma du côté Québec, et entre 2710 et 2703 Ma du côté ontarien. Elles sont composées de volcanites et volcanoclastites tholéïtiques mafiques à intermédiaires (+ felsiques dans le camp de Val-d'Or) avec intercalations de coulées ultramafiques komatiitiques (Tisdale inf., Jacola, Dubuisson). Il est intéressant de noter qu'en Ontario la

FC est presque systématiquement encaissée dans ces intercalations ultramafiques du Tisdale inf. Au Québec, on retrouve très communément la FC dans les volcanites ultramafiques du Gr. de Piché, dont la situation stratigraphique demeure énigmatique bien que dans la région de Malartic et Val-d'Or, il pourrait s'agir de la continuité de la Formation de Dubuisson sur le flanc SO du synclinal de Malartic. Cette relation spatiale très récurrente entre la FC et les komatiites pourrait vraisemblablement être de nature mécanique. De par leur faible résistance au cisaillement, les komatiites favorisent la formation de couloirs de déformation préférentiels, à la manière des décollements régionaux se produisant sur les « formations savon » évaporitiques bien connues dans les Alpes (évaporites du Trias, Laubscher, 1977; Séranne et al, 2007) et dans les Appalaches (Davis et Engelder, 1985, 1987), un phénomène synthétisé par Costa et Vendeville (2002), ou des serpentinites plus ou moins talqueuses de la Faille San Andreas (Moore et al, 1997; Moore et Rymer, 2007; Wei, 2011). Un bémol est à apporter toutefois à ce modèle puisque l'altération des komatiites, en particulier leur ankérisation que l'on observe à l'échelle régionale le long de la faille, devrait s'accompagner d'une augmentation drastique de leur compétence ce qui en fait de très mauvais candidats au cisaillement. Cette concentration préférentielle des couloirs de déformation le long des bandes komatiitiques doit donc nécessairement avoir lieu antérieurement à leur ankérisation, et on devine que les phases tectoniques tardives syn- ou post-ankérisation y pénétreront difficilement produisant ainsi une empreinte plus discrète.

Les Formations de Jacola et Dubuisson contiennent de nombreuses intrusions subverticales déformées injectées à la faveur des couloirs de cisaillement ESE Marbénite et Norbénite. Ces intrusions sont de forme longitudinale parallèle au grain mylonitique lui-même confondu avec le plan stratigraphique, d'épaisseur métrique à décimétrique, plus rarement hectométrique, et d'extensions hectométrique. Leur composition est très variée (gabbros, diorites, tonalites, granodiorites...) de même que leur texture (aphanitique, grenu, porphyrique...). Leurs signatures en éléments immobiles (Zr, Y, Ti, Nb), et en éléments majeurs des précurseurs modélisés (Trépanier, 2009 : projet CONSOREM 2009-01) comparées à celles des volcanites tholéiitiques encaissantes (**Figure 5**), indique que les termes les plus mafiques (gabbros) sont des séries précoces syn-volcaniques tholéiitiques à transitionnelles, tandis que les termes intermédiaires et felsiques (granodiorites, tonalites) appartiennent à un épisode magmatique calco-alcalin très distinct du précédent, contenant aussi des termes relativement mafiques (diorite à quartz). Cet épisode calco-alcalin correspond à la ceinture plutonique syn-tectonique rapportée dans ce secteur par Morasse et al. (1995), qui se met en place spécifiquement en relation avec les failles majeures autour de 2694 – 2692 Ma. Bien que certainement ante-Au, ces intrusions calco-alcalines présentent dans ce secteur une nette association avec les minéralisations aurifères. Il s'agit d'une relation *passive*, leur compétence plus forte que celle des volcanites encaissantes procure à ces intrusions une perméabilité de fracture leur permettant de drainer les fluides hydrothermaux plus facilement que les volcanites qui sont plus ductiles et donc très imperméables (la déformation ductile induit une diminution drastique de la porosité).



**Figure 4.** Unités stratigraphiques encaissant la Faille de Cadillac; trait pointillé : faille masquée supposée (rejet normal indiqué). Géologie modifiée du Sigéom et de l'OGS.



**Figure 5.** Signature en éléments majeurs prédits (méthode des précurseurs modélisés, Projet 2009-01) des intrusions I1, I2, I3 encaissées dans les Formations de Jacola, Dubuisson et dans le secteur de Malartic. Les échantillons de roches alcalines ( $Nb/Y > 0,7$ ) n'ont pas été considérés. Les données proviennent du Sigéom 2011.

### Le Groupe de Timiskaming

Cette unité est composée de roches sédimentaires clastiques de types conglomérats et grès alluviaux et fluviaux, et de turbidites, intercalés dans la portion ontarienne par des unités volcaniques et volcanoclastiques alcalines (composition trachytique). Ce bassin sédimentaire interprété syn-tectonique (Diop, 2011) s'étend longitudinalement le long de la FC à l'ouest de la Faille Ruisseau Davidson. Sa continuité sous le Groupe de Cobalt est probable. Il repose en

discordance sur le substratum volcanique ou sédimentaire. Le contexte tectonique contrôlant sa mise en place n'est pas clairement défini (bassin flexural syn-compression N-S, bassin en *pull-apart* syn-transpression, bassin en extension N-S) bien que les travaux récents de Diop (2011) sur la Formation de Granada (Gr. Timiskaming dans le secteur de Rouyn) concluent à un modèle polyphasé avec bassin flexural de type *piggyback* formé en compression suivi d'un remplissage de conglomérats dans un environnement en extension. Ce type de bassin se caractérise par l'ouverture progressive d'espace d'accommodation reliée à la flexure du substratum, induite par la progression des chevauchements-plissements frontaux. On aurait ici une variante archéenne du bassin flexural typique, initialement décrit dans les ceintures de chevauchement-plissement récentes et actuelles dans lesquelles le plissement est une expression superficielle de mouvements horizontaux le long de décollements sous-jacents subhorizontaux charriant les nappes. Suivant cette variante archéenne, la flexure est causée par le serrage progressif et le déversement de plis non-reliés à des niveaux de décollement subhorizontaux. De par leur caractère syn-tectonique et leur association spatiale – génétique – avec la FC, les roches sédimentaires du Timiskaming procurent un enregistrement de la déformation de cette faille et recèlent des clefs dans la compréhension de son histoire tectonique complexe. Ce groupe est communément utilisé comme marqueur chronologique relatif, bien que la formation du bassin s'étende au moins sur 12 Ma : plusieurs datations effectuées tant sur des éléments détritiques des sédiments que sur des volcanites trachytiques situent la formation du Groupe de Timiskaming de 2682 à 2669±1,4 Ma (Ayer et al., 2005).

### *Le Groupe de Pontiac*

Les roches sédimentaires clastiques du Groupe de Pontiac sont interprétées comme constituant une sous-province distincte de l'Abitibi, bien que leur dépôt soit contemporain de la formation de ce dernier (> 2683 Ma d'après les datations effectuées sur des intrusions post-Pontiac). Cette interprétation est argumentée par leur niveau crustal plus profond (faciès amphibolite) indiquant une évolution structurale et une situation géodynamique différentes de celles de l'Abitibi.

### *Intrusions syn- et post-Timiskaming*

Plusieurs intrusions syn- et post-Timiskaming d'affinité alcaline, possiblement co-magmatiques avec les volcanites contemporaines, sont encaissées dans l'environnement de la Faille de Cadillac. Elles apparaissent typiquement sous la forme de *stocks* longitudinaux pluri-kilométriques injectés à la faveur de ce couloir de cisaillement (p. ex. : les intrusions de Malartic) et de ses ramifications (p. ex. : les intrusions de Kirkland Lake et de Camflo). Leur texture varie d'aphanitique à porphyrique et leur composition est typique des suites alcalines : monzonites, syénites, albitites, avec des phases plus mafiques de type diorite, gabbro, clinopyroxénite, hornblendite et lamprophyre (Ayer et al., 2005). Ces intrusions se mettent en place entre 2680 et 2672 Ma (Ayer et al., 2005; Jean Goutier, *comm. pers. écrite*). Leurs relations géométriques et leur caractère co-spatial avec les failles, combiné au fait qu'elles sont systématiquement affectées par les déformations associées à ces mêmes failles, indique que ces intrusions sont syn-cinématiques. Elles présentent par ailleurs des relations intimes avec les minéralisations aurifères, bien que la nature (structurale, génétique) de ces relations ne semble pas universelle le long de la FC. Si certaines intrusions alcalines semblent précéder la formation des gîtes (Kirkland Lake), dans plusieurs autres cas la contribution hydrothermale magmatique est fortement suggérée par un fort gain métasomatique en potassium, la présence de molybdénite et/ou une tendance plus poly-métallique des minéralisations (Camflo, Malartic). Notons enfin l'existence d'intrusions alcalines massives plus distales vis-à-vis de la FC, de forme plus patatoïde et de plus grande dimension que les intrusions injectées le long des failles (p.ex., intrusion de Baie Renault datée à 2682±1 Ma par David et al., 2011, intrusion du

canton de Lebel datée à  $2673 \pm 2$  Ma). Certaines de ces intrusions, telle celle de Baie Renault, sont aurifères.

### *Le Groupe de Cobalt*

L'unité lithostratigraphique la plus jeune que l'on retrouve au Sud-Abitibi est le **Groupe sédimentaire protérozoïque du Cobalt**. Cette formation en discordance sur les roches archéennes s'étend le long d'une bande longitudinale N-S jusqu'au contact masqué de la Faille de Cadillac où elle exhibe une inflexion E-O pour s'aligner sur le corridor de déformation.

### **1.3.5 Caractéristiques structurales et évolution de la Faille de Cadillac**

#### *Caractéristiques structurales*

La Faille de Cadillac dans son ensemble peut être décrite en termes de segments qui présentent des caractéristiques spécifiques au niveau des encaissements, de l'empreinte structurale et des relations avec le métamorphisme.

À titre d'exemple, deux segments distincts de la FC sont situés de part et d'autre du Groupe de Cobalt. Le segment à l'E, situé au Québec, est à pendage N (de  $60^\circ$  à subvertical) et constitue une limite lithostratigraphique majeure séparant deux sous-provinces distinctes aux niveaux crustaux contrastés. En déformations finies, cet écart de niveau crustal indique sur ce segment un rejet normal de l'ordre de 4 à 9 km (bloc N descendant). Le rejet horizontal ne peut être apprécié faute de marqueur transversal (toutes les formations étant parallélisées à la FC). Il s'agit donc d'une discontinuité géodynamique régionale ayant joué un rôle de premier plan dans la structuration du Sud-Abitibi.

Le segment O, situé en Ontario, est à pendage S (systématiquement très fort,  $> 75^\circ$ ), et ne constitue pas une limite lithostratigraphique. Les roches situées de part et d'autre appartiennent aux mêmes unités et sont au même niveau crustal. Il n'y a, par conséquent, aucun rejet fini vertical d'ampleur régionale (bien que, plus localement, il soit possible que la présence de marqueurs stratigraphiques permette de déterminer des rejets finis de faible amplitude). Encore une fois, le rejet horizontal fini ne peut être apprécié à l'échelle régionale faute de marqueur transversal.

Il résulte de ces observations que l'essentiel des déformations finies accommodées par la FC ne se transmet pas dans le segment de Kirkland Lake. Il est par conséquent nécessaire qu'une structure NNE-SSO soit présente sous le Cobalt, transférant vers le S le glissement vertical se produisant sur la FC orientale et mettant ainsi en contact les roches du Pontiac au faciès amphibolite avec celles du Tisdale au faciès schistes verts. Une telle structure, qui sera dénommée informellement « Faille Sous-Cobalt » (**Figure 4**), pourrait avoir contrôlé la géométrie du bassin protérozoïque du Cobalt, soit directement (réactivation) soit indirectement (relief causé par l'érosion différentielle des roches juxtaposées), expliquant ainsi sa forme longitudinale NNE-SSO.

Sur le plan métallogénique, ces observations font apparaître la complexité de l'objet « Faille de Cadillac » et la nécessité de distinguer l'objet métallogénique (métallotecte) de l'objet tectonique. L'objet que l'on appelle communément « Faille de Cadillac » se définit avant tout par un alignement remarquable de minéralisations aurifères. C'est à peu près la seule caractéristique absolument récurrente que l'on lui reconnaît strictement d'un bout à l'autre. Les



autres caractéristiques (association avec le Timiskaming, contrastes de niveaux crustaux des formations juxtaposées, etc.) ne s'observent que le long de segments spécifiques.

Cette segmentation est très probablement révélatrice d'une évolution complexe au cours de laquelle certains segments ont davantage fonctionné avec d'autres failles transcrustales (Faille Parfouru, Faille Sous-Cobalt) tandis que d'autres segments de la FC demeuraient inactifs.

#### *Discussion sur l'évolution structurale de la Faille de Cadillac*

Le Timiskaming est systématiquement très déformé. Dans le segment de Rouyn, ces déformations se traduisent principalement par une série de plis E-O déversés vers le N (Gauthier, 1986; Diop, 2011) associés à une schistosité de plan axial pénétrative, dominante à l'échelle du bassin. Ces structures traduisent un important raccourcissement N-S syn- ou post-Timiskaming. En revanche, comme mentionné ci-dessus, la continuité du Timiskaming le long de la FC ne semble pas rompue à l'intersection – masquée – de la FC avec la « Faille Sous-Cobalt », bien que le Timiskaming se retrouve sur les flancs opposés de part et d'autre du Cobalt.

De plus, le segment de Kirkland Lake était nécessairement inactif pendant une phase importante de la structuration régionale puisque l'on n'y observe pas le rejet fini normal d'ampleur kilométrique que l'on retrouve sur les segments québécois.

En résumé, 1) le bassin syn-tectonique du Timiskaming s'étend de part et d'autre du Cobalt et montre, de part et d'autre, la même déformation plicative d'axe parallèle à la FC, 2) le segment ontarien n'est pas affecté par l'extension. Il en ressort que les segments ontarien et québécois de la FC étaient solidaires pendant le raccourcissement, mais ne l'étaient pas pendant l'extension.

Durant cette phase extensive, le glissement normal pluri-kilométrique ne s'est pas transmis du segment québécois vers l'ouest mais vraisemblablement vers le SO le long de la « Faille Sous-Cobalt ». Il y a eu blocage de la propagation du glissement normal sur la FC quelque part sous le Cobalt. Ce scénario est d'autant plus plausible que les conditions aux limites des régimes compressifs N-S et extensifs sont profondément différentes : la compression est générée par les mouvements horizontaux imposés aux limites des plaques tandis que l'extension résulte de forces de volumes, concentrées sur les zones de plus fort épaissement crustal.

Par ailleurs, dans le secteur de Rouyn, le Timiskaming est au faciès des schistes verts bien que situé au sud de la FC. Son contact avec le Pontiac qui est au faciès amphibolite devrait donc être un contact anormal marqué par un contraste métamorphique. Il est possible que, dans ce secteur, la FC se découple pendant l'extension de sorte que le glissement normal se produise sur la Faille Granada (FG) située au contact Timiskaming-Pontiac. La FG présente en effet l'empreinte d'une faille ductile à ductile-cassante majeure (Diop, 2011; R. Daigneault, comm. pers. orale). Ce découplage pourrait latéralement impliquer la Faille Ruisseau Davidson, qui jouerait le rôle de faille de transfert relayant le glissement normal de la FC à l'est vers la FG à l'ouest. Notons que la Faille Ruisseau Davidson délimite deux blocs du Timiskaming aux caractéristiques structurales distinctes (R. Daigneault, comm. pers. orale), notamment en termes de pendage. Ceci est en faveur de son implication dans les déformations syn- ou post-Timiskaming. De plus, cette faille serait sub-parallèle à la « Faille Sous-Cobalt » qui, comme il est expliqué plus haut, serait mobilisée par l'extension. On a donc un schéma structural cohérent dans lequel la phase extensive mobilise ces deux discontinuités NE-SO.

Enfin, il est probable que le segment de Cadillac-Malartic d'orientation ESE situé entre les villes de Cadillac et Val-d'Or ait fonctionné de manière solidaire avec la Faille Parfouru pendant certaines périodes (Daigneault et al., 2002). Outre l'argument géométrique évident, un argument structural appuie cette conclusion : les Failles Marbénite et Norbénite, interprétées comme des ramifications profondes de la FC, se prolongent au NO dans le corridor de la Faille Parfouru. Ces ramifications forment un réseau élargi de structures majeures parallèles ayant pour effet d'étendre latéralement l'influence métallogénique de la FC. Celle-ci est beaucoup plus distale que dans les segments occidentaux, plusieurs gîtes étant encaissés au sein des ramifications. Ceci constitue une caractéristique spécifique de ce segment ESE de la FC. Il s'agit dans ce cas d'une segmentation structurale très claire, reliée à la coalescence des deux systèmes transcrustaux FC et Faille Parfouru, accompagnée d'un changement d'orientation générale de la FC.

En conclusion, la Faille de Cadillac semble être une succession de segments ayant fonctionné de manière plus ou moins indépendante au profit d'autres segments (Faille Parfouru, Faille Sous-Cobalt) à différentes époques de son évolution polyphasée. La seule période durant laquelle on peut raisonnablement avancer qu'elle ait été solidaire sur toute sa longueur est la période des minéralisations aurifères ontariennes et québécoises, syn- à post-Timiskaming, en régime compressif NNO-SSE à NO-SE produisant un décrochement dextre dont on observe l'expression sur tous les segments. Ce régime tectonique proposé par plusieurs auteurs ontariens comme étant syn-minéralisation (Smith et al., 1993; Ispolatov et al., 2008). Ces observations sont en faveur de la thèse selon laquelle les minéralisations aurifères de la FC se mettent en place postérieurement à la structuration régionale, à un stade où l'architecture observée actuellement était déjà acquise. Cette phase aurifère tardi-tectonique voyant la FC fonctionner intégralement ne produirait pas de déformations significatives au regard des déformations finies.

---

## **2 CARACTERISTIQUES SPATIALES DES CHAMPS GÉOLOGIQUES**

---

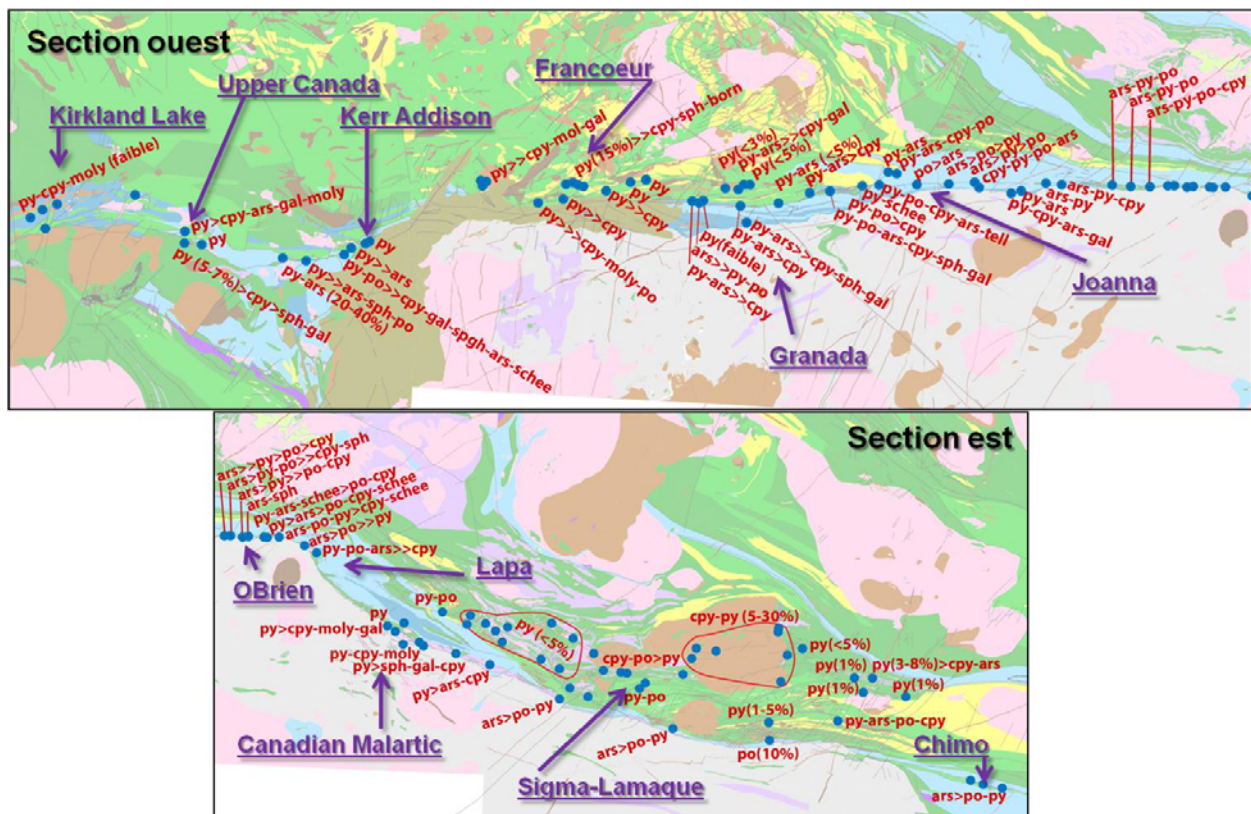
Des champs géologiques peuvent être définis spatialement à partir de caractéristiques spécifiques. Ces caractéristiques sont les suivantes :

- Organisation de la minéralisation aurifère (veine, stockwork, dissémination, etc.);
- Abondance des sulfures;
- Paragenèse métallique;
- Minéraux non-sulfures du minerai;
- Altérations observées sur le terrain;
- Gains/pertes métasomatiques déterminés par bilans de masse à partir des analyses lithogéochimiques;
- Structures encaissantes;
- Roches encaissantes.

Dans cette section, nous présenterons les cartes thématiques correspondant à certaines des caractéristiques énumérées ci-dessus.

## 2.1 Abondance et paragenèse métallique

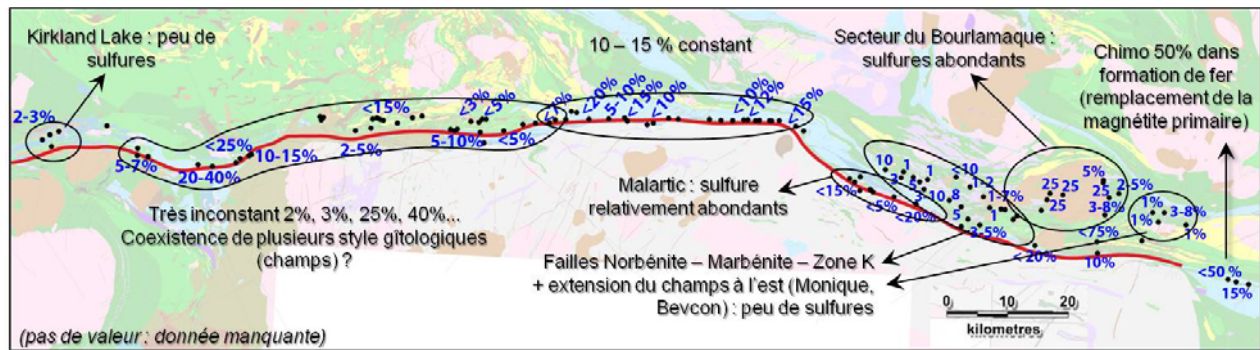
La **Figure 6** présente un résumé des sulfures rapportés dans les descriptions de gîtes. Ces données résultent d'observations qualitatives et sont tributaires de l'observation variable des géologues autant que de l'emphase portée aux différentes espèces de sulfures lors des relevés de carottes. Il arrive en effet que le géologue d'exploration détecte davantage ce qu'il cherche ou ce qui est le plus commun (pyrite) au détriment des autres minéraux, moins clairement identifiables et moins reliés à Au. Ce ne sont donc pas là des données exactes. Un effort a donc été porté à répertorier spécifiquement les proportions relatives entre les espèces de sulfures (**Figure 6**).



**Figure 6.** Assemblages de sulfures répertoriés dans les gîtes aurifères le long de la Faille de Cadillac.

En **Figure 7** sont présentées les abondances de sulfures rapportées dans les descriptions de gîte. Bien que cette caractéristique soit relativement incertaine car difficile à établir visuellement, on voit très bien apparaître plusieurs regroupements indiqués sur la figure.





**Figure 7.** Abondance de sulfures rapportés dans les descriptions de gîtes aurifères le long de la Faille de Cadillac.

D'ouest en est, ces deux cartes thématiques permettent d'ores-et-déjà de distinguer plusieurs tendances très nettes le long de la FC :

1. Dans le secteur de Kirkland Lake, les sulfures sont peu abondants (<3 %), représentés par la pyrite, la molybdénite et la chalcopryrite;
2. Le long segment situé de Upper Canada au camp de Rouyn est marqué par des gîtes très différents en termes d'abondance et de minéralogie des sulfures, indiquant possiblement la coexistence spatiale de plusieurs champs gîtologiques;
3. Le segment rectiligne E-O situé entre Joanna et Lapa contient des gîtes relativement riches en sulfures (10-15%) avec des assemblages typiques à pyrite, arsénopyrite, et pyrrhotite dont la présence systématique apparaît déjà comme une caractéristique très spécifique de ce segment;
4. Les gîtes encaissés dans les failles ESE Norbénite-Marbénite-Zone K (failles majeures subsidiaires à la FC) sont quasi-systématiquement très pauvres en sulfures (1-5 %) et ne contiennent que de la pyrite (exception faite du gîte Black Cliff, à l'extrémité N, très riche en pyrrhotite), on note par ailleurs que dans ce secteur la pyrite est quantitativement très peu reliée à l'or;
5. Les gîtes encaissés dans l'intrusion de Bourlamaque sont particulièrement riches en sulfures (jusqu'à 25%) représentés essentiellement par la pyrite et la chalcopryrite, plus sporadiquement par la pyrrhotite, la pyrite étant très intimement liée à l'or;
6. Dans la portion E, les gîtes encaissés directement dans le couloir de la Faille de Cadillac sont systématiquement riches en arsénopyrite à l'exception du secteur de Malartic, où l'on observe au contraire la présence très atypique de molybdénite, galène, sphalérite.

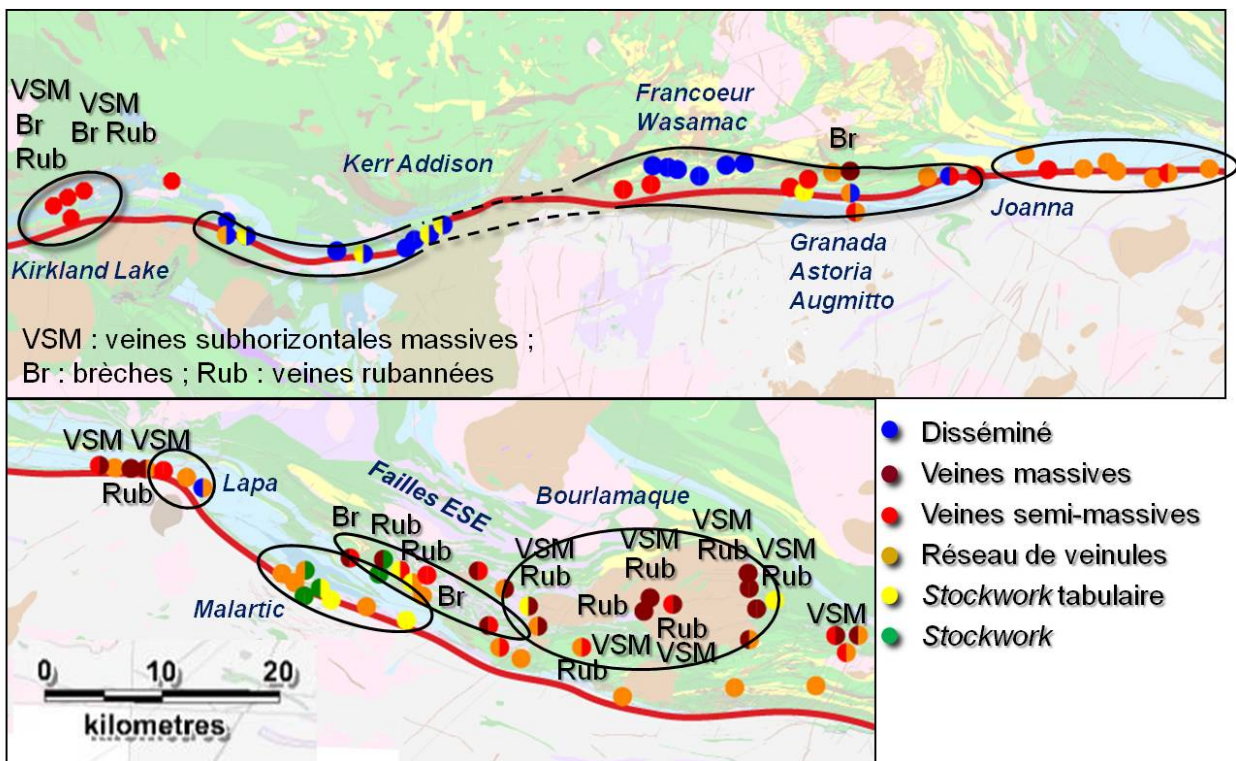
## 2.2 Organisation de la minéralisation aurifère

Les différents types d'organisation de la minéralisation aurifère ont été classés en 6 catégories :

1. Sulfures disséminés;
2. Veine massive : une veine dominante largement plus épaisse que ses satellites;
3. Veine semi-massive : essaim de veines-veinules parallèles contenant des veines dominantes;

4. Réseau de veinules : couloir contenant un essaim de veinules composé d'une ou deux familles;
5. Stockwork tabulaire : couloir contenant un essaim de veinules composé de plus de deux familles;
6. Stockwork : essaim de veines-veinules composé de plus de deux familles.

Ici encore, il faut noter la difficulté de transcrire les observations rapportées dans les descriptions en catégories citées précédemment. Si certains auteurs produisent des descriptions rigoureuses et détaillées des veines et veinules en termes de géométrie, texture, attitude, il a été nécessaire dans de nombreux cas de « lire entre les lignes », combiner des petites remarques placées ici et là dans un rapport pour se faire une idée du type de veine présent ou, lorsque disponible, aller directement chercher les photos (qui valent mille mots). Cette carte thématique (les autres également) doit donc être utilisée avec une certaine circonspection. Toutefois nous verrons que, toutes caractéristiques superposées, les zonalités se corrélaient remarquablement, ce qui nous permettra de soutenir la présence de plusieurs champs gîtologiques.



**Figure 8.** Organisation de la minéralisation aurifère rapportée dans les descriptions de gîtes le long de la Faille de Cadillac. À l'exception du secteur de la flexure de Cadillac (secteur du gîte Lapa), les veines massives et semi-massives sont injectées dans des couloirs de cisaillement parallèlement au grain mylonitique (ou légèrement oblique).

La **Figure 8** présente le résultat de la compilation de l'organisation aurifère rapportée dans les descriptions. Il est particulièrement intéressant de noter que la plupart des zones déterminées dans la section précédente à partir des cartes thématiques de sulfures trouvent ici un remarquable écho. On distingue en effet :

1. Le secteur de Kirkland Lake avec des veines massives et semi-massives rubanées très caractéristiques, l'abondance de bèches et la présence de veines très massives peu pentées dont le pendage diminue en s'éloignant des failles (aussi très caractéristiques) similaires aux célèbres *flat* de Sigma-Lamaque;
2. Le long segment situé entre Upper Canada et le camp de Rouyn (comprenant Kerr Addison, Francoeur Wasamac, Granada, Astoria, Augmitto, etc.) marqué par la coexistence de deux types dominants d'organisation : disséminés et réseaux de veinules/stockwork; ici encore on pressent la superposition de plusieurs gîtes;
3. Dans le secteur de la flexure (secteur du gîte Lapa), l'intensité de la déformation est telle que tous les contacts lithologiques séparant des unités lithologiques aux compétences moindrement contrastées sont cisailés et deviennent des conduits perméables aux écoulements hydrothermaux. La minéralisation est typiquement disposée en veines/veinules aux contacts d'intrusions felsiques/intermédiaires ou le long des formations de fer;
4. Les gîtes encaissés dans les failles ESE (Norbénite, Marbénite, Zone K) contiennent le plus souvent des veines semi-massives (encaissés dans et aux contacts des intrusions longitudinales pré-aurifères tonalitiques ou grano-dioritiques calco-alcalines injectées parallèlement au grain mylonitique) ou des réseaux de veinules tabulaires (encaissés dans les volcanites ultramafiques);
5. L'intrusion de Bourlamaque étant caractérisée par son homogénéité et son isotropie, les gîtes qui y sont encaissés montrent systématiquement un système très cassant de veines rubanées (semi) massives subverticales injectées dans les failles et associés à des veines peu pentées très massives. Il s'agit d'un schéma très andersonnien, où l'intersection des veines correspond à l'axe  $\sigma_2$ , les veines peu pentées (plan  $\sigma_1$ - $\sigma_2$ ) se forment en extension (mode I) tandis que les veines verticales sont des veines de cisaillement et comprennent le plan  $\sigma_2$ - $\sigma_3$ ; ce schéma indique un fort contrôle tectonique sur la géométrie des veines, au moyen d'une forte contrainte différentielle et d'une contrainte déviatorique (contrainte totale soustraite de la contrainte moyenne) plus forte que la pression de fluide (à l'exception de  $\sigma_3$  dans les veines horizontales, aucune contrainte ne pénètre dans le champ de la tension);
6. Le secteur de Malartic est marqué par la présence de *stockworks*, de *stockworks* tabulaires et de réseaux de veinules. La formation de tels *stockworks* implique que les trois contraintes principales sont dans le champ de la tension, autrement dit une pression de fluide extrêmement élevée, plus forte que la contrainte déviatorique maximale. Le contrôle par la pression de fluide est dans ce cas dominant sur le contrôle tectonique.

---

### 3 DONNEES GEOCHIMIQUES

---

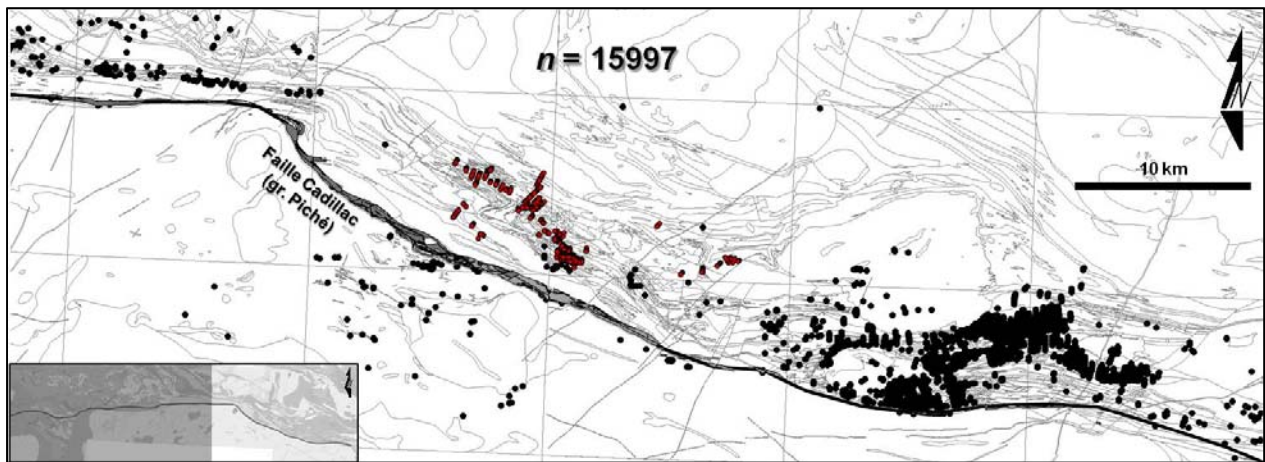
Une base de données lithogéochimiques de l'environnement de la FC a été compilée dans le cadre de ce projet. Cette base rassemble :

1. La base du CONSOREM, résultant de plusieurs bases (données des compagnies partenaires, données compilées dans la littérature, données des ministères québécois et ontarien) accumulées depuis plus d'une décennie à travers différents projets du CONSOREM;



2. Des données de compagnies partenaires ajoutées spécifiquement à l'occasion de ce projet (sur les sites de Goldex, Lapa, Métanor, Joanna, Francoeur-Wasamac);
3. De nombreuses données de la littérature numérisées spécifiquement dans ce projet, et
4. La base de données de la compagnie Niogold (collaboration spéciale) riche de plus de 6500 analyses dans le secteur des gîtes Marban, Norlartic, Kierens, etc., généreusement mise à notre disposition.

La couverture d'échantillons obtenue (**Figure 9**) est relativement bonne dans les secteurs des Formations de Val-d'Or et de Héva, et autour des gîtes Marban, Norlartic. Le secteur de Malartic est couvert par quelques échantillons, tandis que demeurent d'importantes lacunes entre Malartic et Cadillac, et entre Malartic et Val-d'Or. Ces lacunes sont partiellement comblées par les analyses de Goldex et de Lapa, qui ne sont pas représentés sur la figure car n'étant pas disponibles lors de la réalisation du traitement présenté ci-dessous.



**Figure 9.** Couverture d'échantillons lithogéochimiques de la base de données compilée dans cette étude (portion E). L'encart en bas à gauche permet de situer la figure dans le cadre régional de la FC.

Faute de temps durant la deuxième phase de ce projet, il n'a pas été possible de traiter les données dans la partie ouest de la FC. Par conséquent, seuls seront présentés ici les résultats du traitement des données géochimiques de la partie située à l'est de la flexure de Cadillac (secteur du gîte Lapa).

Le traitement réalisé consiste en un calcul des gains et pertes absolus par la méthode des bilans de masse avec modélisation de précurseur (Trépanier, 2009 : projet CONSOREM 2009-01). Cette méthode détermine les concentrations initiales de la roche précurseur (avant altération) en fonction des concentrations mesurées en éléments immobiles (Y, Ti, Zr, Al, Cr), au moyen de réseaux neuronaux entraînés sur une large base de données de roches fraîches (GEOROC). Les gains et pertes absolus sont par la suite déterminés à partir des concentrations calculées sur les précurseurs, en tenant compte des changements de volume.

Partant de la base de données compilée dans l'environnement de la FC, les échantillons sont sélectionnés suivant les critères :

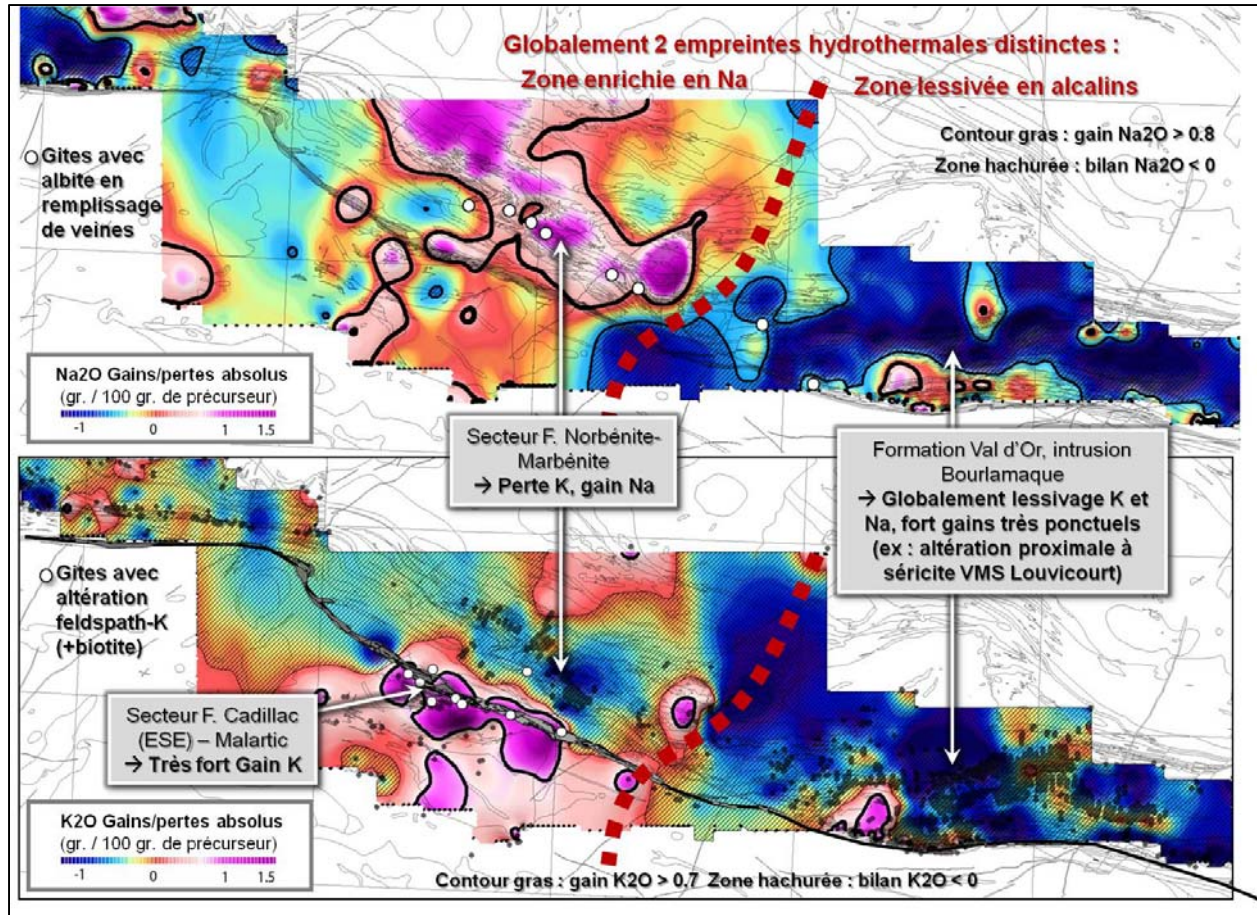
1. Encaissant intrusif I1, I2 et I3;

2. Rapport Nb/Y < 0,7 (pour ne conserver que les échantillons *a priori* subalcalins, la méthode étant inefficace pour les roches alcalines, Trépanier, 2012);
3. Cr > 1000 ppm (pour extraire les roches ultramafiques).

Les résultats de ce traitement pour les oxydes majeurs K<sub>2</sub>O et Na<sub>2</sub>O ont été interpolés et sont présentés à la **Figure 10**. Plusieurs conclusions peuvent être tirées de ces traitements.

On distingue régionalement **deux empreintes hydrothermales** affectant deux domaines distincts dont la séparation est sensiblement confondue avec la ligne NNE-SSO de changement d'azimut de la FC et de la foliation principale (*ligne de flexure* pointillée rouge à la **Figure 10**), qui passent relativement abruptement d'ESE à E-O. À l'ouest de cette délimitation, les roches ont subi un enrichissement en sodium particulièrement fort dans le secteur des Failles Marbénite et Norbénite, tandis que le bilan en potassium est plus variable. À l'est de la délimitation, on observe un **lessivage généralisé des alcalins** ponctué de petites zones de fort gain en potassium (ex. secteur de Louvicourt), traduisant une signature hydrothermale typiquement volcanogène. Le fort gain en K<sub>2</sub>O et Na<sub>2</sub>O obtenu dans l'intrusion d'East Sullivan et dans la Formation de Héva directement à l'est de cette intrusion est interprété comme des artefacts liés au caractère alcalin de cette intrusion massive et de ses émanations subvolcaniques (dykes) injectées en grand nombre dans le Héva (P. Pilote, *comm. pers. orale*).

Dans le segment de Cadillac – Malartic orienté ESE, on distingue encore deux zones : le secteur de Malartic marqué par un fort gain systématique en K<sub>2</sub>O qui se corrèle remarquablement avec les observations de terrain (microcline, biotite), et le secteur des Failles Marbénite – Norbénite affecté par un lessivage du K<sub>2</sub>O contre un fort gain en Na<sub>2</sub>O aussi remarquablement corroboré par la présence d'albite en remplissage de veine dans la plupart des gîtes de ce secteur.



**Figure 10.** Interpolation des gains/pertes absolus en  $K_2O$  et  $Na_2O$  calculés par la méthode des bilans de masse avec modélisation des précurseurs (Trépanier, 2009 : projet CONSOREM 2009-01).

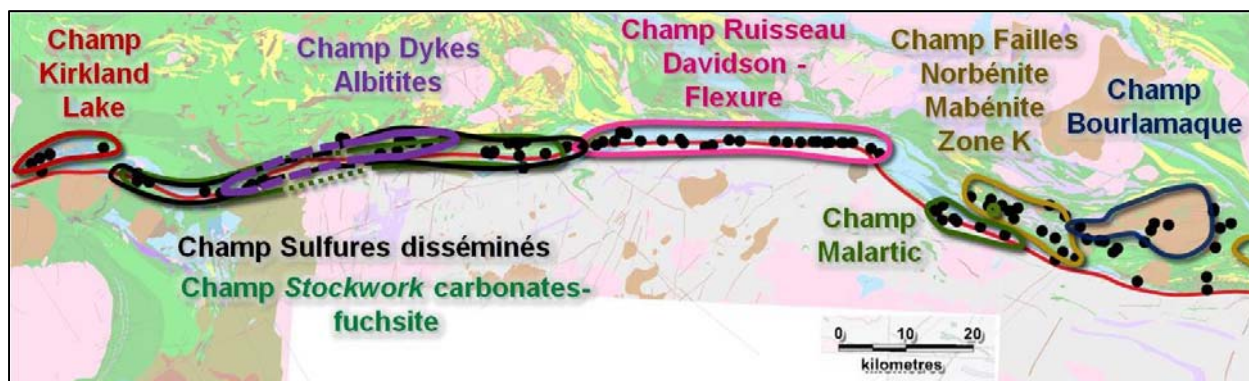
Il ressort de ces observations plusieurs empreintes hydrothermales très distinctes, montrant à l'échelle régionale un contrôle structural évident (délimitation confondue avec la ligne de flexure macroscopique). À l'échelle plus locale, au sein du segment ouest (orienté ESE), la forte zonation obtenue est soit l'expression de différents régimes hydrothermaux soit de différentes zones d'un même système hydrothermal dont les modalités sont, à ce stade, non établies. On remarque toutefois que ces champs s'orientent parallèlement aux structures, suggérant ici encore un **contrôle structural – cinématique – des circulations hydrothermales**.

## 4 CHAMPS GÏTOLOGIQUES

Au total, huit champs ont été déterminés (**Figure 11**). Ces champs ont été dénommés soit par leur localisation, soit par leurs caractéristiques dominantes si leur localisation ne leur était pas spécifique. Dans ce chapitre, nous nous attarderons à décrire ces champs et les caractéristiques distinctives ayant permis de les définir spécifiquement. Les références des descriptions de gîtes ne sont pas citées dans le texte, le lecteur les trouvera dans les fiches de



gîtes. Tous les documents consultés sont disponibles dans la bibliothèque accompagnant les livrables du projet.



**Figure 11.** Champs gîtologiques situés le long de la Faille de Cadillac, déterminés par cette étude.

#### 4.1 Le champ « Sulfures disséminés »

À l'ouest de la Faille Ruisseau Davidson, on trouve plusieurs gîtes au sein desquels la minéralisation n'apparaît pas dans des veines comme c'est le cas classiquement pour les minéralisations orogéniques, mais sous la forme de sulfures disséminés, le plus souvent au sein de failles ductiles (Faille Francoeur Wasa, Faille de Cadillac).

**Tableau 2.** Caractéristiques discriminantes du champ « Sulfures disséminés ».

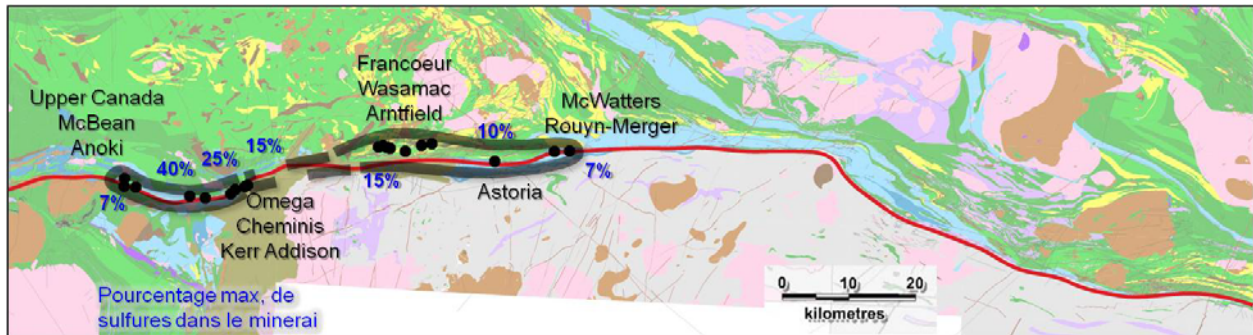
Champ « Sulfures disséminés »	
Sulfures	<b>Pyrite disséminée</b> (+ moindrement aux épontes de veinules); Pyrite relativement <b>abondante</b> (souvent 10-15 % et plus);
Encaissant	<b>Volcanites mafiques</b> du Tisdale ( <b>ferrifères</b> ), du Piché ou du Blake River, essaim de dykes d'albitite (ferrifères).

Les gîtes appartenant à ce champ sont représentés à la **Figure 12**. Il s'agit des gîtes suivants :

- Upper Canada (72,6 t Au)
- McBean (4,32 t Au)
- Anoki (5,06 t Au)
- Omega (20,82 t Au)
- Cheminis (8,41 t Au)
- McGarry (4,32 t Au)
- Barber Larder (0,4 t Au)
- Kerr Addison (*flow ore*, 230 t Au)
- Francoeur (16,07 t Au)
- Wasamac (76,17 t Au)
- Arntfield (3,05 t Au)
- Astoria (11,62 t Au)

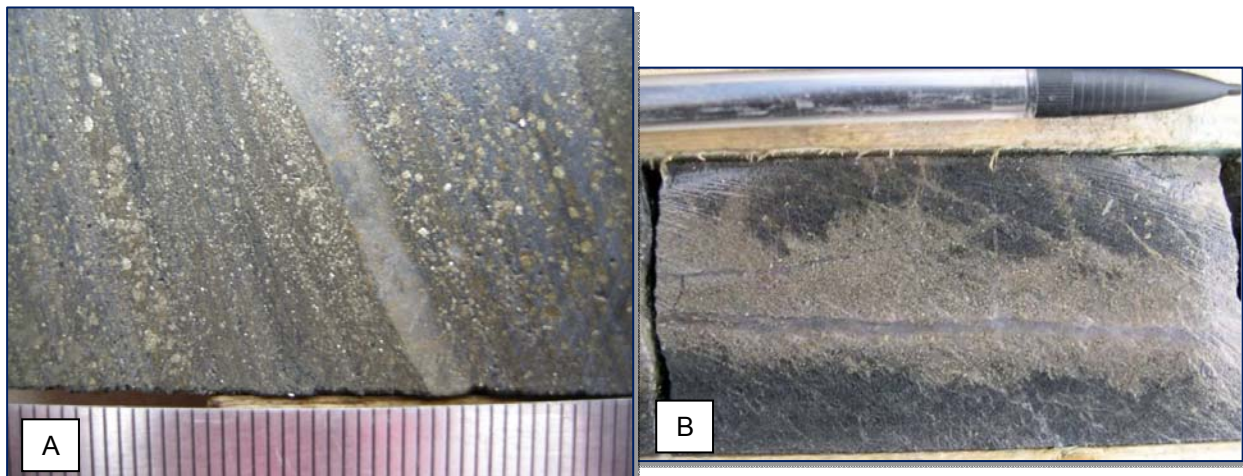
- McWatters (8,9 t Au)
- Rouyn Merger (6,21 t Au)

**La masse aurifère totale de ce champ est de 462,89 t Au.** Il contient six gisements majeurs (> 10 t Au) et un gisement géant (> 100 t Au). C'est le troisième champ le plus prolifique de la FC.



**Figure 12.** Gîtes composant le champ « Sulfures disséminés ».

Ce type de minéralisation est typiquement très riche en sulfures comparativement à la norme, encore une fois, des gîtes orogéniques. On observe soit des sulfures en agglomérats longiformes parallèles à la foliation mylonitique (**Figure 13 A**), soit semi-massifs aux épontes de veinules de quartz (**Figure 13 B**). Cette deuxième disposition est toutefois moins fréquente et moins caractéristique du style, qui montre le plus souvent très peu d'association avec un réseau de veines-veinules.



**Figure 13.** Sulfures disséminés A) dans la foliation mylonitique (Photo Bruno Lafrance – gîte Cheminis) et B) aux épontes de veinules de quartz (Photo Ispolatov et al., 2005 – gîte Anoki Main Zone).

Le **Tableau 3** fournit des détails sur les variantes de ce style, pour chaque gîte. On retrouve essentiellement les caractéristiques variantes suivantes :

- Importance relative du réseau de veinules;



- Remplissage des veinules (quartz, quartz – carbonates, quartz – carbonates – tourmaline);
- Nature et intensité des altérations (généralement, forte silicification);
- Présence d'arséno-pyrite.

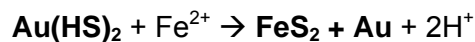
**Tableau 3.** Caractéristiques des gîtes du champ « Sulfures disséminés ».

Nom	Caractéristiques variantes
<b>McGarry</b>	Pyrite disséminée dans un horizon de mudstone carbonaté
<b>Barber-Larder</b>	Sulfures (py-po) disséminés dans des laves et brèches basaltiques
<b>Omega</b>	Pyrite-arséno (20-40%) disséminées dans la foliation mylonitique d'une tholéiite ferrifère, alt. carb-alb-musc-qtz-leuco; présence de pyrite recristallisée stérile
<b>Astoria</b>	Arséno-pyrite disséminée (semi-massive) dans des schistes métavolcaniques mafiques et ultramafiques (Piché), forte albitisation; veinules de qtz
<b>McWatters</b>	Sulfures disséminés dans la foliation mylonitique (py-cpy-sph-gal), alt. qtz-carb (±alb)
<b>Chemins</b>	Pyrite disséminée dans la foliation mylonitique d'une tholéiite ferrifère, alt. ser-ank-chl
<b>Arntfield</b>	Pyrite disséminée dans la foliation mylonitique, schistes métavolcaniques mafiques à felsiques (Blake River)
<b>Francoeur</b>	Pyrite disséminée dans la foliation mylonitique, schistes métavolcaniques mafiques à felsiques (Blake River), dykes albitite, forte albitisation
<b>Anoki</b>	Pyrite grossière (1-3 mm, max 7%) idiomorphe disséminée dans un encaissant massif altéré (composition tholéiite ferrifère, avec phénocristaux de feldspaths et magnétite), alt. alb-carb
<b>Upper Canada</b>	Pyrite disséminée dans des volcanites alcalines foliées et dans un porphyre syénitique (Timiskaming), forte silicification
<b>McBean</b>	Pyrite disséminée et en veines dans les dykes syénitiques à magnétite primaire (remplacée par py) parallèles à la foliation mylonitique constituant 50-60% de l'encaissant (volcanites ultramafiques du Tidsdale)
<b>Kerr Addison (flow ore)</b>	Pyrite disséminée dans une tholéiite ferrifère foliée et aux épontes de veinules qtz-carb, forte silicification
<b>Wasamac</b>	Pyrite disséminée dans la foliation mylonitique, schistes métavolcaniques mafiques à felsiques (Blake River), dykes albitite, forte albitisation
<b>Rouyn-Merger</b>	Pyrite aux épontes d'un réseau tabulaire de veinules qtz-alb-carb-trm anastomosées dans des métavolcanites foliées

Cette organisation peu commune de la minéralisation implique que les fluides aient circulé non pas à la faveur d'une perméabilité de fractures mais directement dans la porosité matricielle de la roche. Cette dernière est, dans ces contextes mésocristaux, extrêmement faible, et encore plus dans une zone mylonitique inactive (porosité obstruée par les recristallisations syn-cinématiques). Il est donc très probable que la circulation hydrothermale se soit produite pendant une période d'activité des failles ductiles encaissantes, à la faveur des gradients de pression de fluide générés par les déformations le long de ces failles ductiles. Toutefois le changement de volume étant sensiblement nul (absence de veine), il n'y a vraisemblablement pas eu de surpression de fluide. Il n'y a pas non plus d'évidence de fluctuation de la pression de fluide. Celle-ci a donc dû demeurer relativement constante, suggérant que la faille ductile encaissante a dû conserver une perméabilité stable durant le processus hydrothermal minéralisateur.

On a ici un processus minéralisateur qui diverge des mécanismes de variation cyclique de la perméabilité/pression inhérents aux structures profondes, classiquement invoqués pour la mise en place des gîtes orogéniques. Ceci pourrait être mis en perspective avec le faible pendage de la Faille Francoeur Wasa : cette faille n'aurait pas d'enracinement et ne serait pas connectée en profondeur avec des réservoirs hydrauliques surpressurisés infracrustaux (générant la sismicité et le drainage cyclique des fluides à haute pression sur les failles transcrustales).

Tout indique ici que la précipitation aurifère résulte exclusivement d'un piégeage chimique, lorsque la diffusion du fluide hydrothermal atteint une roche ferrifère (dykes albitite, tholéiite ferrifère...). Typiquement, le fluide réagit avec les minéraux ferrifères de l'encaissant pour précipiter la pyrite en remplacement de ces derniers, ce qui a pour effet de diminuer la fugacité du soufre et de déstabiliser les complexes aurifères bisulfurés  $\text{Au}(\text{HS})_2^-$  provoquant ainsi une baisse subite de la solubilité de Au et sa co-précipitation avec la pyrite (Mikucki, 1998) selon la réaction suivante (forme simplifiée) :



À Kerr Addison, gîte auquel il sera souvent fait référence puisqu'il a été particulièrement bien décrit par Smith et al. (1993), ce minerai est connu sous la dénomination de *Flow Ore*. La description détaillée de Smith et al. (1993) permet d'effectuer les observations suivantes :

1. Fort contrôle stratigraphique de la zone aurifère, strictement circonscrite dans les métavolcanites mafiques ferrifères (limites discrètes, pas de halo aurifère);
2. Au en inclusions dans la pyrite co-génétique (sulfurisation) : les concentrations sont proportionnelles;
3. Teneur est maximale en profondeur puis diminue progressivement vers la surface: suggère un appauvrissement du contenu aurifère des fluides à mesure que l'or précipite lors de leur ascension au sein de l'horizon ferrifère.

## 4.2 Le champ « Dykes d'albitite »

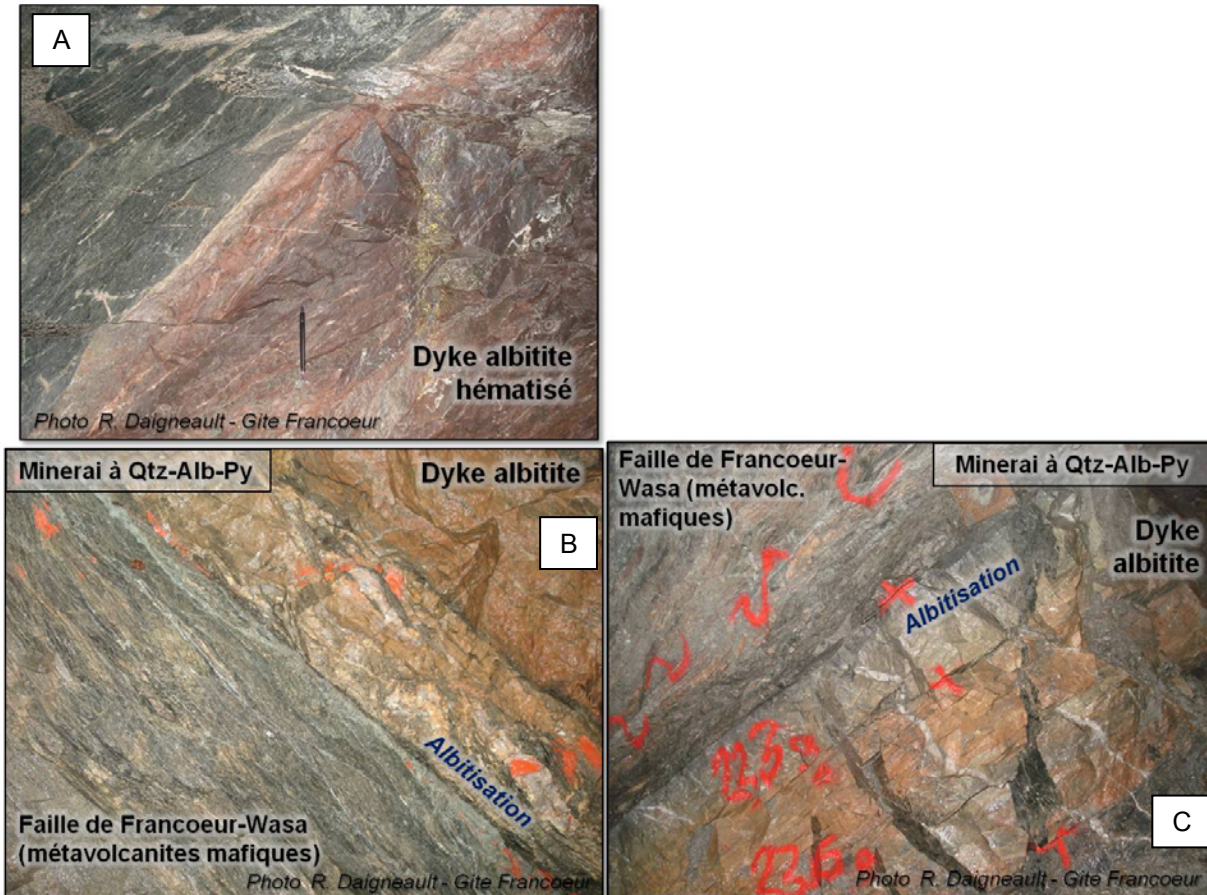
Ce champ constitue une sous-catégorie du champ précédent. La disposition de l'or est disséminée, mais on observe une association systématique avec un essaim de dykes d'albitite très singulier et caractéristique. Les gîtes dans lesquels se trouve ce type de minerai sont :

- Kerr Addison (*Albitite dyke ore* : 7,4 t Au)
- Francoeur (16,07 t Au)
- Wasamac (76,17 t Au)

**La masse aurifère totale de ce champ est de 99,64 t Au.** Les essais de dykes sont remarquablement importants. On dénombre à Kerr Addison plus de 5 000 dykes (10% du volume). L'épaisseur des dykes est décimétrique à métrique (moyenne 2 m à Kerr Addison). Ils sont recoupés par des veines et veinules de quartz sans lien significatif avec l'or. Leur texture est aphanitique et leur affinité alcaline. Toutefois, si les dykes d'albitite du secteur de Francoeur-Wasamac ont une signature en éléments immobiles (Y, Ti, Zr, Nb) très singulière (très alcalin et très différencié), ce n'est pas le cas de ceux de Kerr Addison qui forment sur un diagramme Zr/Ti vs Nb/Y un champ relativement vaste superposé à celui des autres intrusions alcalines tardi-tectoniques présentes le long de la FC. Ces dykes ont été datés à la mine

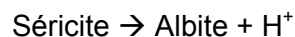
McIntyre à  $2\,676,5 \pm 1,6$  Ma et  $2\,672,8 \pm 1,1$  Ma (Ayer et al., 2005). Ils sont donc associés à l'évènement plutonique régional alcalin décrit au chapitre précédent.

Les dykes d'albite sont injectés dans des schistes méta-komatiitiques très foliés, souvent altérés en carbonate – fuschite (*green carbonates*). Ils sont tardi-cinématiques, clairement associés aux failles ductiles, qui les déforment légèrement. Ils ne sont toutefois pas strictement parallèles au grain mylonitique mais ont un pendage plus abrupt.



**Figure 14.** A), B) et C) Minerai du champ « dykes d'albite », Mine Francoeur.

Le minerai est à quartz – albite – pyrite, avec une altération proximale albitique très typique. L'altération plus distale est à carbonate – séricite – hématisée spéculaire puis, plus distale encore, à muscovite – chlorite. Cette albitisation proximale, visible sur les **Figure 14 B) et C)** au contact des dykes dans la mylonite encaissante, est directement impliquée dans le processus de précipitation aurifère de par la réaction (Kishida et Kerrich, 1987).



La diminution subséquente du pH de la solution diminue la solubilité de l'or et favorise la précipitation de la pyrite (Couture et Pilote, 1993).

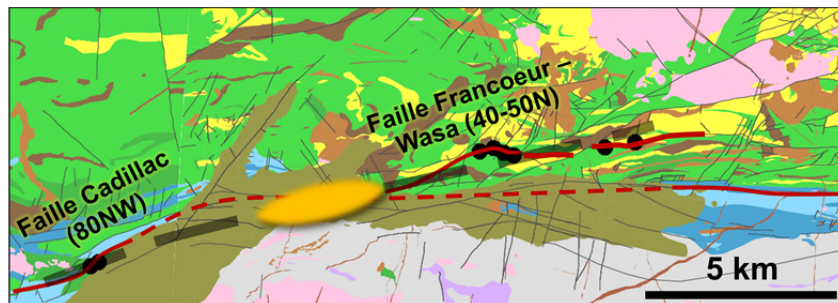
Enfin, Couture et Pilote (1993) mettent en avant le rôle de la préparation de terrain sur les dykes, constituant un piège redox généré par la réaction précoce magnétite → hématisée

(augmentation  $fO_2$ , hématisation précoce visible sur la **Figure 14 A**), cette dernière étant subséquemment remplacée par la pyrite.

À Kerr Addison, où ce minerai est appelé *Albitite Dyke Ore*, Smith et al. (1993) font les observations suivantes :

1. Les dykes sont très étroitement liés aux altérations et veines, en termes de distribution spatiale et d'intensité. Selon l'auteur, magmas et fluides emprunteraient le même *feeder zone* marqué par une intensité maximale sur 300 x 25-50 m, à 2 000 m de profondeur. L'auteur avance donc un lien génétique et l'existence d'une source intrusive commune;
2. Le volume total des dykes ( $\approx 0,01 \text{ km}^3$ ) est insuffisant pour produire le volume d'or contenu dans le gîte. Supposant un coefficient de partage magma-fluide de 50 % et une concentration magmatique moyenne de 7 à 35 ppb Au, le volume de l'intrusion-source serait entre 6 et 30  $\text{km}^3$ , soit une dimension moyenne d'intrusion tardi-tectonique alcaline. Cette source serait enfouie sous le gîte à plus de 4 km.

L'alignement des gîtes Francoeur, Wasamac, de la Faille Francoeur-Wasam (décalée par des failles tardives), avec le gîte Kerr Addison, est digne de mention (**Figure 15**). On sait que dans ce secteur, le Cobalt masque une limite entre deux segments structuraux de la FC, au niveau de son intersection avec une structure majeure NNE masquée (la « Faille Sous-Cobalt », voir plus section précédente). Il est donc délicat de postuler une continuité des structures. Toutefois, l'analogie totale des styles observés à Kerr Addison (*Albitite Dyke Ore*) et dans le secteur Francoeur-Wasamac, de part et d'autre du Cobalt, et les relations d'alignement évoquées ci-dessus, suggèrent fortement cette continuité (métallogénique, structurale ?). Suivant l'hypothèse orthomagmatique avancée par Smith et al. (1993), dykes et fluides hydrothermaux émaneraient d'une source commune enfouie à environ 4 km. Il est vraisemblable que la présence de cette (ces) intrusion(s) alcaline(s) soi(en)t reliée(s) à une structure ENE reliant les deux secteurs sous le Cobalt.



**Figure 15.** Alignement ENE des gîtes du champ « Dykes Albitite ». En orange : position hypothétique (en profondeur) de l'intrusion alcaline syn-cinématique produisant les essaims de dykes d'albitite (géologie modifiée de SIGÉOM 2011, voir figure 12 pour référence).

Quoiqu'il en soit, les dykes d'albitite constituent, dans les secteurs environnant l'axe Wasamac – Kerr Addison (c'est-à-dire en partie sous le Cobalt), des guides d'exploration d'intérêt.



### 4.3 Le champ « *Stockwork* tabulaire – carbonates – fuschite »

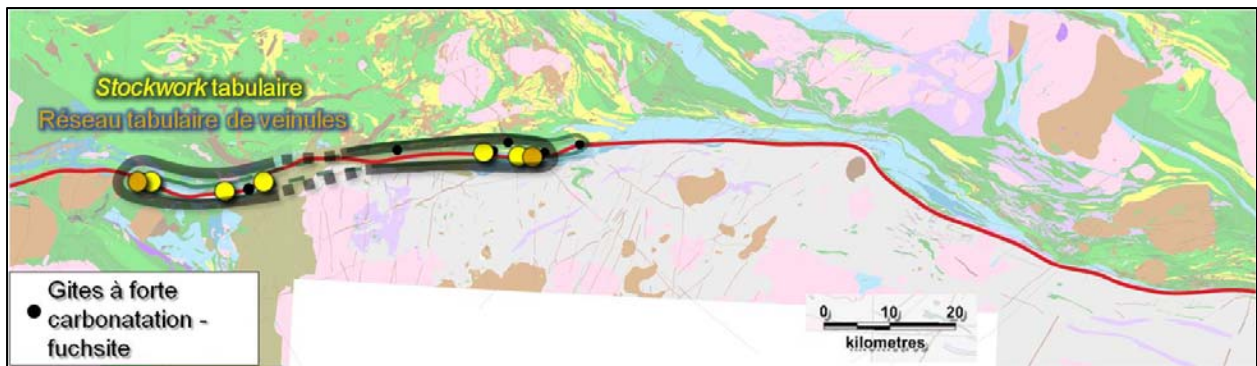
Le champ « *Stockwork* tabulaire – carbonates – fuschite » (**Figure 16**) a les caractéristiques suivantes :

**Tableau 4.** Caractéristiques discriminante du champ « *Stockwork* tabulaire – carbonates – fuschite ».

Champ « <i>Stockwork</i> tabulaire – carbonates – fuschite »	
Sulfures	<b>Peu abondants à absents;</b>
Altération	Forte altération carbonatée + fuschite (mica chromifère);
Organisation Au	<b>Réseau tabulaire de veinules ou <i>stockwork</i> tabulaire;</b>
Encaissant	<b>Métavolcanites ultramafiques.</b>

Il regroupe les gîtes suivants :

- Bazooka
- Augmitto (6,66 t Au)
- Lac Pelletier (5,39 t Au)
- Astoria (11,62 t Au)
- Lac Fortune
- Lac Bouzan
- Kerr Addison (*carbonate ore* : 117,5 t Au)
- Barber-Larder
- Anoki (5,06 t Au)
- McBean (17,5 t Au)
- Cheminis (8,41 t Au)



**Figure 16.** Champ « *Stockwork* tabulaire – carbonates – fuschite».

**La masse aurifère totale de ce champ est 172,14 t Au.** Elle est essentiellement due au gîte Kerr Addison, bien que ne soit compté que le minerai du *carbonate ore*. Ce champ contient toutefois plusieurs gîtes aux volumes non négligeables tels qu’Astoria, McBean et Cheminis (**Tableau 5**). À l’instar de Kerr Addison, ces gîtes contiennent aussi du minerai de style « sulfures disséminés », toutefois le tonnage métal considéré ici est celui de l’ensemble du gîte, les tonnages des différents minerais n’ayant pas été distingués dans les descriptions. Il y a donc redondance avec les tonnages donnés plus haut.

**Tableau 5.** Caractéristiques des gîtes du champ « *Stockwork* tabulaire carbonates fuschite».

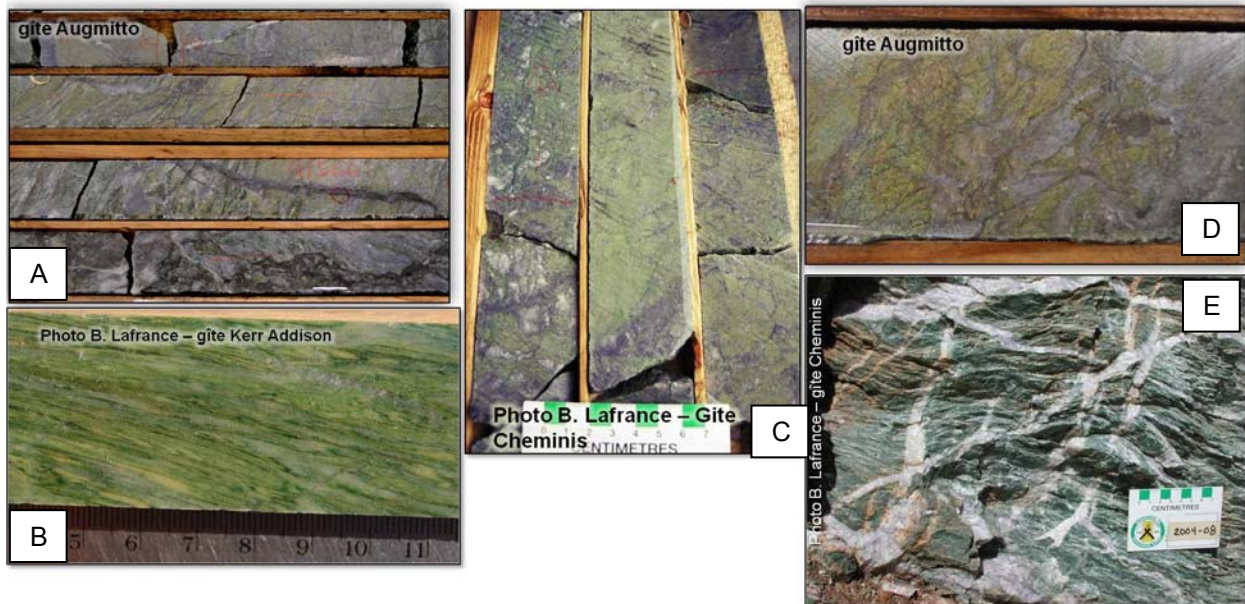
Nom	Disposition	Encaissant	Altération	Sulfures
<b>Kerr Addison</b> ( <i>carbonate ore</i> 117,5 t Au)	Stockwork tabulaire (qtz) N60 80NO	Encaissant métavolcanites ultramafiques (Tisdale)	Très forte altération carbonatée – fuschite	Pas de sulfures, or libre
<b>Augmitto (6,66 t Au)</b>	<i>Stockwork</i> tabulaire (qtz) N90 60-75N	Encaissant métavolcanites mafiques et ultramafiques (Piché) et sédiments clastiques du Timiskaming	Très forte altération carbonatée (localement 50%) – fuschite	Sulfures : arsénopyrite (localement pyrite – pyrrhotite) liée à la proximité des sédiments Tourmaline (veines encaissées dans les sédiments)
<b>Lac Pelletier (5,39 t Au)</b>	Réseaux tabulaires de veinules (qtz) parallèles ± bréchifiés	Encaissant mafiques felsiques et mafiques (Blake River)	Altération carbonate – fuschite – séricite	1-3 % pyrite (aux éponges)
<b>Astoria (11,62 t Au)</b>	<i>Stockwork</i> tabulaire (qtz) N90 60-80N	Encaissant métavolcanites mafiques et ultramafiques (Piché) et sédiments clastiques du Timiskaming	Très forte altération carbonatée – fuschite (+ séricite)	Présence de sulfures : arsénopyrite, gerdsfordite, pyrite, chalcopryrite Or libre
<b>Bazooka (sans tonnage)</b>	Veines (max 2 m) et veinules formant un couloir ép. métrique N90 55-65N	Encaissant métavolcanites mafiques et ultramafiques (Piché)	Forte altération carbonatée et silicifiée, fuschite, tourmaline locale	Présence de sulfures : pyrite, arsénopyrite ± chalcopryrite
<b>Lac Fortune</b>	Veines de qtz // S0 (volcanites intermédiaires Blake River)		Carbonates – fuschite (tourmaline, séricite, chlorite)	Pyrite, chalcopryrite
<b>Lac Bouzan</b>			Carbonatation remarquablement forte	
<b>Anoki (5,06 tAu)</b>	Réseaux tabulaires de veines-veinules (qtz) N110 50S	Encaissant lentilles ultramafiques intercalées dans sédiments clastiques	Très forte altération carbonatée – fuschite	Volc. ultramafiques : pas de sulfures; sédiments : pyrite
<b>Mc Bean (17,5 t Au)</b>	<i>Stockwork</i> tabulaire (qtz) N270 60S	Encaissant métavolcanites ultramafiques (Tisdale)	Très forte altération carbonatée – fuschite	Pas de sulfures, or libre
<b>Cheminis (8,41 t Au)</b>	<i>Stockwork</i> tabulaire (qtz-carb) N55 80SE	Encaissant métavolcanites ultramafiques (Tisdale)	Très forte altération carbonatée – fuschite (+ alb – chl)	Pas de sulfures, or libre

On retient les variations suivantes :

- Nature de l'encaissant (métavolcanites ultramafiques du Tisdale et du Piché, métavolcanites mafiques du Piché, roches sédimentaires clastiques du Timiskaming);
- Minéralogie des sulfures : pyrite, arsénopyrite, ± chalcopryrite;

- Silicification et présence de tourmaline.

On voit sur la **Figure 17** l'allure très caractéristique de ce minerai, dont sont particulièrement visibles le *stockwork* (localement déformé comme sur la **Figure 17 B**) et la fuschite (minéral vert). La présence de fuschite est directement liée à l'encaissant ultramafique riche en chrome. Toutefois, cette association n'est pas universelle : plusieurs gîtes le long de la FC encaissés au moins partiellement dans des roches ultramafiques et passablement altérés ne contiennent pas de fuschite (notamment dans les Formations de Jacola et de Dubuisson). L'encaissant ultramafique est donc une condition nécessaire mais non suffisante à la présence de fuschite. Celle-ci est selon toute vraisemblance génétiquement reliée à la carbonatation très intense qui l'accompagne systématiquement dans ce style gîtologique. De fait, dans ce contexte ce minéral est un critère d'exploration à ne pas négliger.



**Figure 17.** Minerai *stockwork* à carbonates – fuschite. A) et D) gîte Augmitto, B) gîte Kerr Addison, photo Bruno Lafrance, C) et E) gîte Cheminis, photo Bruno Lafrance.

À l'opposé du champ « Sulfure disséminés » décrit précédemment, ce minerai s'accompagne d'une augmentation de volume colossale matérialisée par l'abondance de veinules de quartz. À Kerr Addison, le volume du *stockwork* atteint 50% du volume rocheux (Smith et al., 1993). Par ailleurs ce minerai ne contient, dans la plupart des cas, que très peu de sulfures. Le modèle classique de précipitation aurifère par sulfurisation (co-précipitation pyrite, voir plus haut) est donc inapplicable. Il s'agit d'un piégeage aurifère de nature physique, impliquant des changements de propriétés physiques du fluide. La précipitation aurifère est provoquée par la séparation des phases  $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$  (ébullition) aux niveaux inférieurs du gîte. Ceci a pu être confirmé par inclusions fluides à Kerr Addison, environ 1000 m sous le cœur du *stockwork* aurifère (Channer et Spooner, 1991). Cette séparation des phases en profondeur induit une augmentation drastique de la pression de fluide translatant les trois contraintes principales dans le champ de la tension, ce qui correspond aux conditions mécaniques d'un *stockwork* (dilatation suivant les trois axes du volume). La dépressurisation consécutive à cette explosion s'accompagne de la précipitation de l'or (Smith et al., 1993).

#### 4.4 Le champ « Faille Ruisseau Davidson – Flexure Cadillac »

Les caractéristiques du champ « Faille Ruisseau Davidson – Flexure Cadillac » sont les suivantes :

**Tableau 6.** Caractéristiques discriminante du champ « Faille Ruisseau Davidson – Flexure Cadillac ».

Champ « Faille Ruisseau Davidson – Flexure Cadillac »	
Sulfures	Assemblage pyrite-arsénopyrite, <b>pyrrhotite</b> ; relativement abondants (globalement 10-15 %);
Altérations	<b>Biotite</b> (aux extrémités du champ);
Organisation Au	Veines semi-massives ou réseaux de veinules;
Remarques	1) aux contacts d'intrusions tabulaires multi-métrique parallèles à la foliation mylonitique injectés dans les schistes de la FC; 2) aux contacts cisailés des formations de fer.

Les gîtes qu'il contient sont les suivants :

- Lapa (Zupala 20,95 t Au et Tonawanda 7,26 t Au)
- Pandora (0,84 t Au)
- Wood Cadillac (1,1 t Au)
- Central Cadillac (4,45 t Au)
- New Alger (0,5 t Au)
- O'Brien (18,3 t Au)
- Joanna (Héva 22,3 t Au et Hosco 80,27 t Au)
- Bouzan-Or (sans tonnage)
- Maracambeau (sans tonnage)
- Doceur (0,071 t Au)
- Paquin (0,29 t Au)
- Calder Bousquet (0,91 t Au)
- Cavanagh (sans tonnage)
- Ruisseau Davidson (sans tonnage)
- Highbank (sans tonnage)
- Davidson Creek (sans tonnage)

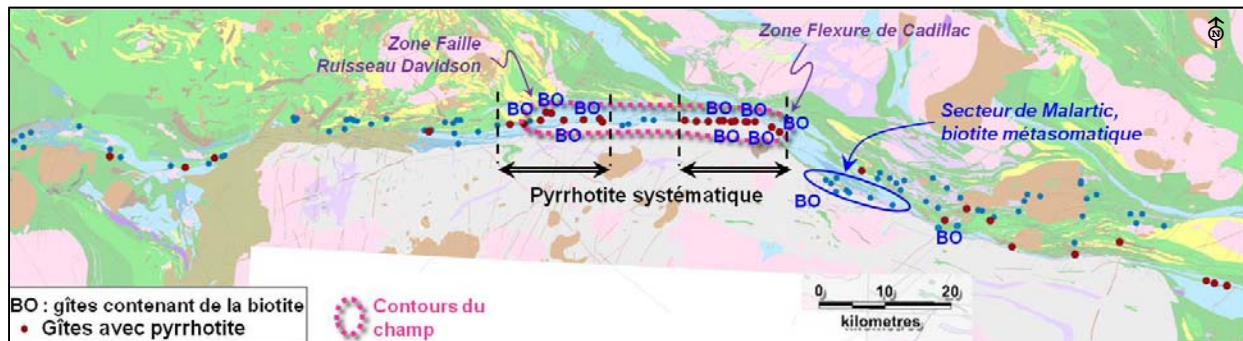
**La masse totale Au de ce champ est de 157,24 t Au.** La plupart des gîtes sont de faible volume, à l'exception des gîtes Lapa Zupala, O'Brien et Joanna, gisements majeurs, tous situés proche des extrémités du champ.

Ce champ occupe un segment structural de la FC long d'une quarantaine de km qui s'étend de la Zone Flexure de Cadillac à l'intersection de FC avec la Faille transversale Ruisseau Davidson. Il est caractérisé par :

1. La rectitude de sa trace (très linéaire, pas de virgation, pas d'inflexion),
2. L'absence de ramifications,
3. Des encaissements sédimentaires de part et d'autre (Formation de Cadillac au nord et Groupe de Pontiac au sud).



La distribution de la pyrrhotite dans les gîtes aurifères associés au corridor de la FC est illustrée à la **Figure 18**. Il est remarquable que tous les gîtes suffisamment documentés situés le long de ce segment structural contiennent de la pyrrhotite, tandis que sa distribution est beaucoup plus sporadique et hétérogène ailleurs. Les gîtes situés au centre du champ dans lesquels la pyrrhotite n'est pas rapportée (Decoeur, Paquin, Calder-Bousquet, Cavanagh) sont extrêmement mineurs et très mal documentés (indice de qualité de la documentation < 2/5, contre > 4/5 dans les autres gîtes). Ce secteur, situé au milieu du segment structural, ne semble pas contenir de minéralisation significative.



**Figure 18.** Champ « Faille Ruisseau Davidson – Flexure Cadillac ».

La désulfurisation de la pyrite  $\text{FeS}_2$  au profit de la pyrrhotite  $\text{FeS}$  se produit à partir de  $350^\circ - 400^\circ \text{C}$  (e.g., Tomkins et al, 2006):



L'équilibre pyrite-pyrrhotite est donc un indicateur de conditions thermique (à  $f\text{O}_2$  et  $f\text{S}_2$  constantes). Tandis que la présence sporadique de pyrrhotite dans les camps de Val-d'Or et de Kerr Addison (**Figure 18**) peut être attribuée à des variations locales des conditions chimiques  $f\text{O}_2$ ,  $f\text{S}_2$ , il est raisonnable de relier sa présence systématique le long du segment structural Davidson - Cadillac à des conditions thermiques globalement plus élevées, au-dessus de l'isograde pyrite-pyrrhotite.

Cette conclusion est corroborée par la présence de biotite dans ce secteur. À l'inverse, la biotite systématiquement observée dans le secteur de Malartic est attribuée à un gain métasomatique en potassium, conclusion soutenue par les données géochimiques (bilans de masse) et par la présence de feldspath potassique hydrothermal. Ces points seront abordés plus loin, lors de l'introduction du champ de Malartic.

La plupart des gîtes situés dans ce champ sont spatialement reliés à des intrusions injectées dans le Groupe de Piché. Il s'agit certainement ici d'une relation *passive*, reliée au contraste rhéologique de ces intrusions avec les métavolcanites mafiques et ultramafiques encaissantes. De par leur plus forte compétence, les intrusions se fracturent créant ainsi une perméabilité autorisant le drainage des fluides hydrothermaux. Par ailleurs, la déformation différentielle entre les roches rhéologiquement contrastées génère typiquement des ouvertures (dilatation) le long des contacts intrusifs. La nature géochimique de ces intrusions n'est pas clairement établie. Les descriptions de terrain rapportent une variété de compositions : porphyre feldspathique, porphyre quartzo-feldspathique, albitite, diorite à quartz, diorite. Elles seraient vraisemblablement précoces (anté-Au), et d'affinité probablement calco-alcaline (le terme albitite serait alors abusif) si l'on se base sur les types de minéralisations qui ne présentent

aucune des caractéristiques chimiques de celles associées avec des intrusions alcalines ailleurs sur la FC.

Le Groupe de Piché disparaît sur une quinzaine de kilomètres au centre du champ et dans sa partie ouest. La FC y est encaissée directement dans les roches sédimentaires. Il y a donc disparition des intrusions, à l'exception du secteur de Joanna où l'on trouverait des intrusions de puissance métrique encaissées dans les roches sédimentaires. Ceci explique probablement que les gîtes de Joanna soient les seuls gîtes importants de cette portion du segment.

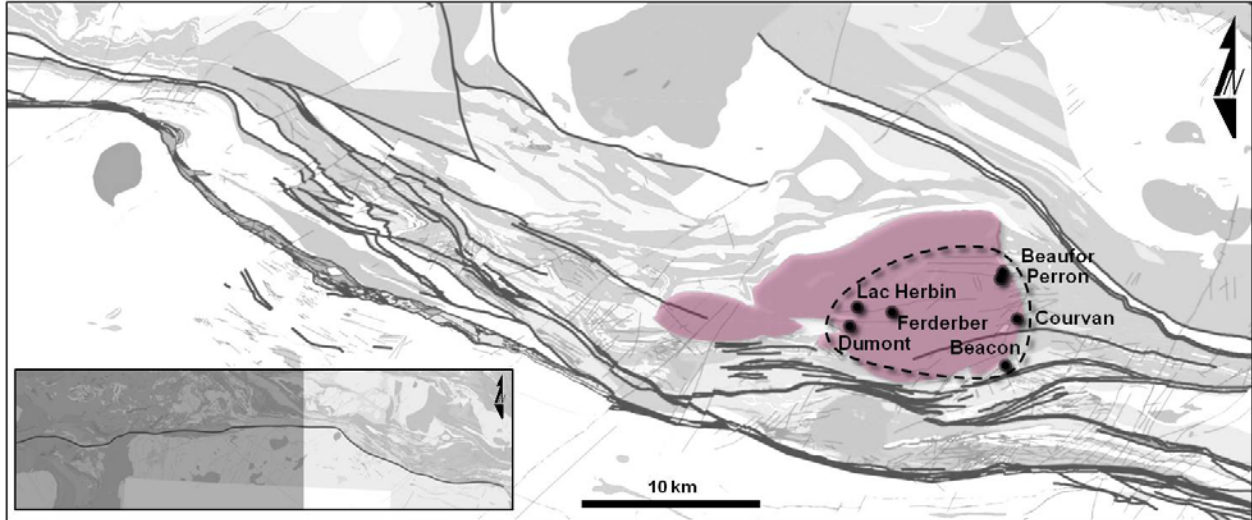
#### 4.5 Le champ « Bourlamaque »

**Tableau 7.** Caractéristiques discriminante du champ « Bourlamaque ».

<b>Champ de « Bourlamaque »</b>	
Gangue	Quartz-carbonates- <b>tourmaline</b> -chlorite, faible albite, <b>scheelite</b> ;
Sulfures	<b>Pyrite-chalcopyrite abondantes (jusqu'à 30 %)</b> ; Au intimement lié à la pyrite (teneurs proportionnelles);
Altérations	Zonées et restreintes (< 1 m : albite et carbonates-séricite; ~10 m : séricite-chlorite);
Bilans de masse	Lessivage alcalin (partie S du Bourlamaque, voir <b>Figure 10</b> ), même empreinte que la Formation de Val-d'Or;
Organisation Au	Veines semi-massives et massives de puissance décimétrique à métrique, associées aux <b>failles E-O à ENE-OSO</b> ; les veines sont parallèles aux failles et subhorizontales suivant un style andersonien relié à l'homogénéité et l'isotropie des encaissants;
Encaissant	Pluton de Bourlamaque (diorite à quartz) syn-volcanique.

Ce champ est constitué des gîtes suivants (**Figure 19**) :

- Ferderber (6,29 t Au)
- Beaufor (1,19 t Au)
- Perron (15,07 t Au)
- Dumont (4,51 t Au)
- Lac Herbin (3,66 t Au)
- Beacon
- Courvan (1,3 t Au)



**Figure 19.** Contours du champ « Bourlamaque » (trait noir pointillé) et gîtes. La forme rose correspond à l'intrusion de Bourlamaque. L'encart en bas à gauche permet de situer la figure dans le cadre régional de la FC.

**Le poids métal total de ce champ est de 32,02 t Au.** Il ne contient pas de gîte majeur, à l'exception du gîte Perron. L'abondance de sulfures, notamment de chalcopryrite, constitue une caractéristique très singulière de ce champ, en comparaison aux autres gîtes de la FC. La richesse en cuivre pourrait éventuellement être attribuée à un héritage de minéralisations volcanogènes encaissées dans les volcanites tholéitiques sous-jacentes, notamment la Formation de Val-d'Or qui contient plus au S l'important sulfure massif volcanogène (SMV) de Louvicourt. Cette hypothèse est soutenue par les levés gravimétriques réalisés par Jébrak et al. (1991) qui démontrent la faible épaisseur de l'intrusion de Bourlamaque. Il est donc plausible que des SMV soient situés à faible profondeur sous les gîtes aurifères encaissés en surface dans l'intrusion de Bourlamaque. En contrepartie, la prolongation sous l'intrusion du contact stratigraphique entre les Formations de Jacola et de Val-d'Or devrait passer très au S de l'intrusion, si bien que l'essentiel du Bourlamaque serait encaissé dans les Formations de Jacola et de Dubuisson connues plus à l'ouest comme étant très aurifères (gîtes de Marban, Norlartic, Siscoe, Wesdome, Kiena, Goldex, Kierens, Callahan, Shawkey et Jacola).

Une autre caractéristique remarquable de ces gîtes est la forte corrélation quantitative entre la pyrite et l'or, suggérant un dépôt aurifère par sulfuration (voir section précédente), tandis que les gîtes suscités, situés plus à l'ouest, sont pauvres en sulfures et ne montrent pas de telle corrélation.

D'autre part, les gîtes de ce champ sont encaissés soit directement dans des failles ductiles à cassantes, soit le long de la bordure de l'intrusion qui est le plus souvent elle-même cisailée (A. Tremblay, *comm. pers. orale*). Les failles sont E-O à ENE-OSO et présentent typiquement une fabrique ductile (mylonitique) recoupée par une fabrique ductile-cassante (structures C-S, etc.) elle-même recoupée par des déformations tardives cassantes (gouges) associées à des altérations argileuses. Les linéations d'étirement précoces sont systématiquement abruptes, témoignant d'un régime compressif. Le synchronisme de ces déformations avec les minéralisations aurifères n'est pas établi, bien que les veines subhorizontales (aurifères) associées aux failles E-O soient cohérentes avec un tel contexte tectonique. De par leur extension horizontale plurikilométrique, il ne fait aucun doute que ces failles traversent

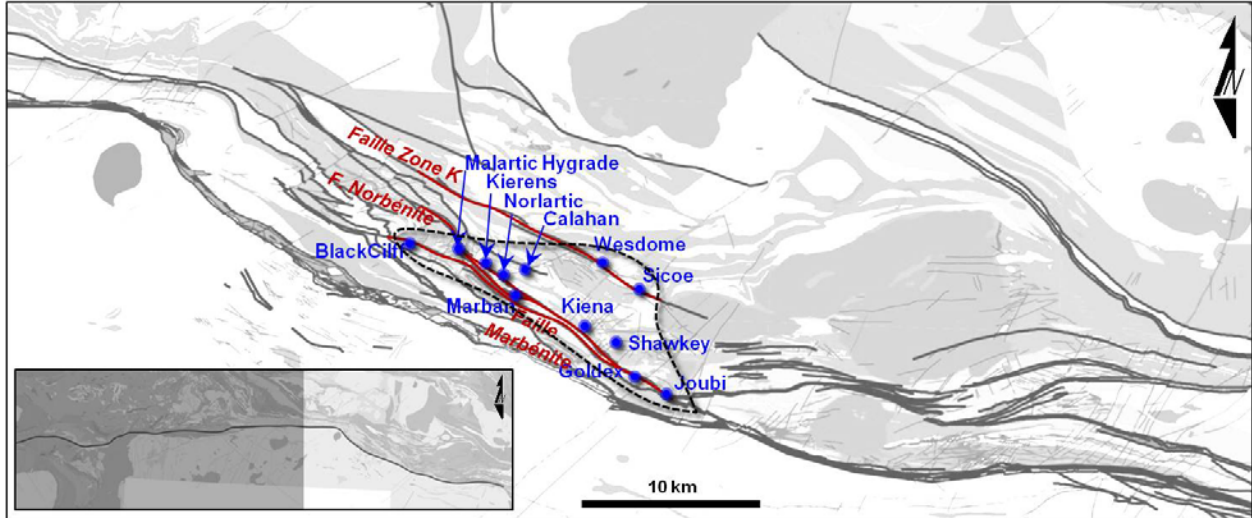
l'intrusion, et s'enracinent dans les volcanites sous-jacentes. Elles sont d'ailleurs parallèles à la fabrique régionale (S0-S1) des Formations de Val-d'Or et de Héva affleurant au S. Il s'agit donc de l'expression superficielle de couloirs de cisaillement régionaux. Dans certaines interprétations, la Faille de Ferderber est vue comme la prolongation orientale de la Faille Zone K, aurifère, portant les gîtes Siscoe, Wesdome et Sullivan. Ces failles sont injectées de nombreux dykes métriques très déformés de composition sensiblement identique à l'intrusion de Bourlamaque. Il est probable que le rôle de ces dykes dans le piégeage aurifère soit physique et chimique pour les raisons suivantes:

1. Ils génèrent une anisotropie propice au développement de zones de dilatation aux intersections avec les failles en relation oblique;
2. Ils sont plus riches en fer que l'encaissant et provoquent par conséquent la coprécipitation pyrite-Au (Roussy, 2003), soit par incorporation de Fe dans le fluide soit par remplacement des minéraux ferrifères aux épontes de veines.

#### 4.6 Le champ « Norbénite, Marbénite, Zone K »

**Tableau 8.** Caractéristiques discriminantes du champ « Norbénite, Marbénite, Zone K ».

Champ « Norbénite, Marbénite, Zone K »	
Gangue	Quartz ± carbonates- <b>albite</b> -chlorite, faible tourmaline;
Sulfures	<b>Pyrite (&lt;5 %)</b> , traces pyrrhotite, chalcopyrite rare. Lien Au – Py moins marqué que dans le champ de Bourlamaque;
Bilans de masses	<b>Gain Na, lessivage K;</b>
Organisation Au	Dominance veines – veinules ± brèches;
Encaissant	<b>Intrusions felsiques - intermédiaires calco-alkalines</b> injectées à la faveur de failles ESE à E-O (textures porphyrique, microgrenue ou aphanitique, puissance hectométrique) et dans les schistes ultramafiques;
Remarque	Pas de signature hydrothermale magmatique caractéristique, modèle non-orthomagmatique.



**Figure 20.** Contours du champ « Failles Norbénite, Marbénite, Zone K » (trait noir pointillé) et gîtes (en bleu). L'encart en bas à gauche permet de situer la figure dans le cadre régional de la FC.

Il inclut les gîtes suivants :

- Norlartic (19 t Au)
- Malartic Hygrade (2,24 t Au)
- Kierens (6,21 t Au)
- Callahan (2,25 t Au)
- Kiena (38,68 t Au)
- Siscoe (27,5 t Au)
- Marban (50,23 t Au)
- Wesdome (21,06 t Au)
- Shawkey (0,72 t Au)
- Black Cliff (1,07 t Au)
- Goldex (101,54 t Au)
- Joubi (1,95 t Au)

**Avec un total de 272,45 t Au**, ce champ est le quatrième champ le plus prolifique de la FC. Il contient six gisements majeurs (> 10 t Au) dont un géant (>100 t Au).

D'un point de vue chimique, ce champ est affecté par un lessivage de  $K_2O$  qui s'oppose à un fort gain absolu en  $Na_2O$  (bilans de masse, voir **Figure 10**). Ce gain en  $Na_2O$  est confirmé sur le terrain par la présence d'albite en remplissage de veines, rapportée fréquemment dans les descriptions de gîtes.

Les sulfures sont peu abondants, essentiellement représentés par la pyrite, et montrent une faible corrélation quantitative avec l'or : plusieurs veines à haute teneur ne contiennent pas de sulfures. Cette caractéristique oppose ce champ gîtologique à celui de Bourlamaque. Ceci traduit vraisemblablement différents processus de piégeage aurifère, dominés dans un cas par la sulfurisation (relation quantitative pyrite-Au), dans l'autre possiblement par des changements de conditions physiques (P, T) du fluide.



Les gîtes de ce champ ne présentent aucune évidence classique d'influence hydrothermale magmatique (poly-métallisme, présence de molybdène, altération potassique, etc.). Suivant certaines interprétations, le gain en Na<sub>2</sub>O, et la présence d'albite, pourraient toutefois s'intégrer dans une zonation hydrothermale magmatique, dont ils constitueraient la zone d'altération propylitique distale (p. ex. Jébrak et Marcoux, 2008). Cette zonation serait possiblement centrée sur le secteur de Malartic puisque l'on y retrouve l'auréole potassique caractéristique des altérations proximales. Ce modèle régional orthomagmatique demeure spéculatif à ce stade. D'après la dimension de l'auréole distale, l'intrusion en profondeur devrait avoir une extension pluri-kilométrique. Par ailleurs, la géométrie des champs hydrothermaux parallèles au grain et aux structures régionales ESE (**Figure 10**) suggère qu'une telle zonation hydrothermale, si elle pourrait émaner d'une source magmatique, subirait dans sa mise en place un fort contrôle tectonique. Ceci est cohérent avec le caractère syn-cinématique des intrusions de Malartic.

Pour finir, les gîtes du champ gîtologique des « Failles Norbénite, Marbénite, Zone K » montrent une relation spatiale avec une série d'intrusions longitudinales parallèles aux failles à la faveur desquelles elles s'injectent. Ces intrusions, felsiques-intermédiaires (tonalites, granodiorites...) correspondent à un évènement syn-tectonique calco-alkalin relativement précoce (>2685 Ma) décrit par Morasse et al. (1995). Notons la présence d'intrusions plus anciennes, synvolcaniques, mafiques (gabbros), d'affinité tholéitique. Ces différentes intrusions sont décrites en détail dans la section 1.3.4.

Les intrusions calco-alkalines sont de puissance métrique à décamétrique et d'extension hectométrique. Leurs relations avec la minéralisation aurifère semblent essentiellement *passive* : leur forte compétence leur confère une rhéologie plus cassante contrastant avec l'encaissant volcanique, conduisant au développement de perméabilités de fractures permettant le drainage des fluides.

#### 4.7 Le champ « Malartic »

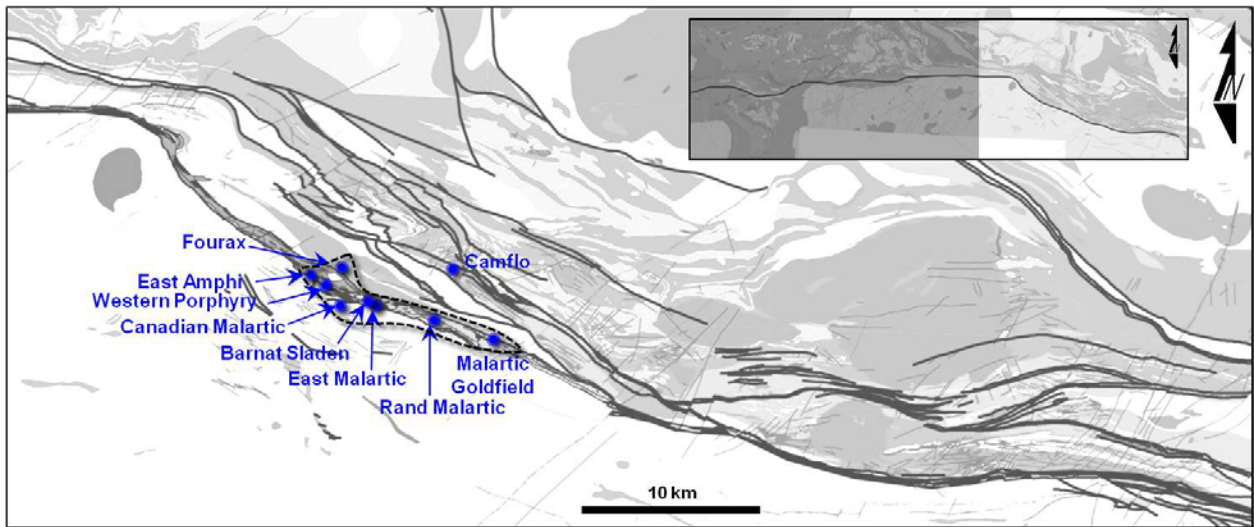
**Tableau 9.** Caractéristiques discriminantes du champ « Malartic ».

Champ « Malartic »	
Gangue	Quartz ± carbonates;
Sulfures	<b>Pyrite (&lt;5 %)</b> , faible <b>molybdénite-chalcopryrite</b> , trace galène et sphalérite, <b>pas d'arsénopyrite</b> (localement pyrite 15-20 % dans encaissant ferro-diorite);
Altération	<b>Très potassique</b> (microcline), biotite, forte silicification;
Bilans de masses	<b>Fort gain K, faible gain Na;</b>
Organisation Au	<i>Stockwork</i> quartz-carbonates le long des contacts intrusifs, sulfures disséminés dans les sédiments du Pontiac;
Encaissants	Roches sédimentaires clastiques du Pontiac (70 %) et intrusion porphyrique épizonale post-Pontiac (diorite à qtz, syénite);
Teneurs	Minerai à basse teneur (<5 g/t Au);
Remarque	<b>Empreinte hydrothermale à tendance magmatique</b> (plus polymétallique, fort métasomatisme K);

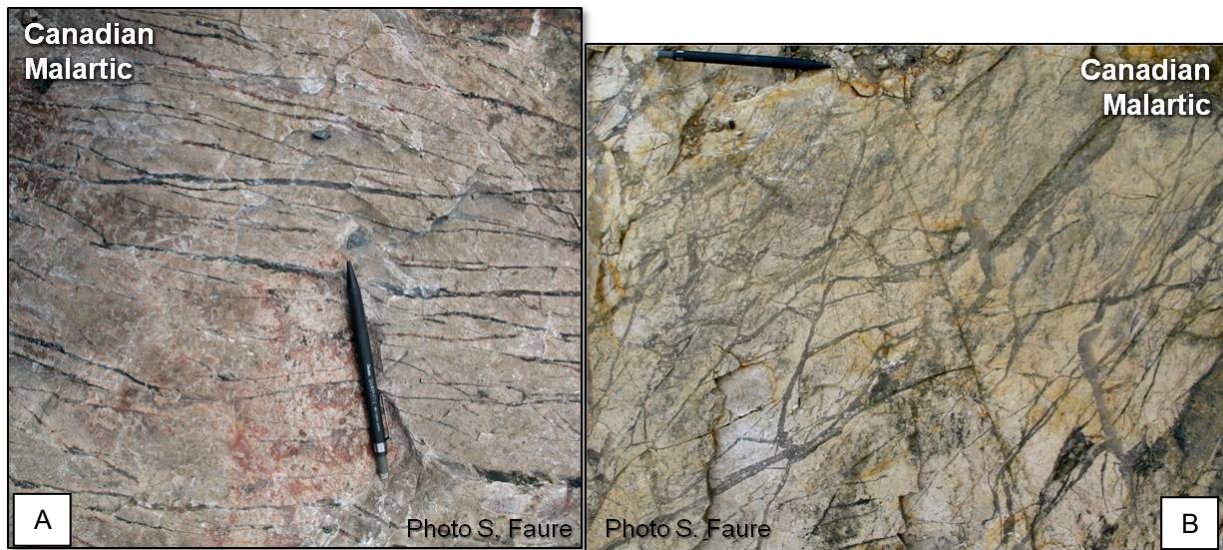
Il regroupe les gîtes suivants :

- Malartic Goldfield (52,9 t Au)
- Rand Malartic (8,83 t Au)
- Canadian Malartic, East Malartic, Barnat-Sladen (684,55 t Au)
- East Amphi (12,5 t Au)
- Western Porphyry (2,4 t Au)
- Fourax (0,66 t Au)
- Camflo (48,2 t Au)

**Avec une masse totale aurifère de 810,04 t Au**, ce champ est le plus prolifique de la FC. Outre le gîte « super géant » de Malartic, il contient trois gisements majeurs (> 10 t Au).



**Figure 21.** Contours du champ « Malartic » (trait noir pointillé) et gîtes (en bleu). L'encart en haut à droite permet de situer la figure dans le cadre régional de la FC.



**Figure 22.** A) et B) Stockwork de la mine Canadian Malartic.



À Malartic, les intrusions encaissant la minéralisation sont syn-cinématiques, de forme longitudinale lorsqu'elles sont injectées dans la FC, et plus massives dans les roches sédimentaires. Ces intrusions sont de petite dimension (hectométrique). Elles sont associées à un *stockwork* de quartz (**Figure 22 A) et B)**), ce qui indique des pressions de fluides suffisamment fortes pour translater les contraintes dans le champ de la tension suivant les trois axes principaux. Cette configuration est classique des contextes hydrothermaux magmatiques, produisant de gros volumes de fluide surpressurisé. Elle suggère que les intrusions épizonales et le *stockwork* affleurants sont les manifestations superficielles d'une intrusion mère plus volumineuse enfouie à quelques kilomètres de profondeur.

Ces *stocks* superficiels sont porphyriques. Leur composition est difficile à déterminer du fait de leur altération systématique, toutefois leur signature en éléments traces immobiles (Y, Zr, Nb, Ti) les situe dans le champ des roches alcalines et dans un champ de superposition des roches alcalines potassiques avec les roches subalcalines. Il s'agit vraisemblablement de monzonites et/ou syénites à quartz. Leur mise en place est datée à 2675 Ma (R. Wares, *comm. pers. orale*), ce qui les intègre parfaitement dans l'évènement régional alcalin tardi-tectonique décrit précédemment (section 1.3.4).

Les bilans de masse avec modélisation des précurseurs (projet 2009-01) montrent un fort gain en K<sub>2</sub>O généralisé dans ce champ gîtologique (**Figure 10**) très bien corroboré par l'altération potassique (microcline, biotite) communément observée sur le terrain. Suivant la zonation classique du modèle orthomagmatique, cette altération potassique est une auréole proximale, par opposition à l'auréole distale sodique qui pourrait être matérialisée par le champ «Norbénite, Marbénite, Zone K » décrit plus haut.

Certaines zones minéralisées de Malartic sont encaissées dans des intrusions dioritiques ferrifères plus mafiques et certainement plus précoces (calco-alcalines). Dans ce cas la sulfurisation intense permise par l'excès de fer produit un enrichissement en pyrite (jusqu'à 20 %).

Ailleurs, le contenu en sulfures est relativement faible. Ils sont représentés essentiellement par la pyrite, avec faible quantité de molybdénite et de chalcopyrite, et des traces de sphalérite et galène. Ce caractère polymétallique est en faveur du modèle orthomagmatique. La présence de molybdène, un élément très incompatible qui se concentre dans les fluides magmatiques hydrothermaux, constitue un autre indice suggérant fortement un modèle orthomagmatique. Il est intéressant de noter que la molybdénite se retrouve, le long de la FC, exclusivement à proximité des intrusions de l'évènement alcalin tardi-tectonique: au gîte Granada, aux indices situés sur l'intrusion de Baie Renault, au gîte Upper-Canada, aux gîtes de Kirkland Lake, au gîte Bidgood, et à Malartic. Ce minéral est à considérer le long de la FC comme un guide d'exploration de premier ordre.

L'arsénopyrite est absente de ce champ gîtologique tandis qu'on la retrouve systématiquement de part et d'autre le long de la FC en raison de la proximité des roches sédimentaires clastiques du Pontiac. Le champ de Malartic forme donc une rupture très flagrante dans la continuité de la présence d'arsénopyrite le long de la FC. Deux interprétations s'opposent : 1) L'évènement hydrothermal aurifère de Malartic a effacé les traces d'un hydrothermalisme régional antérieur associé à l'arsénopyrite; 2) l'évènement hydrothermal aurifère de Malartic crée un préconditionnement qui empêche l'arsénopyrite de précipiter lors de l'hydrothermalisme régional antérieur produisant ailleurs l'arsénopyrite. La première option nous semble plus vraisemblable. Nous verrons ci-dessous que la même configuration est observée à Kirkland Lake: rareté de l'arsénopyrite anormale compte-tenu de la proximité des roches sédimentaires

qui sont, partout ailleurs, associés à de l'arsénopyrite. Cette absence – ou rareté – d'arsénopyrite malgré la présence de roches sédimentaires pourrait donc aussi constituer un guide d'exploration à considérer, témoin d'un évènement hydrothermal local distinct.

#### 4.8 Le champ « Kirkland Lake »

Les gîtes de Kirkland Lake forment une zone minéralisée linéaire à peu près continue sur plus de cinq kilomètres. Ces gîtes constituent l'essentiel du champ gîtologique « Kirkland Lake », qui contient aussi les gîtes Bidgood et Amalgamated Kirkland.

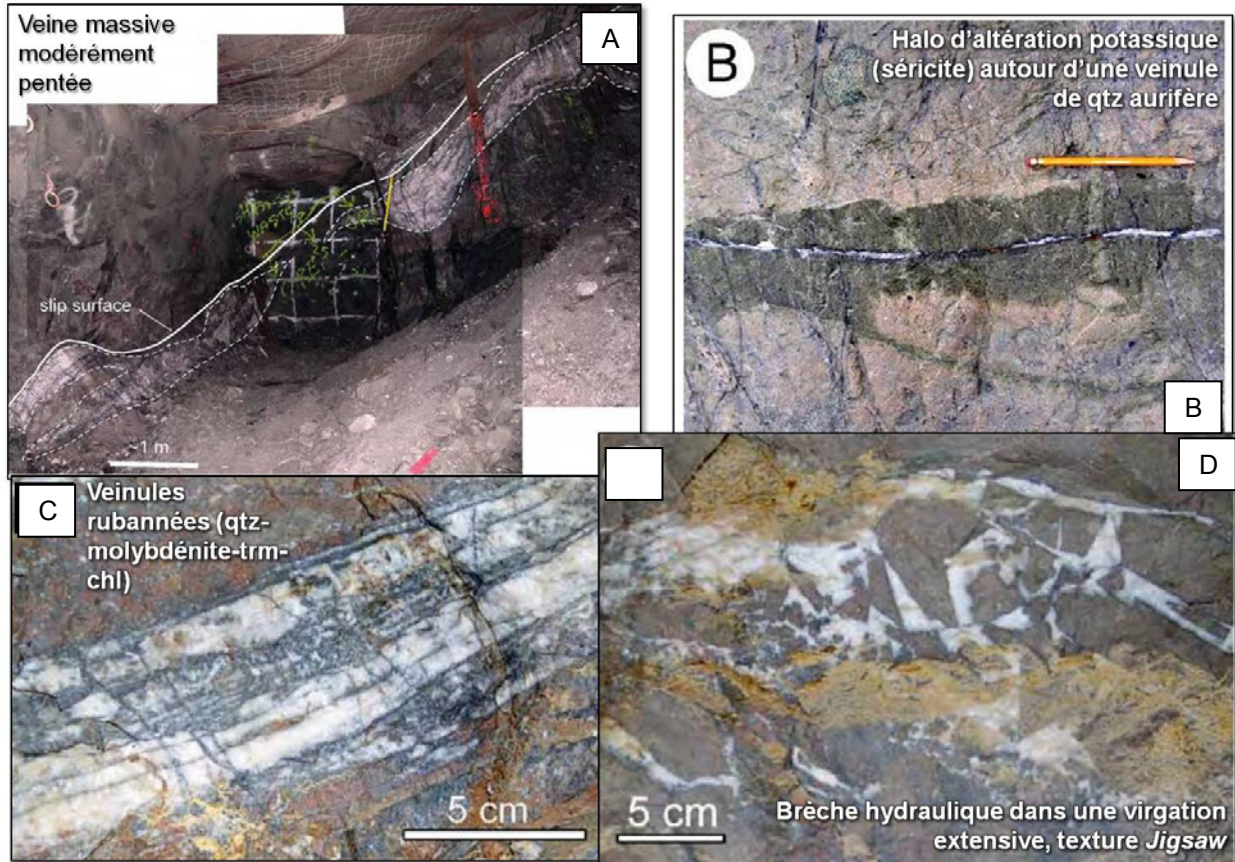
**Tableau 10.** Caractéristiques discriminantes du champ « Kirkland Lake ».

<b>Champ « Kirkland Lake »</b>	
Sulfures	<b>Peu de sulfures (2-3 %)</b> , pyrite, chalcopryrite, molybdénite, $\pm$ sphalérite, rare arsénopyrite;
Altération	Carbonatation modérée, séricitisation modérée <b>localement forte et intimement liée à la minéralisation</b> ; Altérations en silice, hématite et feldspaths K locales;
Organisation Au	<b>Veines de quartz</b> ( $\pm$ carbonates, séricite, feldspath K) <b>semi-massives décimétriques rubanées subparallèles à la foliation mylonitique</b> , brèches hydrauliques; Pendage des veines diminue (30°-40°) en s'éloignant de la zone mylonitique;
Encaissants	Essaim de dykes aphanitiques alcalins co-structuraux et <b>contemporains des veines aurifères</b> , appauvris en Zr par rapport aux syénites encaissantes;
Remarque	Au est libre (très faiblement lié aux sulfures); <b>Au est post-intrusions syénitiques.</b>

Il contient les gîtes suivantes :

- Macassa (109,6 t Au)
- Lake Shore (267,58 t Au)
- Wright Hargreaves (149,87 t Au)
- Teck Hughes (115,36 t Au )
- Amalgamated Kirkland (10,98 t Au)
- Bidgood (4,5 t Au)
- Sylvanite (4,58 t Au)
- Toburn (1,08 t Au)

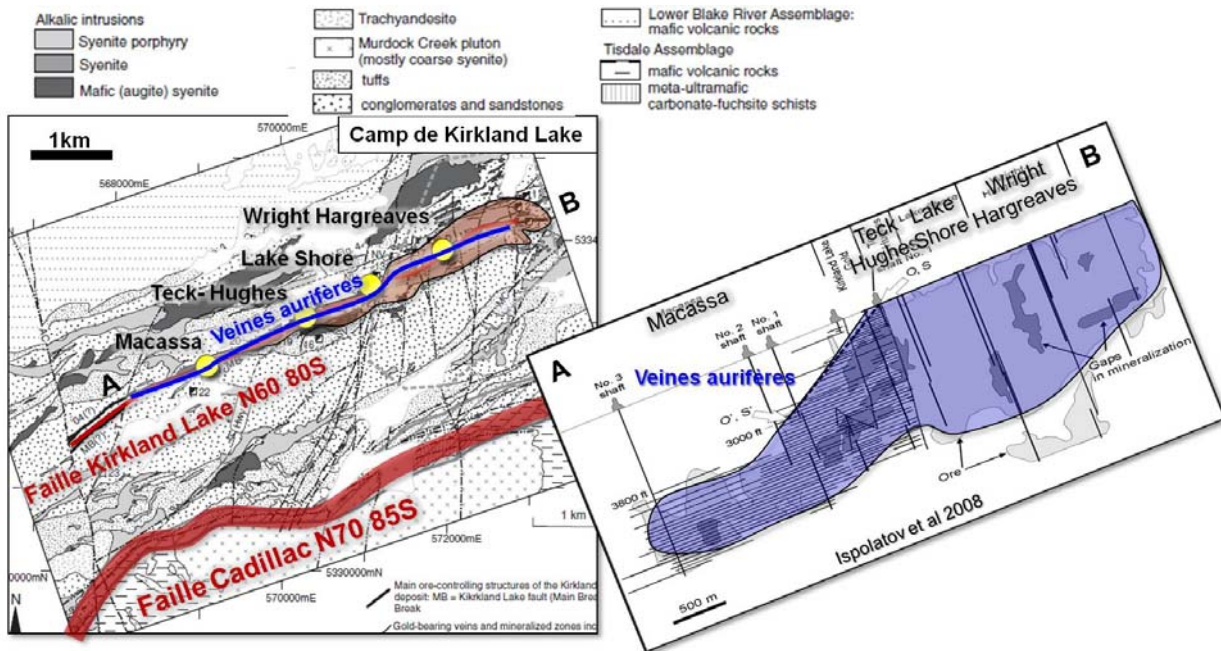
Le champ « Kirkland Lake » **constitue une masse aurifère totale de 663,55 t Au**. C'est donc le deuxième champ gîtologique le plus prolifique de la FC, derrière le champ « Malartic ».



**Figure 23.** A), B), C) et D) Veines des gîtes de Kirkland Lake, tiré d'Ispolatov et al. (2005).

Les veines aurifères de Kirkland Lake sont systématiquement associées à la Faille Kirkland Lake (FKK) comme l'illustre la **Figure 24**. La FKK est de loin la ramification de la FC la plus fertile. Il s'agit d'une structure N65 80°S, parallèle à la FC, de style ductile-cassant à cassant et de mouvement dextre-inverse. Elle présente de nombreuses gouges chloriteuses post-Au indiquant une activité cassante tardive, semblables aux gouges observées sur les failles du camp de Val-d'Or (en particulier celles encaissées dans l'intrusion de Bourlamaque). Autre similarité, les veines sont rubanées (**Figure 23 C**), injectées dans les failles avec un azimuth égal à celui du grain mylonitique, et un pendage soit égal (veines strictement *dans* la faille) soit plus faible et diminuant en s'éloignant de la faille (veines peu-pentées, *flats*, **Figure 23 A**). Ce schéma suggère : 1) un remplissage cyclique (typiquement associé à des pulsations sismiques), 2) un fort contrôle tectonique associé à l'évènement hydrothermal minéralisateur. La compression tectonique n'est pas « annulée » par la pression de fluide, et les contraintes effectives maximale et intermédiaire  $\sigma'_1$  et  $\sigma'_2$  demeurent en compression, autrement dit la pression de fluide est comprise entre  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$ . Ce contexte mécanique diverge fondamentalement de celui du gîte de Canadian-Malartic, où la présence du *stockwork* indique que les trois contraintes effectives principales sont en tension, autrement dit que la pression de fluide est supérieure à  $\sigma_1$ . Le gîte Canadian-Malartic s'est donc formé à des pressions de fluide très supérieures à celles des gîtes de Kirkland Lake, ou alors dans des conditions crustales beaucoup plus superficielles (pression lithostatique  $\sigma_3$  plus faible) ce qui est moins plausible. Cette divergence structurale se place toutefois en opposition avec certaines ressemblances frappantes entre les deux champs (type d'intrusions, molybdénite), discutées ci-dessous.





**Figure 24.** Détail du champ « Kirkland Lake ». Modifié d'Ispolatov et al. (2008).

La FKK est encaissée dans une intrusion syénitique, un porphyre syénitique et les tufs du Timiskaming. Les intrusions sont injectées à la faveur de la discontinuité mécanique créée par la FKK. Ces intrusions sont déformées et sont interprétées syn-cinématiques. Le fait qu'elles recoupent le Timiskaming, et même les plis du Timiskaming, les situent chronologiquement comme tardi-tectoniques. Ni les intrusions, ni la FKK elle-même ne sont en effet affectées par le plissement du Timiskaming. Leur signature en éléments immobiles (Y, Ti, Nb, Zr) montre une affinité alcaline potassique. Ces intrusions rappellent fortement celles associées aux minéralisations de Malartic. Il s'agit de toute évidence du même événement magmatique régional alcalin tardi-tectonique, toutefois les relations locales avec l'or sont très dissemblables. Pour Malartic, le contexte mécanique et chimique portent à croire que l'or est contemporain des intrusions tandis que, à Kirkland Lake, la minéralisation est clairement post-intrusions (Ispolatov et al., 2008), les veines y recoupent en effet clairement les contacts intrusifs. De plus, ces veines montrent toutes les caractéristiques mécaniques des systèmes orogéniques classiques de type Sigma-Lamaque, à savoir un contrôle tectonique très marqué attesté par un fort déviateur de contraintes, une contrainte différentielle élevée. La présence de veines de tension ou tension-cisaillement toutes sub-parallèles indique que la pression de fluide n'est pas assez forte pour « annuler »  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  (les placer en tension), tandis qu'elle « annule » la contrainte verticale  $\sigma_3$ , axe unique de dilatation, suivant un schéma classique des systèmes syn-tectonique. Cette configuration est très différente de ce que l'on observe au gîte Canadian-Malartic où la formation du *stockwork* indique que les trois contraintes principales sont translattées dans le champ de la tension, sous l'effet de pressions de fluide extrêmement élevées. Ceci est caractéristique des systèmes hydrothermaux magmatiques où le dégazage tardif du magma produit des volumes colossaux de fluides surpressurisés (p. ex., Shinohara et al, 1995).

Les gîtes de Kirkland Lake sont relativement pauvres en sulfures (<3 %) et contiennent essentiellement de la pyrite, de la chalcopryrite, de la molybdénite (formant les bandes sombres des séquences de remplissage cyclique des veines, **Figure 18**), et moindrement de la

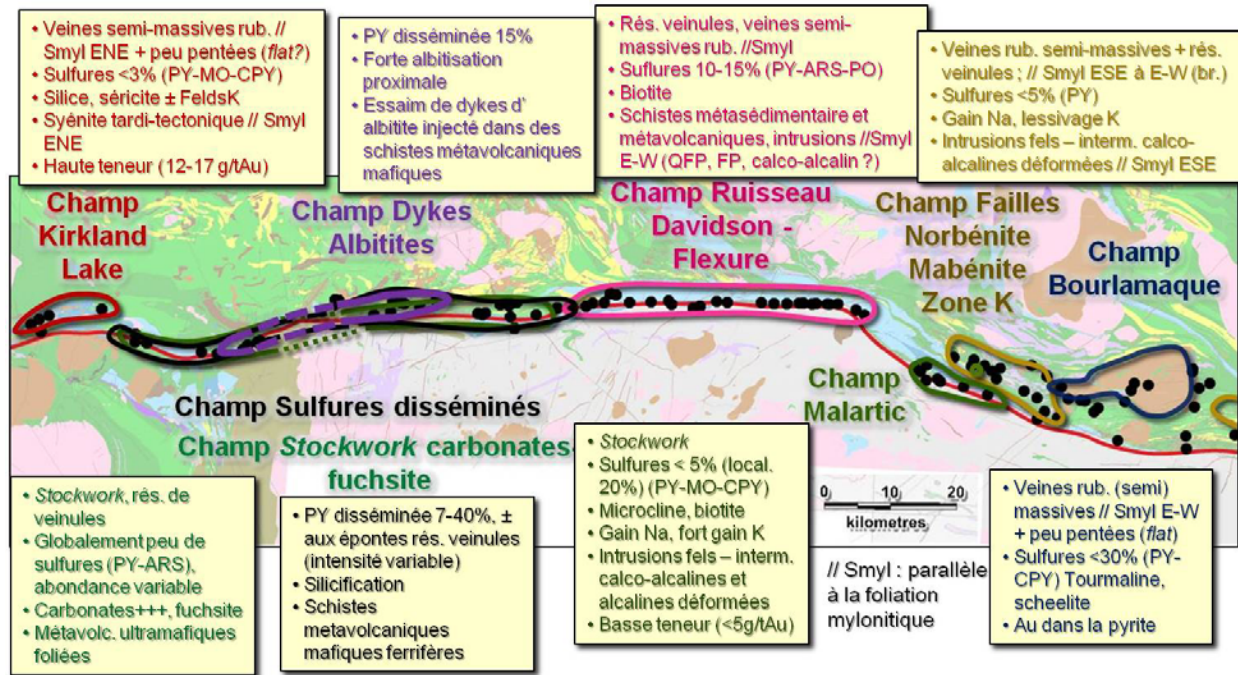
sphalérite. L'arsénopyrite est rare à absente, en dépit de la proximité des roches sédimentaires clastiques lesquelles sont, ailleurs le long de la FC, systématiquement associées à l'arsénopyrite. Cette configuration rappelle, encore une fois, celle du champ gîtologique de Malartic. La minéralogie des gîtes est quartz - carbonates (remplissage des veines) associés à une forte silicification des éponges, spatialement restreinte, et une altération potassique modérée. Celle-ci est essentiellement matérialisée par la séricite (localement abondante, **Figure 23 B**), moindrement par les feldspaths K. Il n'y a pas de biotite.

En conclusion, si l'assemblage de sulfures des gîtes de Kirkland Lake est marqué par une tendance polymétallique et la présence de molybdène (un élément typique des fluides hydrothermaux magmatiques), suivant une configuration semblable aux gîtes du champ « Malartic » qui suggère une influence orthomagmatique, les altérations potassiques observées en abondance à Malartic y sont bien moins représentées. De plus, les caractéristiques structurales du gîte suggèrent un total contrôle tectonique typique des gîtes orogéniques (type Sigma-Lamaque) qui, paradoxalement, ne favorise pas le modèle orthomagmatique. L'altération des éponges est restreinte, empreinte typique des gîtes orogéniques et très différente de celle de Malartic.

Pour finir, notons que, dans son introduction du modèle *Syénite-associated*, Robert (2001) s'est gardé d'y incorporer les gîtes de Kirkland Lake tandis que ceux de Malartic en constituaient des archétypes.

## 5 CONCLUSIONS

La **Figure 25** présente les huit champs gîtologiques définis au terme de cette étude de deux ans, ainsi que leurs caractéristiques succinctes.



**Figure 25.** Champs gîtologiques définis dans cette étude, avec résumés de leurs caractéristiques.

Ces résultats devraient être utilisés par le géologue comme des guides d'exploration sectoriels le long du métallotecte Faille de Cadillac. Ils établissent que les modalités d'apparition de minéralisations aurifères sont sectorielles : elles s'organisent en secteurs au sein desquels elles demeurent partiellement constantes. Cela signifie que les caractéristiques d'un gîte non-découvert dans un secteur donné peuvent être raisonnablement anticipées à partir de celles de gîtes connus à proximité. Il ressort aussi de ce travail certains guides d'exploration non-sectoriels, applicables à l'échelle régionale tels que la molybdénite (systématiquement associée aux intrusions alcalines tardi-tectoniques, qui sont souvent aurifères), l'absence d'arsénopyrite dans des minéralisations situées à proximité de roches sédimentaires clastiques (indices d'une autre influence hydrothermale, possiblement magmatique et donc aurifère).

Cette sectorisation des caractéristiques de minéralisation est l'effet tant de facteurs locaux (structures, roches encaissantes) que de facteurs plus régionaux : segmentation structurale de la FC, systèmes hydrothermaux. La dimension des systèmes hydrothermaux est toutefois difficile à appréhender et varie beaucoup en fonction des modèles métallogéniques.

L'interprétation de ces champs gîtologiques sur le plan de l'histoire métallogénique régionale n'est pas dans le mandat de ce travail. Les résultats obtenus ouvrent toutefois de nouvelles



perspectives à la compréhension de l'évolution métallogénique de la Faille de Cadillac et des relations entre tectonisme, hydrothermalisme et métallogénie.

Les champs « Sulfures disséminés » et « *Stockwork* carbonates fuschite » sont superposés. Ils constituent deux types de minerai que l'on retrouve localement soit dans des gîtes distincts soit dans des zones distinctes d'un même gîte : c'est le cas des gîtes Astoria, Kerr Addison, Mc Bean et Anoki. Deux interprétations s'opposent :

1. Il s'agit de deux évènements minéralisateurs distincts;
2. Il s'agit d'un même évènement hydrothermal avec différentes expressions traduisant différents types de piège aurifère local.

Cette deuxième option est soutenue par le fait que le style « Sulfure disséminé » est à pyrite abondante, avec peu ou pas de changement de volume (veines faibles ou absentes), ce qui suggère un piégeage chimique par sulfuration (Au co-précipite avec la pyrite qui remplace les minéraux ferrifères de l'encaissant, voir détail dans la section 4.1), tandis que le style « *Stockwork* carbonate fuschite », diamétralement opposé, est faible en sulfures avec un fort changement de volume avéré par la présence du *stockwork* (localement 50% du volume rocheux), ce qui suggère un piégeage physique ( $\Delta P_f$ , séparation des phases  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ , détails en section 4.3).

Sur des critères de recoupement, Smith et al. (1993) avancent qu'au gîte Kerr Addison les trois styles (incluant le style à dyke d'albitite) sont contemporains, et se mettent en place autour de  $2676,5 \pm 1,6$  Ma et  $2672,8 \pm 1,1$  Ma (par analogie avec les dykes d'albitite identiques datés à McIntyre par Ayer et al., 2005). On observe par ailleurs à Kerr Addison que les styles « *Stockwork* carbonates-fuschite » et « Dykes d'albitite » sont partiellement co-spatiaux et associés à l'encaissant ultramafique. Le style « Sulfures disséminés » montre par ailleurs un fort contrôle stratigraphique : il s'agit d'un minerai très discret (pas de halo aurifère) confiné dans les volcanites mafiques ferrifères. Ces observations suggèrent un contrôle lithologique local du style, en faveur de la deuxième option évoquée plus haut (les champs superposés sont co-hydrothermaux).

---

## REMERCIEMENTS

---

L'auteur tient à remercier Marjorie Simard, Alexandre Aubin et Patrice Barbe pour la mise à disposition de leurs analyses réalisées dans le cadre de leurs travaux universitaires. Également, les compagnies Mines Richmond, Aurizon, Agnico-Eagle, Osisko, Ressources d'Arianne et Niogold ont contribué à ce travail en fournissant de la documentation interne et/ou des données sur leurs propriétés.

---

## REFERENCES

---

- Ayer, J.A., Thurston, P.C., Bateman, R., Dubé, B., Gibson, H.L., Hamilton, M.A., Hathway B., Hocker, S.M., Houlié, M.G., Hudak, G., Ispolatov, V.O., Lafrance, B., Leshner, C.M., MacDonald, P.J., Péloquin, A.S., Piercey, S.J., Reed, L.E. et Thompson, P.H., 2005. Overview of results from the Greenstone Architecture Project: Discover Abitibi Initiative. Ontario Geological Survey, Open File Report 6154, 146 p.
- Calvert, A.J. et Ludden, J.N., 1999. Archean continental assembly in the southeastern Superior Province of Canada. *Tectonics* 18: doi: 10.1029/1999TC900006. issn: 0278-7407.
- Channer, D.M. deR et Spooner, E.T.C., 1991. Multiple fluid inclusion generations in variably deformed quartz: Hollinger-McIntyre and Kerr Addison - Chesterville Archean Au-quartz vein systems, Northern Ontario. *Ont. Geol. Surv. Misc. Paper*, 156:47-64.
- Couture, J.-F. et Pilote, P., 1993. The Geology and Alteration Patterns of a Disseminated Shear Zone-Hosted Mesothermal Gold Deposits: The Francoeur 3 Deposit, Rouyn-Noranda, Quebec. *Economic Geology*; volume 88, p. 1664-1684.
- Costa E. et Vendeville B.C, 2002. Experimental insights on the geometry and kinematics of fold-an-thrust belts above weak, viscous evaporitic décollement. *Journal of structural geology*, 24, 1729-1739
- Daigneault, R., Mueller, W.U. et Chown, E.H., 2002. Oblique Archean subduction: accretion and exhumation of an oceanic arc during dextral transpression, Southern Volcanic Zone, Abitibi Subprovince Canada. *Precambrian Research*, 115, p. 261–290.
- Davis D.M. et Engleder T., 1985. The role of salt in fold and thrust belts. *Tectonophysics* 119, 67-88.
- Davis D.M. et Engleder T., 1987. Thin-skin deformations over salt. In Lerche et O'Brien (Eds), *Dynamic geology of salt and related structures*, Academic Press, Londre, pp. 301-337.
- David J., McNicoll V., Simard, M., Bandyayera, D., Hammouche, H., Goutier, J., Pilote, P., Rhéaume, P., Leclerc, F. et Dion, C., 2011. Datation U-Pb effectuées dans les provinces du Supérieur et de Churchill en 2009-2010. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec. RP 2011-02, 37 pages.
- Diop, A., 2011. Caractéristiques sédimentologiques, volcanologiques et structurales du bassin de Granada dans la ceinture de roches vertes de l'Abitibi (Québec). Mémoire de Doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, 346 p.
- Gauthier, N., 1986. Géologie du site minier Astoria. MER, DP8614P001.
- Ispolatov, V., Lafrance, B., Dubé, B., Hamilton, M., et Creaser, R., 2005. Geology, structure, and gold mineralization, Kirkland Lake and Larder Lake areas (Gauthier and Teck townships): Discover Abitibi Initiative: Ontario Geological Survey, Open File Report 6159, 170 p.
- Ispolatov, V., Lafrance, B., Dube, B., Creaser, R. et Hamilton, M., 2008. Geological and Structural Setting of Gold Mineralization in the Kirkland Lake-Larder Lake Gold Belt, Ontario. *Economic Geology* v. 103, pp. 1309-1340.
- Jébrak, M., LeQuentrec, M.F., Mareschal, J.C. et Blais, D., 1991. A gravity survey across the Bourlamaque massif, southeastern Abitibi greenstone belt, Québec, Canada: the relationship between the geometry of tonalite plutons and associated gold mineralization. *Precambrian Research*, v. 50, Issues 3–4, p. 261–268.

- Jébrak, M. et Marcoux, E., 2008. Géologie des gîtes minéraux. Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune, Québec, 667 p., ISBN : 978-2-551-23737-1.
- Kishida A. et Kerrich R., 1987. Hydrothermal Alteration Zoning and Gold Concentration at the Kerr-Addison Archcan Lode Gold Deposit, Kirkland Lake, Ontario. *Economic Geology*, 82, 649-690.
- Laubscher H.P., 1977. Folds development in the Jura. *Tectonophysics* 37, 337-362.
- Mikucki E., 1998. Hydrothermal transport and depositional processes in Archean lode-gold systems: A review. *Ore Geology Reviews* 13, 307–321.
- Moore, D., D.A. Lockner, M. Shengli, R. Summers, et J. Byerlee, 1997. Strengths of serpentinite gouges at elevated temperatures. *J. Geophys. Res.* **102**:14,787–14,801.
- Moore D. E., et Rymer, M. J., 2007. Talc-bearing serpentinite and the creeping section of the San Andreas fault. *Nature*, 448(7155), 795-797.
- Morasse, S., Wasteneys, H.A., Cormier, M., Helmstaedt, H., et Mason, R., 1995. A pre-2686 Ma intrusion-related gold deposit at the Kiena mine, Val D'Or, Quebec, southern Abitibi subprovince. *Economic Geology*, vol. 90, pages 1310-1321.
- Robert F., Boullier A.-M., Firdaous, K., 1995. Gold-quartz veins in metamorphic terranes and their bearing on the role of fluids in faulting. *Journal of Geophysical Research*, 100-B7, 12861-12879.
- Robert, F., 2001. Syenite-associated disseminated gold deposits in the Abitibi greenstone belt, Canada. *Mineralium Deposita*, v36, Issue 6, p 503-516.
- Roussy, J., 2003. Relation entre la distribution de l'or, la structure, la composition des veines et de l'altération hydrothermale à la mine Beaufor, Val d'Or, Abitibi, Québec. Université de Laval, Mémoire de Maîtrise, 316 p.
- Séranne M., Benedicto A., Sanchis E., Labaume P. et Séguret M., 2007. Rifting Oligocène en Languedoc: Un modèle d'extension de couverture. Colloque « Tectonique récente de la Provence- Rôle des couches ductiles », Collège de France, 14-15 juin, Paris.
- Shinohara H., Kazahaya K. et Lowenstern J.B., 1995. Volatile transport in a convecting magma column: Implication for porphyry Mo mineralization. *Geology*, 23, 12, 1091-1094
- Smith, J.R., Spooner, E.T.C., Broughton, D.W. et Ploeger, F.R., 1993. Archean Au-Ag-(W) Quartz vein/Disseminated mineralisation within the Larder Lake - Cadillac Break, Kerr Addison - Chesterville System, North East Ontario, Canada, Ontario Geoscience Research Grant Program, Grant No. 364; Ontario Geological Survey, Open File Report 5831, 31 p.
- Tomkins A., Frost, B.R., et Pattison D.R.M., 2006. Arsenopyrite melting during metamorphism of sulfide ore deposits. *The Canadian Mineralogist*, 44, 1045-1062.
- Trépanier, S., 2009. Outil logiciel pour le traitement des données lithogéochimiques. Projet CONSOREM 2009-01.
- Trépanier, S., 2012. Bilan de masse par modélisation des précurseurs pour les roches alcalines. Projet CONSOREM 2012-05.
- Wei M., 2011. Observations and Modeling of Shallow Fault Creep Along the SanAndreas Fault System. Ph.D. Thesis, University of California, San Diego, États-Unis d'Amérique.
- Wilkinson, L., Cruden, A.R., et Krogh, T.E., 1999. Timing and kinematics of post-Timiskaming deformation within the Larder Lake–Cadillac deformation zone, southwest Abitibi greenstone belt, Ontario, Canada. *Canadian Journal of Earth Science.*, v. 36, p. 627-647.