

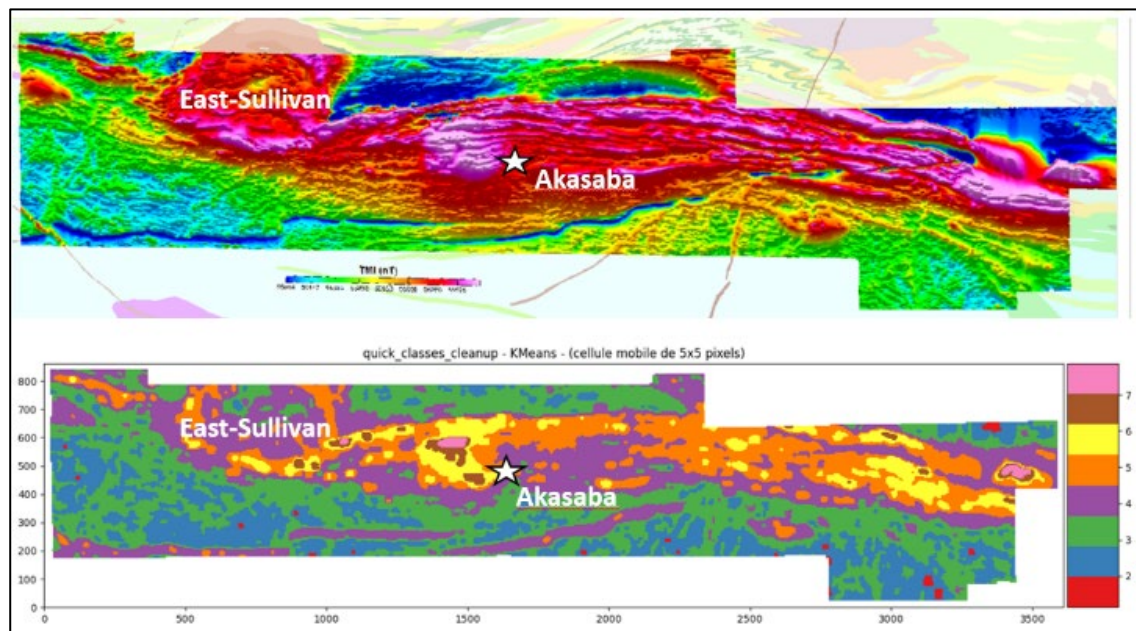
consorem

CONSORTIUM DE RECHERCHE EN EXPLORATION MINÉRALE

Minéralisations de type skarn à cuivre-or (Cu-Au) en contexte volcanique archéen

Projet 2021-05

Morgane Gigoux, Ph. D.
Mélanie Lambert, ing., M. Sc.



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 géoscientifique, 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 le 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 :

Gigoux, M., Lambert, M., 2022. Minéralisations de type skarn à cuivre-or (Cu-Au) en contexte volcanique archéen. Rapport, Projet CONSOREM 2020-05, 40p.

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 du 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

Site Web: www.consorem.ca



Résumé

Ce projet s'inscrit dans le cadre de la convention entre le CONSOREM et le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec (MERN) pour le développement d'outils géotechnologiques pour l'exploration des métaux précieux, usuels et des minéraux critiques et stratégiques au Québec. Les minéralisations de type skarn sont essentiellement associées à des gisements de métaux usuels comme le fer, le cuivre, le tungstène et l'étain.

Dans le cadre de ce travail, les skarns à cuivre-or (Cu-Au) en contexte volcanique archéen ont été ciblés. Une première partie a permis de documenter à partir de la littérature les différences et les similitudes entre les skarns Cu-Au archéens en Abitibi et les skarns classiques, d'âges plus récents, observés ailleurs dans le monde. Un travail pédagogique a été apporté dans le cadre de ce volet afin de démystifier certains aspects autour des skarns. Cela a contribué à mettre en évidence les critères discriminants essentiels pour la mise en place de ces minéralisations et de les adapter au contexte archéen.

L'analyse des données en lien avec quelques-uns de ces critères a permis d'observer notamment que les skarns à Cu-Au connus en Abitibi (secteur East-Sullivan et Akasaba) sont associés à des intrusions appartenant aux suites sanukitoïdes (SNK) et qu'ils sont localisés dans des encaissants volcaniques mafiques à intermédiaires riches en CaO, CO₂ et localement en K₂O, aux faciès schistes verts et contenant beaucoup d'épidote. Les résultats ont notamment démontré que les basaltes les moins altérés de la Formation de Héva ont des teneurs médiane et moyenne en CaO plus élevées que les teneurs moyennes des basaltes les moins altérés en Abitibi (9,6 % contre 8 % respectivement en moyenne). Les valeurs de CO₂ normatif (norme bas grade SV350) révèlent également que le secteur de Akasaba est ponctuellement riche en CO₂. La carbonatation de l'encaissant, quel que soit son âge (volcanogène précoce ou plus tardive), est très certainement favorable pour la mise en place de ces minéralisations au cours de l'Archéen.

L'objectif final du projet a consisté à synthétiser l'ensemble des informations compilées pour venir cibler des zones favorables pour la mise en place de skarns en Abitibi. Étant donné que la minéralogie typique des skarns est très variable et complexe à discriminer en contexte archéen, plusieurs critères ont été sélectionnés et additionnés afin d'optimiser l'exploration pour ce type de cible. Au total, six critères ont été choisis. Parmi eux par exemple, deux critères jugés prioritaires ont été travaillés : 1) la nature des intrusions et 2) les encaissants favorables. À partir de six principaux critères et de 28 couches évidentielles, plusieurs cartes de favorabilité ont été réalisées à l'aide d'un modèle automatisé en fonction de la nature de l'encaissant (basaltique ou andésitique) et de la subjectivité du géologue (poids accordés aux différentes couches). En considérant le biais dans la densité des données ponctuelles et continues utilisées, il en ressort une centaine de cibles à travers l'Abitibi dont des secteurs d'intérêt en bordure d'intrusions sous explorées dans des encaissants basaltiques et andésitiques (ex : Enjalran, Orvilliers, Guyenne, Mogador, Saint-Éloi).



Table des matières

1	Introduction et objectifs	5
2	Les skarns : pourquoi tant de complexité et de confusion?	7
3	Les skarns archéens : mythe ou réalité ?	13
4	Vectoriser l'exploration	18
	4.1 Les critères discriminants	18
	4.1.1 Les intrusions	18
	4.1.2 Les roches hôtes	21
	4.1.3 Hydrothermalisme	25
	4.1.4 Géologie structurale	25
	4.1.5 Magnétisme, conditions redox et profondeur de cristallisation	27
	4.1.6 Métamorphisme	29
	4.2 Les couches évidentielles et les cartes de favorabilité par critère	29
	4.2.1 Critère 1 : les intrusions favorables (8 couches évidentielles)	29
	4.2.2 Critère 2 : les encaissants favorables (7 couches évidentielles)	31
	4.2.3 Critère 3 : les minéraux favorables (3 couches évidentielles)	31
	4.2.4 Critère 4 : les lithologies et textures favorables (8 couches évidentielles)	32
	4.2.5 Critère 5 : magnétisme (1 couche évidentielle)	32
	4.2.6 Critère 6 : Indices/gîte minéralisés Cu et Au (1 couche évidentielle)	33
	4.3 Cartes de favorabilité finales	33
5	Conclusion	36
6	Remerciements	37
7	Lexique	37
8	Références	37



1 Introduction et objectifs

L'histoire des skarns commence en 1875 avec Alfred Elis Tornebohm, un géologue suédois, qui introduit dans le lexique géologique le mot « Grönskarn » (ou skarn vert, figure 1). Ce terme a été initialement proposé pour décrire des minéralisations à fer-oxydes dans le bouclier ferrosandinave (district minier de Persberg en Suède) avec des skarns principalement encaissés dans des roches volcaniques felsiques paléoprotérozoïques (1,9-1,89 Ga). Ce qui ne correspond pas tout à fait à ce qui est ancré aujourd'hui dans nos inconscients collectifs, où les skarns sont connotés à des gisements essentiellement associés à des roches calcaires. Il existait néanmoins la présence d'alternance de lits calcaires dans ces formations paléoprotérozoïques associées à ces minéralisations, mais ce n'était pas la dominante. Il s'agissait donc avant tout d'un terme descriptif non associé à une connotation génétique, qui fait simplement référence à la couleur verte des pyroxènes, très souvent associés aux dépôts des skarns. Un autre terme descriptif amené dans le lexique par Tornebohm est « Brunskarn » (ou skarn brun), qui lui fait référence à la présence de grenat dans la roche.

L'histoire se poursuit avec l'émergence de deux grands spécialistes mondiaux des skarns dans les années 80-90 : Marco Einaudi (Stanford University) et Larry Meinert (Colorado School of Mines). Einaudi a défini dans le détail les premières classifications en fonction des contextes géologiques, pétrographiques et minéralogiques. Il a notamment mentionné que parmi l'ensemble des gisements décrits dans la littérature, les skarns faisaient partie des plus abondants et surtout des plus diversifiés sur Terre, ce qui participe à la complexité que l'on peut avoir à les identifier distinctement sur le terrain (Einaudi *et al.*, 1981). Puis Larry Meinert a repris le flambeau en s'intéressant à la chimie des skarns et à leur lien spatial et génétique avec d'autres types de gisements. Il a notamment mis en évidence la relation entre les porphyres et les skarns (Meinert, 1993; Meinert *et al.*, 2005).

Trois remarques sont essentielles à retenir à propos des skarns selon Meinert (2005) : 1) les skarns sont définis par leur minéralogie (à dominante calco-silicatée); 2) bien que la majorité des skarns soit rattachée aux encaissants carbonatés, ils peuvent se former dans tous types de roches et 3) il n'est pas nécessaire ni d'avoir un pluton à proximité ni de carbonate pour former un skarn.

Aujourd'hui, la définition la plus courante du skarn est celle de Pirajno (2008) qui est une roche dominée par le développement de minéraux calco-silicatés (tels diopside, hedenbergite, wollastonite, grenat grossulaire ou andradite, actinote) formés par métasomatisme, bien développée communément dans les carbonates, lors de la mise en place d'intrusions ou durant le métamorphisme régional.

Tout en intégrant cet historique, les objectifs du projet sont les suivants :

- Documenter les caractéristiques et vecteurs d'exploration pour les skarns Cu-Au. Ces deux substances ont été choisies dans ce travail, car elles présentent un intérêt commun pour plusieurs compagnies au Québec. De plus, le cuivre est un élément critique et stratégique répertorié par le MERN. Il existe plusieurs types de skarn associés à une variété de métaux distincts (ex. Au, Cu, Zn, Sn, W, Sb, Mo), mais ils sont tous rattachés à des environnements et des processus de mise en place différents propres à chaque substance, qu'il aurait été trop long de documenter dans le cadre de ce projet.
- Documenter les caractéristiques spécifiques des skarns archéens. L'objectif est de mettre l'accent sur la période archéenne et sur les cas décrits dans la littérature à



travers le monde (Canada, Australie, Indonésie, etc.). Cette partie permettra notamment de mettre en lumière les confusions qu'il peut exister entre les différents modèles génétiques et le terme descriptif originel des minéralisations de type skarn.

- L'objectif final étant de cibler des contextes favorables en Abitibi en utilisant la superposition de différentes couches évidentielles (intrusion, encaissant, minéraux, magnétisme, etc.) créées à partir des caractéristiques compilées de skarns archéens canadiens et australiens.

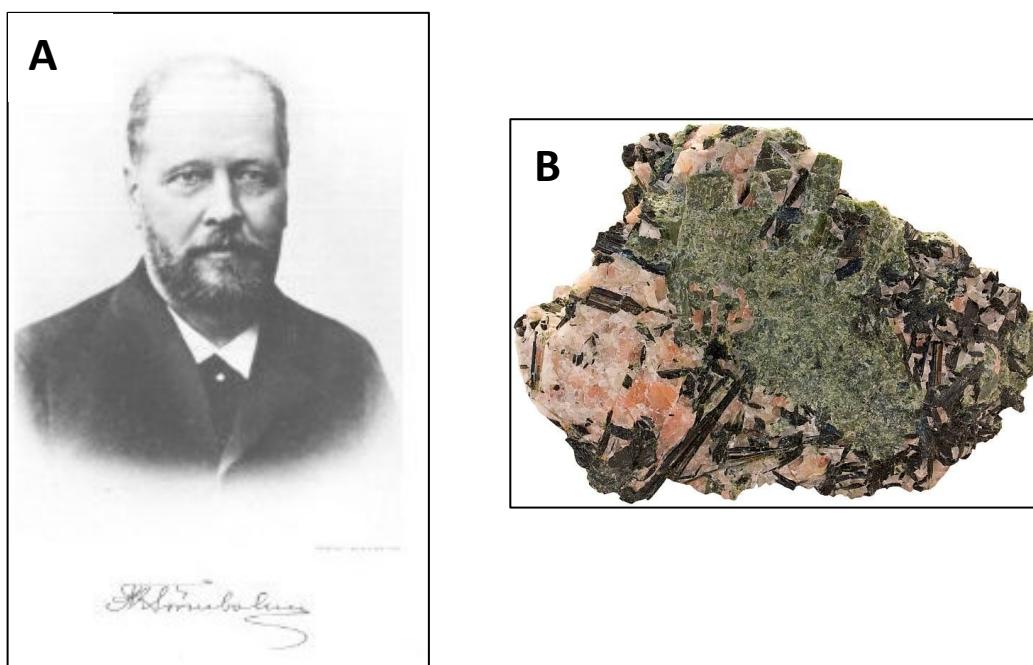


Figure 1. A) portrait du géologue suédois Alfred Elis Tornebohm. B) échantillon provenant de la mine de Tapuli (skarn Fe, Suède) illustrant la présence de pyroxène à l'origine du terme « Grönskarn » ou skarn vert.

2 Les skarns : pourquoi tant de complexité et de confusion?

Il paraît très difficile d'identifier les skarns archéens, et cela est dû à plusieurs raisons. Premièrement la grande majorité des cas d'études sont décrits pour des environnements de dépôt plus jeunes, tels le Jurassique et le Crétacé, où les plateformes carbonatées prolifèrent. Ce sont des encaissants très réactifs favorisant incontestablement le type d'altération et de métasomatisme associés aux skarns. On observe qu'environ 70 % des occurrences de skarns reconnus en Colombie-Britannique sont déposées au Jurassique/Crétacé indépendamment de la substance métallique (figure 2A, Ray, 2013). Cette tendance est similaire pour les skarns aurifères (figure 2B).

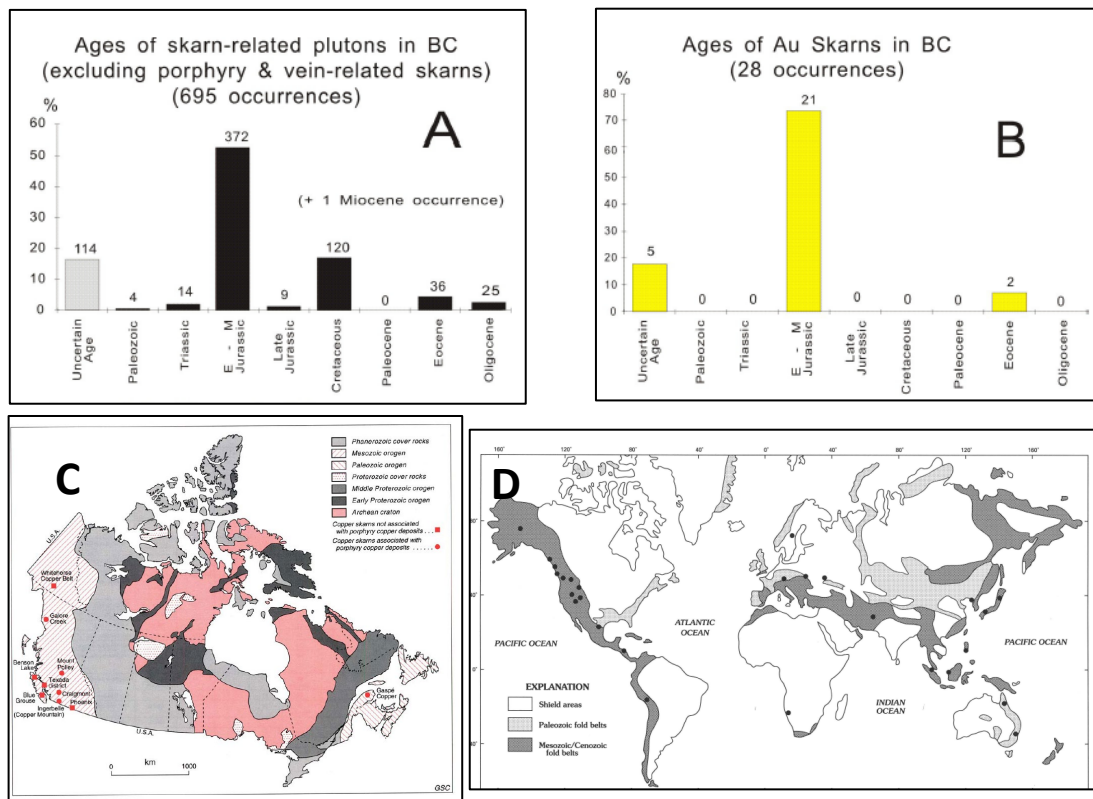


Figure 2. A) Histogramme du nombre de skarns associés spatialement aux intrusions en fonction de l'âge estimé des minéralisations en Colombie-Britannique (Ray, 2013). B) histogramme du nombre de skarns aurifères en fonction de l'âge estimé des minéralisations (Ray, 2013). C) Distribution spatiale des occurrences des skarns à cuivre au Canada (Dawson et Kirkham, 1996). D) distribution des occurrences des skarns aurifères dans le monde (Théodore et al., 1991).

À plus grande échelle au Canada, la localisation des gisements connus de type skarn à Cu-Au correspond aux grandes ceintures orogéniques mésozoïque et cénozoïque (figure 2C et 2D). Dans le détail, il y a quelques cas de skarns associés au Paléozoïque et aux cratons archéens, mais ils paraissent comme des exceptions à l'échelle mondiale.

Ensuite, indépendamment de l'âge des minéralisations, il y a très fréquemment des associations spatiales ou même des télescopages avec d'autres systèmes métallogéniques mieux contraints et documentés à l'Archéen, comme les systèmes porphyriques, certains gîtes épithermaux ou encore les veines d'or orogéniques et les IOCG. La figure 3 (Sillitoe, 2010) illustre ce phénomène avec la présence d'un porphyre minéralisé en Cu-Au-Mo associé à la présence d'un skarn à Cu-Au en bordure. On observe également d'autres styles de minéralisations comme les remplacements de carbonates (carlin) ou les « sediment-hosted ». Récemment en 2019, deux métallogénistes australiens ont réinterprété cinq gisements de Cu-Au d'âge protérozoïque en Australie. Ils étaient initialement rattachés au modèle IOCG. Les paragenèses de ces gisements ont été retravaillées et les auteurs suggèrent désormais des minéralisations de type skarn, au sens descriptif du terme (Lilly et Taylor, 2019).

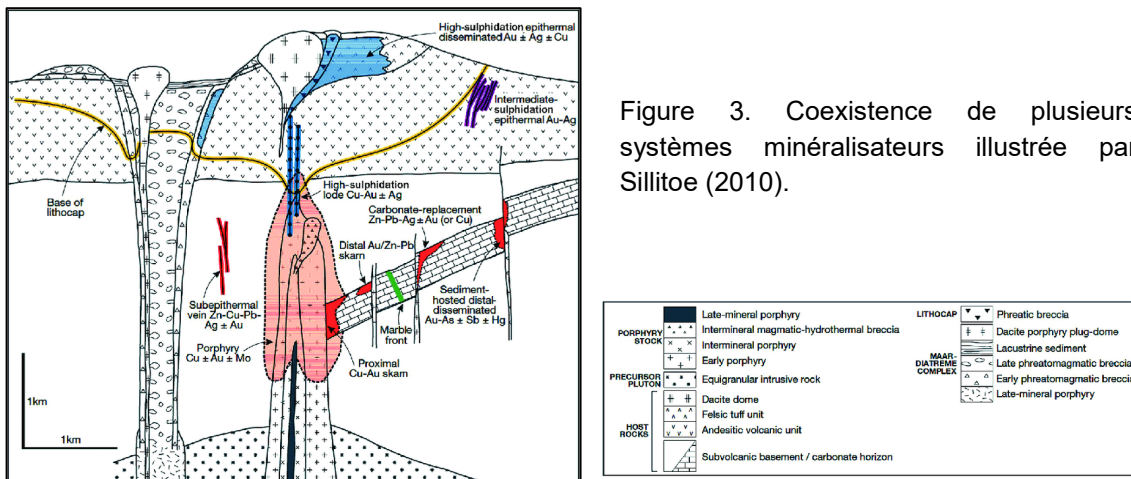


Figure 3. Coexistence de plusieurs systèmes minéralisateurs illustrée par Sillitoe (2010).

Un autre exemple de confusion est avec le modèle orogénique. Avec l'exemple de Nevoria qui est un gisement aurifère en Australie sur le craton Yilgarn. Certains auteurs vont le décrire comme un gisement de type orogénique et d'autres de type skarn (Mueller *et al.*, 2004; Groves *et al.*, 2018). Tout d'abord, première remarque, l'un n'empêche pas l'autre puisqu'il y a dans ce cas précis, un mélange entre le terme descriptif de skarn et la connotation génétique orogénique. Deuxièmement, cette confusion est propre au gisement aurifère en contexte métamorphique. En effet la paragenèse minérale des skarns, dominée par des assemblages calco-silicatés de hautes températures liés au métamorphisme de contact peut être très similaire à celle associée à des veines hypozonales à forte profondeur. La plupart des gisements aurifères en Australie qui font polémiques sont au faciès amphibolite. Larry Meinert et Richard Goldfarb sont en accord pour dire qu'il s'agit essentiellement d'une guerre sémantique (comm. pers. Meinert et Goldfarb).

Dans les faits, à l'échelle mondiale, les plus gros gisements de type skarn sont réputés pour être associés spatialement et même parfois génétiquement à des systèmes porphyriques, notamment pour les skarns à Cu (Singer, 2017). La distribution des teneurs en cuivre relatives en fonction du type de dépôts est illustrée à la figure 4A.

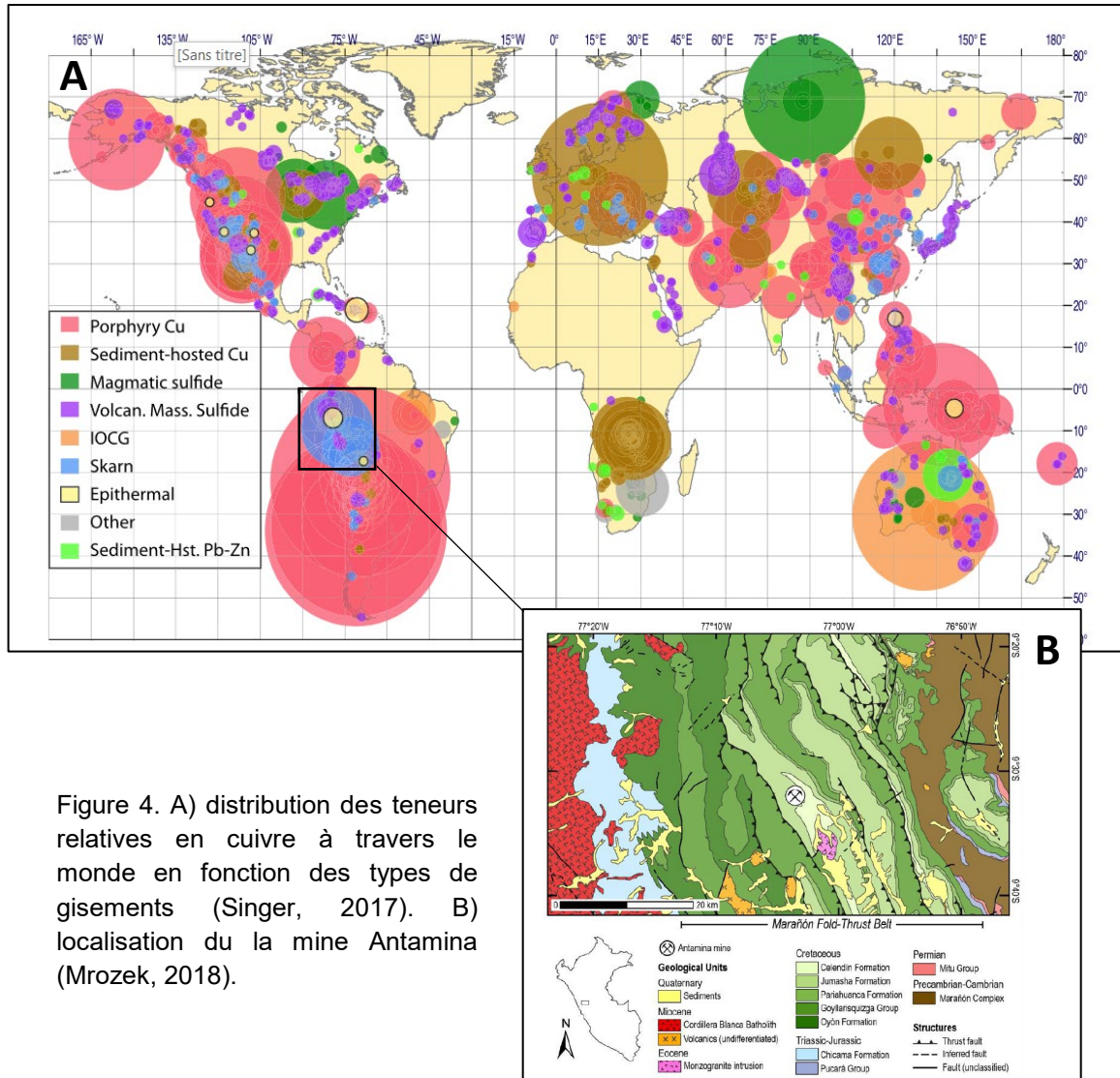


Figure 4. A) distribution des teneurs relatives en cuivre à travers le monde en fonction des types de gisements (Singer, 2017). B) localisation du la mine Antamina (Mrozek, 2018).

Ce qui ressort au niveau du continent américain, c'est la superposition des plus gros skarns à cuivre (en bleu) sur les plus gros porphyres à cuivre (en rose, figure 4A). La mine Antamina, un skarn à cuivre de classe mondiale localisé au Pérou (figure 4B), est associée à plusieurs systèmes porphyriques eux-mêmes associés à plusieurs phases de skarns. Ce qui en fait le 3^e producteur mondial de cuivre. Le gisement est encaissé dans des sédiments d'âge crétaé avec la présence d'intrusion de type monzonite d'âge éocène (Mrozek, 2018). L'étude de ce gisement permet de mettre en évidence la complexité des skarns associés à des systèmes porphyriques avec la superposition des systèmes intrusifs de nature différente au cours du temps. Ces systèmes vont tous être associés à une succession de minéralisations de type skarn. La durée du système magmatique hydrothermal est estimée à environ 1,1 Ma depuis la mise en place du premier système porphyrique jusqu'au dernier (Mrozek, 2018).

La dernière raison qui participe à la confusion, et non la moindre, est le fait que le terme descriptif de terrain originel introduit par Tornebohm puis Einaudi, ait été distordu en faveur du sens génétique. Le terme skarn est très souvent attribué à tort lorsque quelques minéralisations

atypiques calco-silicatées sont rencontrées sur le terrain et que les interprétations sont douteuses. Aussi il existe toute une sémantique autour du mot skarn qui sème la confusion lorsqu'ils ne sont pas bien définis, par exemple : endoskarn, exoskarn, tactite, mantos, hornfels, cornéenne et skarnoïde (voir le lexique).

Dans le détail, la complexité des skarns va également résider dans les différents assemblages minéralogiques de l'encaissant qui peuvent se succéder dans le temps et dans l'espace et qu'il est souvent complexe à identifier sur le terrain. Ces assemblages vont définir différentes zonalités qui sont synthétisées sur la figure 5 (Jébrak et Marcoux, 2008). Il est à noter qu'indépendamment de la substance économique, les assemblages calco-silicatés principaux qui définissent les zonalités restent les mêmes. Le grenat va dominer en zone proximale tandis que le pyroxène et la wollastonite vont se rencontrer à une distance plus distale à l'intrusion.

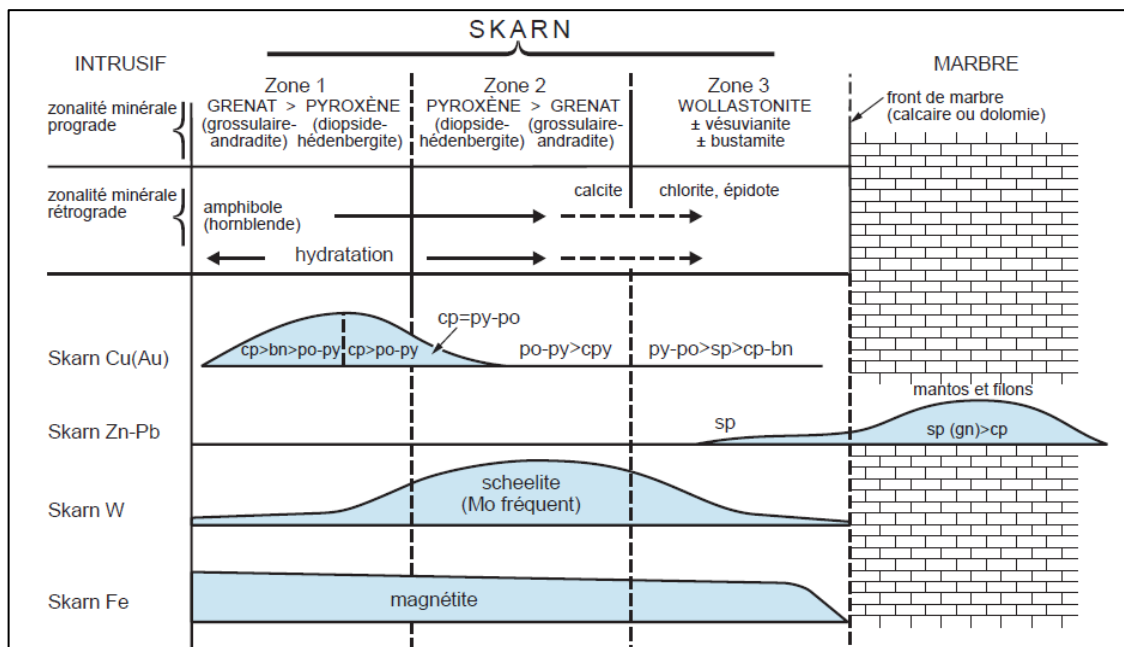


Figure 5. Zonalité minéralogique idéalisée des différents types de skarns où seuls les minéraux principaux ont été représentés. Le quartz est omniprésent, Jébrak et Marcoux, 2008.

Ces zonalités ont également été documentées en détail pour les skarns à or ou cuivre par exemple pour un skarn aurifère au Nevada d'âge éocène (Meyer et Meinert, 1991) et un skarn cuprifère en Utah d'âge paléozoïque (Meinert, 1997).

Pour les skarns à Cu-Au, la chalcoppyrite va être dominante dans la zone proximale au pluton tandis que la pyrite-pyrrhotite dominera dans les zones distales. Une des particularités communes au skarn à cuivre est la variation de couleur des grenats (rouge à jaune) en fonction de la distance à l'intrusion (figure 6, Chang, 2020).

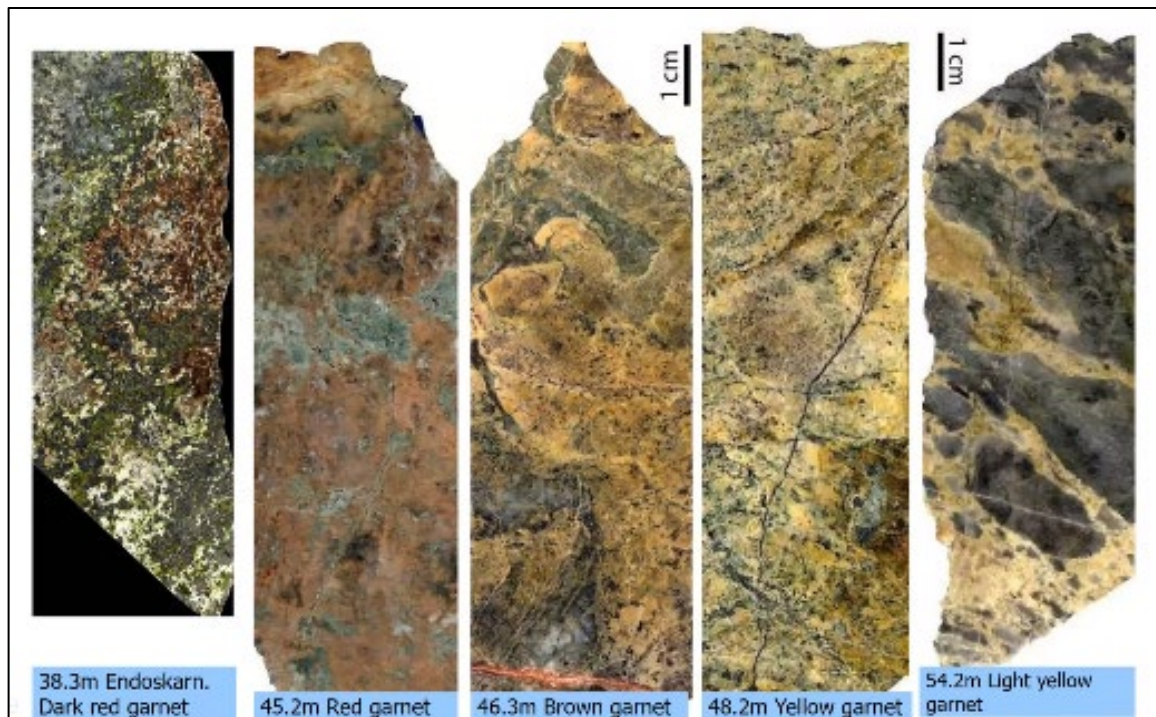


Figure 6. Évolution de la couleur des grenats dans un skarn à cuivre au Philippines, Chang (2020).

Les skarns aurifères sont caractérisés par un enrichissement en or entre la zone proximale et distale. La zone proximale va être généralement plus riche en Ag et Cu tandis que la zone distale sera enrichie en As-Bi-Cd-Hg-Pb-Sb. Ils peuvent être caractérisés par trois styles principaux, qui sont documentés dans les travaux de Ray (2013) à partir de cas d'étude en Colombie-Britannique: 1) ceux riches en pyroxène, 2) ceux riches en grenat et 3) ceux riches en épidote où le grenat et le pyroxène se font plus rares, voire absents.

L'ensemble des zonalités minéralogiques décrites vont dépendre de trois phases majeures qui caractérisent la formation des skarns : 1) une phase isochimique reliée au métamorphisme de contact, 2) une phase metasomatique et 3) une phase rétrograde (figure 7D).

La phase de métamorphisme de contact va être associée à une déshydratation et une décarbonatation des roches lors de l'arrivée du magma (figure 7A). La seconde phase est associée à la cristallisation du pluton issu de ce magma et au développement des endoskarn et exoskarn à haute température généralement entre 500-600 °C (figure 7B). La dernière phase correspond au refroidissement du système et au métamorphisme rétrograde avec l'hydratation des assemblages existants. C'est très souvent à ce moment que vont se déposer les sulfures (figure 7C).

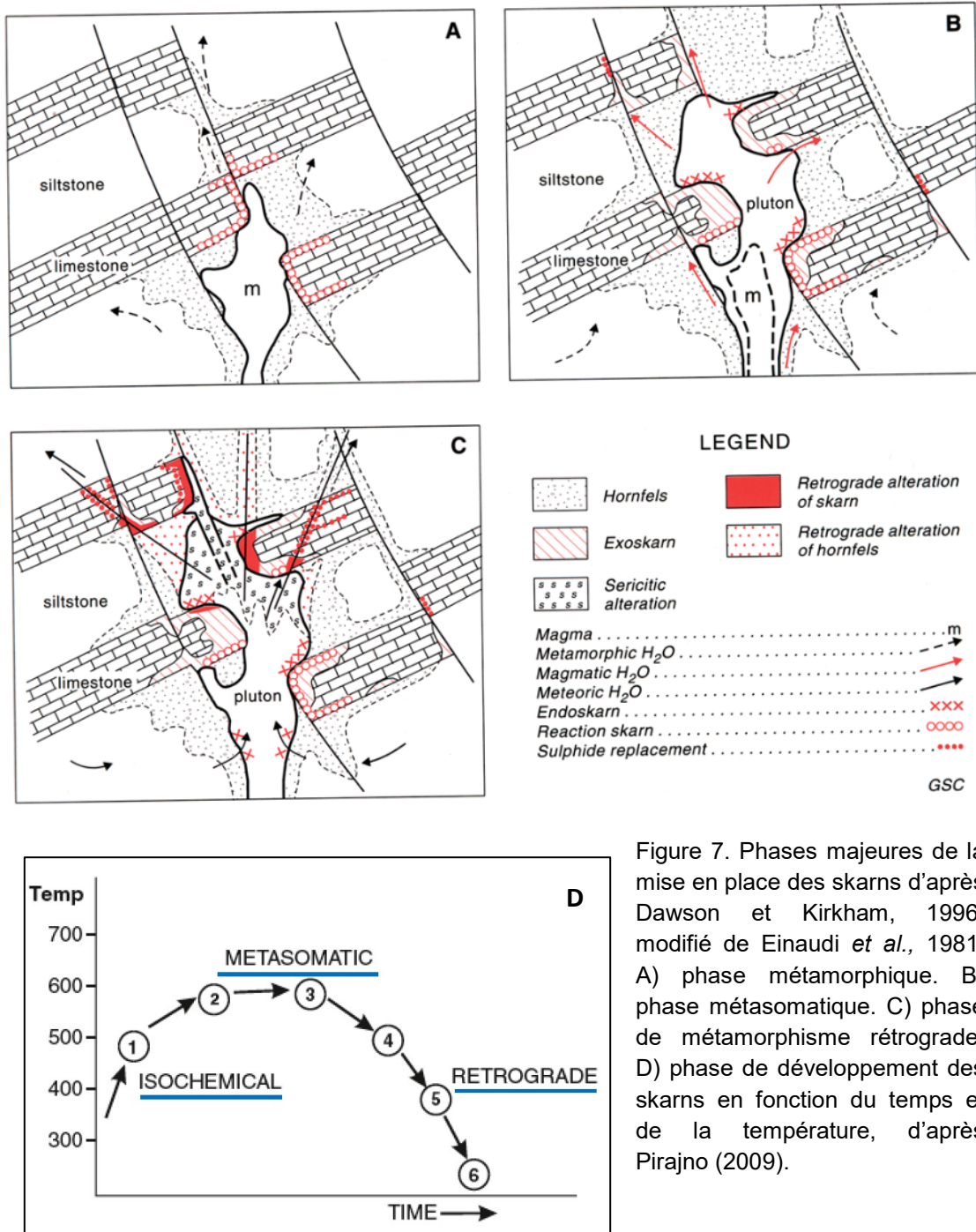


Figure 7. Phases majeures de la mise en place des skarns d'après Dawson et Kirkham, 1996, modifié de Einaudi *et al.*, 1981. A) phase métamorphique. B) phase métasomatique. C) phase de métamorphisme rétrograde. D) phase de développement des skarns en fonction du temps et de la température, d'après Pirajno (2009).

3 Les skarns archéens : mythe ou réalité ?

La présence de skarn au sens descriptif du terme à l'Archéen est définitivement une réalité bien que dans la littérature ils représentent une minorité de cas. La plupart d'entre eux sont identifiés en Australie sur le craton Yilgarn, dont certains sont encore controversés comme le gisement de Nevoria (Mueller *et al.*, 2004; Mueller, 2007; Mueller *et al.*, 2008; Mueller *et al.*, 2012). Au Québec, il en existe deux officiellement décrits au sud de l'Abitibi, qui ont été rattachés au type skarn : Akasaba (Vorobiev, 1998) et plus récemment le Pluton d'East-Sullivan (Bigot, 2021, figure 8A).

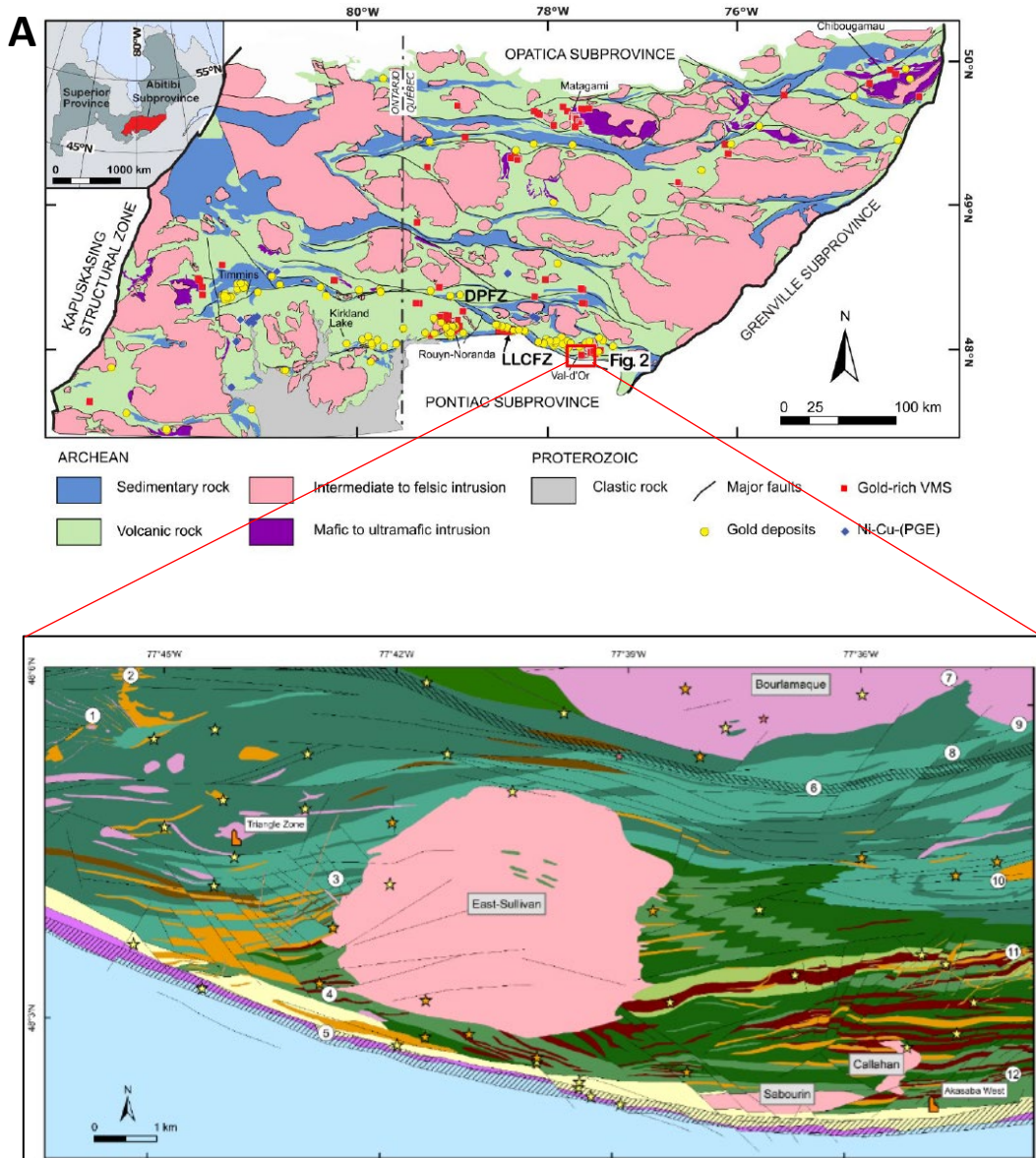


Figure 8. A) Contexte géologique du secteur du Pluton d'East-Sullivan avec la localisation des plutons de Callahan et Sabourin et du gisement Akasaba (identifié par le numéro 12) d'après Bigot (2021), modifié de Pilote *et al.*, (1999).

À noter que dans les années 70-80, le modèle SMV (sulfures massifs volcanogènes) était très souvent privilégié pour expliquer la présence de sulfures massifs ou disséminés encaissés dans des andésites ou des basaltes. En 1981, les travaux de Marquis suggèrent que Akasaba soit rattaché à un gisement de type volcanogène exhalatif, hypothèse qui a été reprise par Lebel (1987). Néanmoins la présence dans les roches volcaniques hôtes d'épidote, de grenat andradite et de clinopyroxène laisse suggérer à l'auteure que « l'altération hydrothermale s'est produite sur une base de silicates calciques comme dans les skarns » (Lebel, 1987). En 1985, les travaux de Sauvé mentionnent que ce gisement mériterait une étude détaillée au regard de sa différence avec les autres gisements d'or standards. L'auteur soulève notamment le fait que les hautes teneurs en CaO (jusqu'à 12 % CaO) dans les basaltes ne peuvent s'expliquer exclusivement par le métasomatisme. En 1998, Vorobiev étudie dans le détail la paragenèse du gisement (figure 8B) et en ressort toutes les caractéristiques et les stades d'évolution des skarns au sens descriptif du terme. Il affirme et renforce alors l'hypothèse de l'origine skarn pour les minéralisations du gisement de Akasaba.

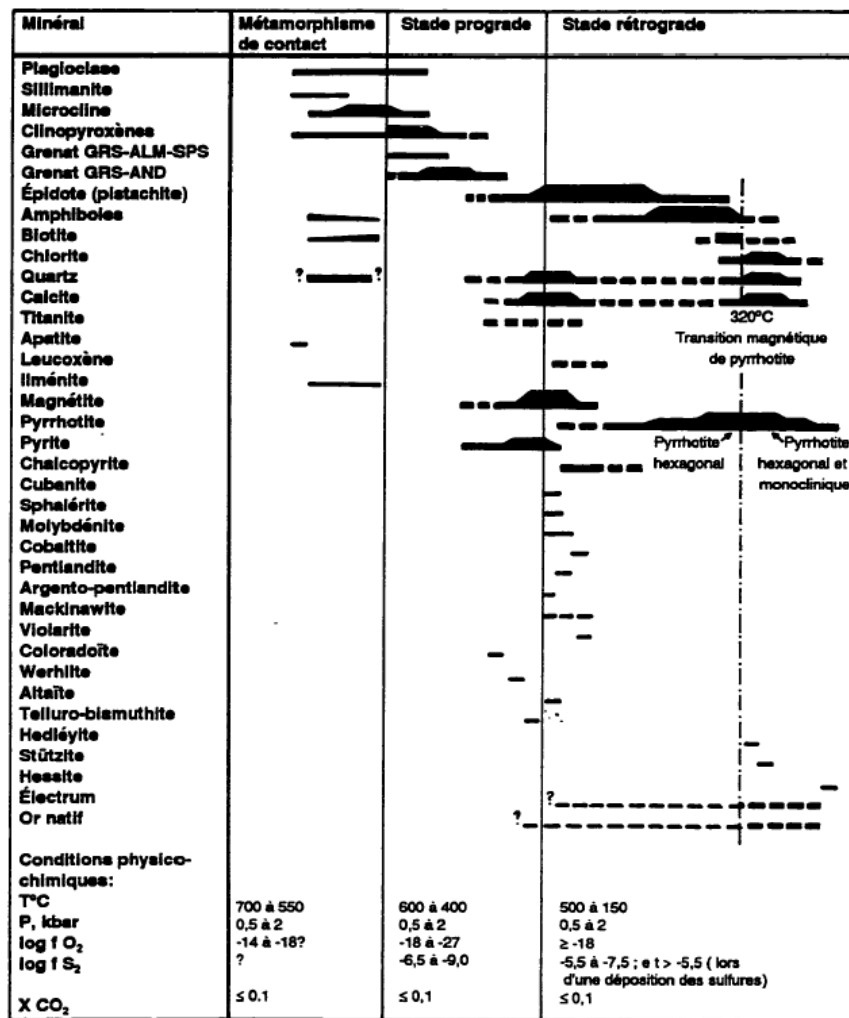


Figure 8. B) Paragenèse du gisement de Akasaba (Vorobiev, 1998).

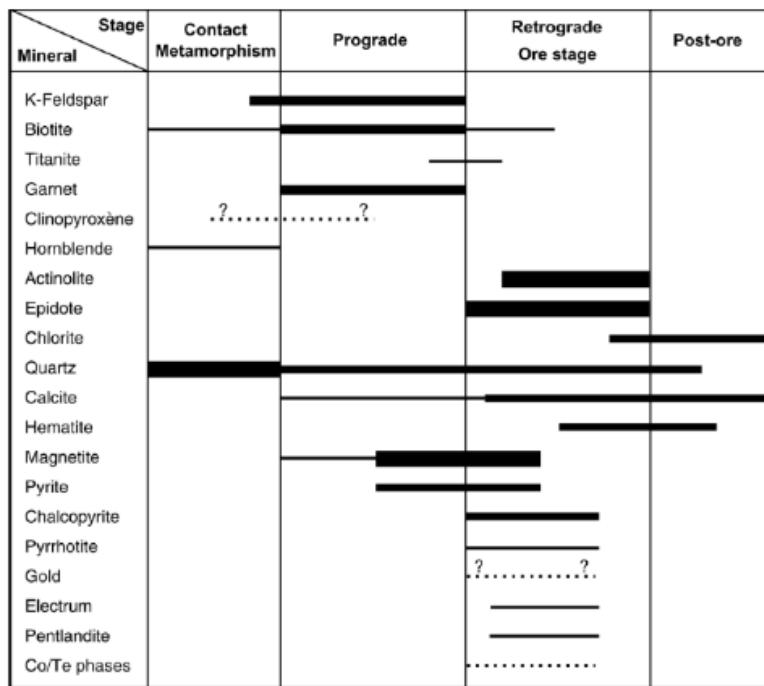


Figure 8. C) Paragenèse du secteur de East-Sullivan (Bigot, 2021).

À l'Archéen en Abitibi, il semble ainsi exister un style bien spécifique de skarn encaissé dans des roches volcaniques mafiques à intermédiaires (ex : Formation de Héva), au faciès schiste vert, dominé par des assemblages à épidote et amphibole. Ces caractéristiques sont similaires aux skarns « epidote-rich type » décrit pour des minéralisations plus jeunes en Colombie-Britannique (Ray, 2013). Dans ce type, les grenats et les pyroxènes se font plus rares que dans les skarns classiques encaissés dans des carbonates. Les roches du secteur de East Sullivan sont affectées par une altération calco-silicatée et potassique avec la présence de microcline et de biotite. À Akasaba il est clairement observé des zonalités à épidote et amphibole calcique avec une évolution dans la composition des grenats (figure 9B et 9C). L'épidotisation est localement pervasive dans des remplissages de fractures au sein des basaltes (figure 9D). Un exemple de relation minéralogique entre la mise en place du grenat, du microcline, de la magnétite et de l'épidote est visible sur la photo de la figure 9E. Le long de la bordure sud du Pluton d'East-Sullivan ont été identifiés des assemblages calco-silicatés et de la magnétite venant remplacer localement les basaltes de la Formation de Héva (Bigot, 2021). Une évolution dans la couleur et la composition des grenats est également mentionnée associée à une rareté des pyroxènes. Concernant la minéralisation, il s'agit de pyrite-chalcopyrite massive avec plus ou moins de pyrrhotite associée à de l'actinolite-trémolite-épidote. Il y a également la présence d'électrum et de pentlandite localement (figure 8C).

La complexité rencontrée sur le terrain provient du fait que les minéralisations du secteur ne sont pas uniquement représentées par le type skarn, mais qu'il existe au pourtour du Pluton d'East-Sullivan, d'autres styles de minéralisations comme le mentionne Bigot (2021), avec la présence

de minéralisations probablement volcanogènes, porphyriques (Cu-Mo) ou même orogéniques (faille Cadillac à proximité). Un télescopage très probable entre plusieurs événements métallogéniques, métamorphiques et métasomatiques dans le temps, peut rendre l'identification des zonalités minéralogiques des skarns difficiles à l'Archéen.

L'élément clé serait de connaître l'âge auquel appartient l'évènement minéralisateur de type skarn au sud-est de l'Abitibi. Ces minéralisations sont plus jeunes que les dykes porphyriques datés du secteur à 2684 Ma (Pilote *et al.*, 1999). En effet il existe, sur le terrain, une relation de recoupement entre le pluton et des dykes porphyriques E-O. Le Pluton d'East-Sullivan recoupe clairement le dyke daté à 2684 Ma (Pilote *et al.*, 1999). Le même âge a été estimé pour un dyke porphyrique de même nature dans le secteur de Akasaba (Pilote *et al.*, 1999). Deux nouvelles datations vont être publiées prochainement par le MERN sur deux phases du Pluton d'East-Sullivan. Ces âges, encore confidentiels à ce jour, vont dans le sens d'un évènement magmatique plus jeune que 2684 Ma dans le secteur. Vorobiev (1999) suggérait d'ailleurs un âge proche de 2680 Ma pour la minéralisation skarn à Akasaba. L'encaissant correspondant à la Formation de Héva est datée à 2702 Ma (Pilote *et al.*, 1999). Plusieurs faciès ont été décrits pour le pluton d'East-Sullivan, ce qui présuppose des événements magmatiques distincts multiphasés (Figure 9A). Il existe également deux autres intrusions à proximité : Le Pluton de Sabourin et le Pluton de Callahan. Ce dernier affleure en forme de croissant de lune, qui se superpose à une forte anomalie magnétique en son centre. À noter que la présence de la mine de Akasaba est en périphérie de cette anomalie magnétique. L'hypothèse d'une intrusion enfouie est à soulever ici. La majorité des indices de type skarn connus à ce jour sur les propriétés de O3 Mining est localisée le long de la bordure sud du Pluton d'East-Sullivan et autour de la mine Akasaba.

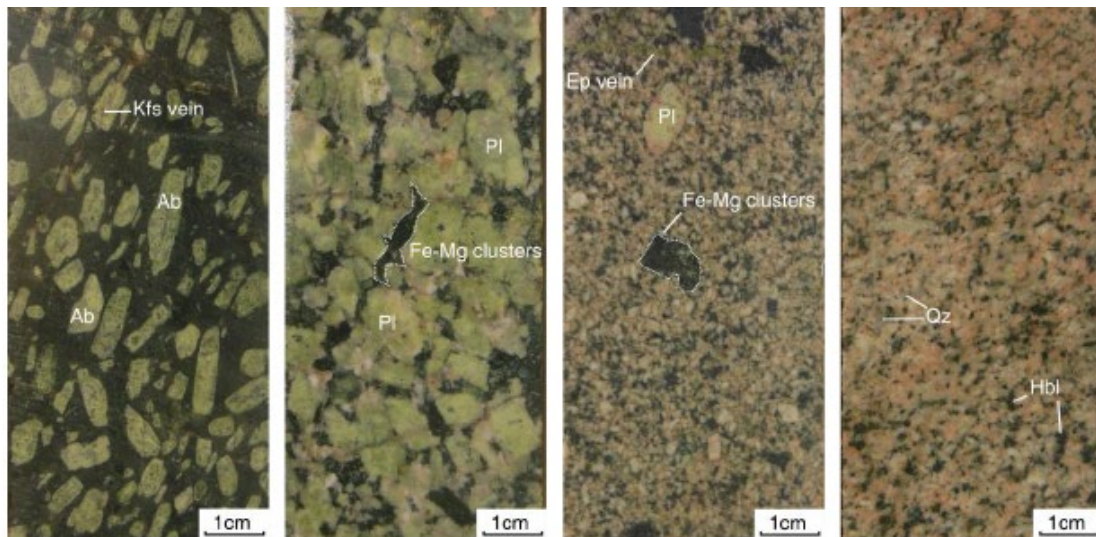


Figure 9. A) différents faciès du Pluton d'East-Sullivan, d'après les observations pétrographiques de Vorobiev, 1998.

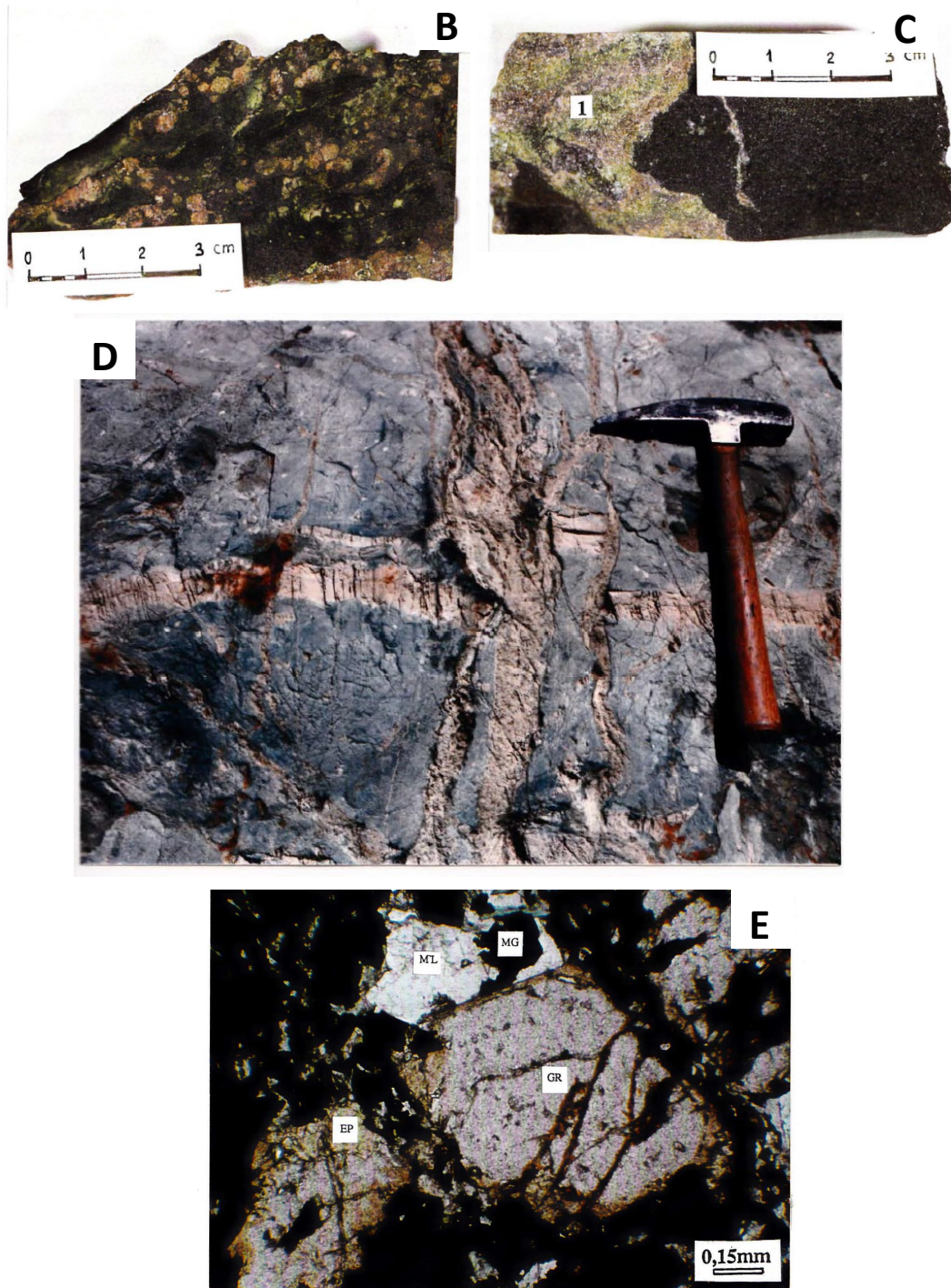


Figure 9. B) Grenat en amas et en veines déformées associé à la magnétite. C) Remplacement métasomatique à épidote et amphibole dans les laves coussinées. D) Basalte massif à épidote brun-vertâtre en remplissage des fractures. L'épidotisation affecte la porosité primaire du basalte, mais également les porosités secondaires postérieures à la mise en place des basaltes (Lebel, 1987). E) Relation minéralogique entre le grenat, la magnétite, le microcline et l'épidote à Akasaba, d'après les observations pétrographiques de Vorobiev, 1998.

En Australie, il existe quelques cas de skarns comparables au contexte abitibien : un style riche en épidote associé à des suites sanukitoïdes de type monzonite-monzodiorite-syéénite au faciès des schistes verts. Une altération à dominante calco-silicatée et potassique est également décrite, associée à des fluides oxydants et une association métallique de type Au-Cu-Mo, dont la mise en place est estimée autour de 2660 Ma (datation sur molybdénite et monazite) à la fin de l'Archéen (Mueller *et al.*, 2008; Mueller, 2007). Ce sont des analogues à ce que nous retrouvons en Abitibi.

4 Vectoriser l'exploration

4.1 Les critères discriminants

À partir de la littérature, plusieurs critères déterminant pour la mise en place des skarns ont été identifiés, et ce indépendamment de leurs âges. Ces critères ont été revisités et adaptés pour la période archéenne et serviront à créer des couches de favorabilité pour cibler au mieux les secteurs propices pour l'exploration de skarn à l'échelle de l'Abitibi. La démarche effectuée pour l'utilisation de chacune de ces couches fera l'objet de la prochaine section.

4.1.1 Les intrusions

Parmi l'ensemble des critères étudiés, un des plus importants aux yeux de Larry Meinert est l'étude des intrusions. Selon lui, l'exploration des skarns devrait débuter par une étude systématique des intrusions (Meinert, 1993). Au Québec, de plus en plus de découvertes récentes mettent en avant le potentiel métallogénique des intrusions pour différents styles métallogéniques, comme Windfall, Mythril ou Cheechoo.

Dans un premier temps, la base de données de référence des skarns de Meinert *et al.*, (2005) a été reportée dans le diagramme de classification de Laurent *et al.*, (2014). Le diagramme de Laurent *et al.*, (2014) est un diagramme basé sur des éléments majeurs (Na₂O, K₂O, FeOT, MgO, Al₂O₃, CaO) et traces (Sr, Ba) qui a été créé à partir des signatures archéennes d'une compilation d'intrusions dans le monde. Il a été validé et utilisé en Abitibi et à la Baie-James lors des projets CONSOREM 2018-02 et 2019-01 (Gigoux, 2019) pour classer les intrusions. Il permet de distinguer les deux grandes familles archéennes qui sont les TTG (tonalite-trondjémite-granodiorite) et les SNK (sanukitoïdes) dans la perspective d'optimiser l'exploration. La base de données de référence (Meinert *et al.*, 2005) est composée de 20 à 40 intrusions par types de skarns à substances dominantes différentes. Ce sont la médiane et la moyenne de ces compositions pour chaque type de skarn qui ont été utilisées dans le diagramme de Laurent (figure 10). La distribution de cette base de données montre que les intrusions post-archéennes associées à des skarns aurifères et cuprifères ont des compositions comparables aux SNK archéens (figure 10A). Tandis que les intrusions associées aux skarns à W, Mo et Sn tombent dans le champ des granites à deux micas. Les intrusions associées au skarn à Cu sont plutôt oxydées tandis que celles associées aux skarns à Au sont réduites (figure 10B, Meinert, 1993, Meinert *et al.*, 2005). À noter que toutes ces caractéristiques sont très similaires à ce que l'on connaît déjà pour les systèmes porphyriques. À noter également que les intrusions associées aux skarns à épidote en Australie ont une chimie SNK comparable à celles d'Abitibi (gisements de Mt Shea, Hannan South, Granny-Smith et Wallaby; Mueller *et al.*, 2007; 2008).

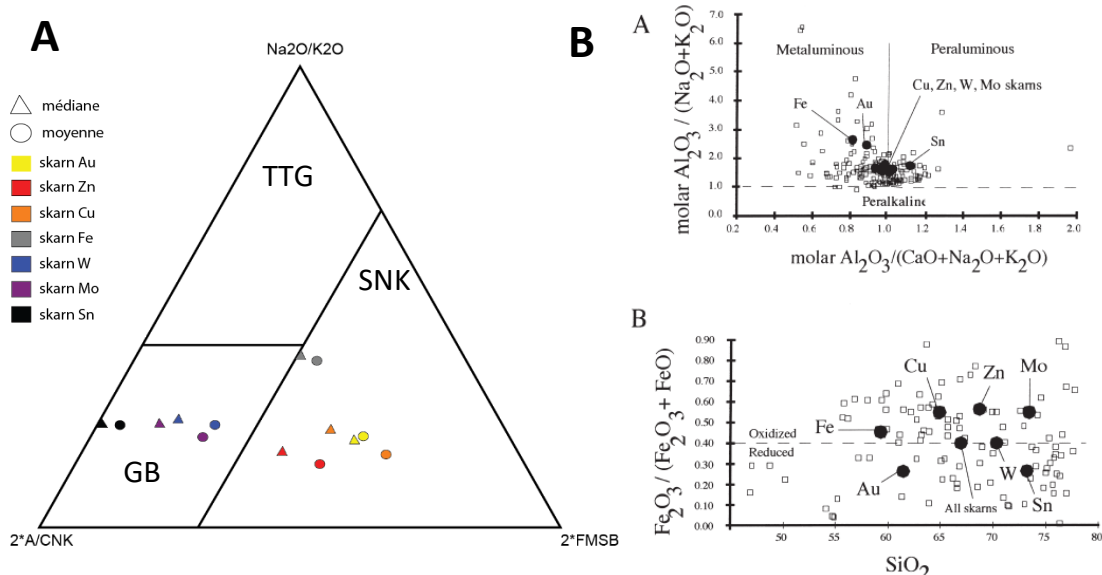


Figure 10. A) Distribution des échantillons d'intrusions associées aux skarns de la base de données de Meinert *et al* (2005) dans le diagramme de Laurent (Laurent *et al.*, 2014). B) Diagrammes binaires de l'aluminosité et de l'état d'oxydation des magmas associés aux skarns en relation avec la substance (Meinert *et al.*, 2005).

Dans un second temps, nous avons comparé, dans ce même diagramme, la chimie de trois intrusions du secteur de East-Sullivan (East-Sullivan, Sabourin et Akasaba) à la chimie des intrusions de référence des skarns (figure 11A). Pour ce faire nous avons eu accès à la base de données privée de O3 Mining, et aux données publiques du SIGEOM et des travaux de Bigot (2021). L'ensemble des faciès du Pluton d'East-Sullivan, trachytique à glomérporphyrique (Figure 9A), est représenté parmi les 13 échantillons considérés dans le diagramme. On note que l'ensemble de ces échantillons tombent dans le domaine SNK du diagramme, et qu'ils ont une chimie comparable aux intrusions associées aux skarns mondiaux à Cu et Au. Ceci est en accord avec les conclusions des travaux de Bigot (2021) qui mentionne que le Pluton d'East-Sullivan est associé à des minéralisations de type skarn à Cu-Au-Mo en conditions oxydantes et qu'il fait partie de la famille des SNK. Malgré l'hétérogénéité des faciès rencontrés, la chimie semble être relativement homogène comme le montre l'enveloppe (en rose) des signatures multiéléments à la figure 11B.

On note que le pluton de Sabourin est composé d'au moins deux phases, dont une qui est comparable à la chimie du Pluton d'East-Sullivan. On le remarque non seulement dans le diagramme de Laurent *et al.*, (2014), mais aussi via la signature multiéléments (figure 11B).

La signature du Pluton d'Akasaba est clairement différente, avec une majorité d'échantillons tombant dans le champ des TTG et seulement deux échantillons de monzonite-monzodiorite dans le champ des SNK (figure 11A). Parmi les « I2 » décrits en forage (BD de O3 Mining), la classification à partir du diagramme de Middlemost en tenant compte de l'altération, suggère la présence de granodiorites, diorites et gabbros. Le Pluton d'Akasaba a une signature appauvrie en incompatibles par rapport aux autres intrusions (figure 11B).

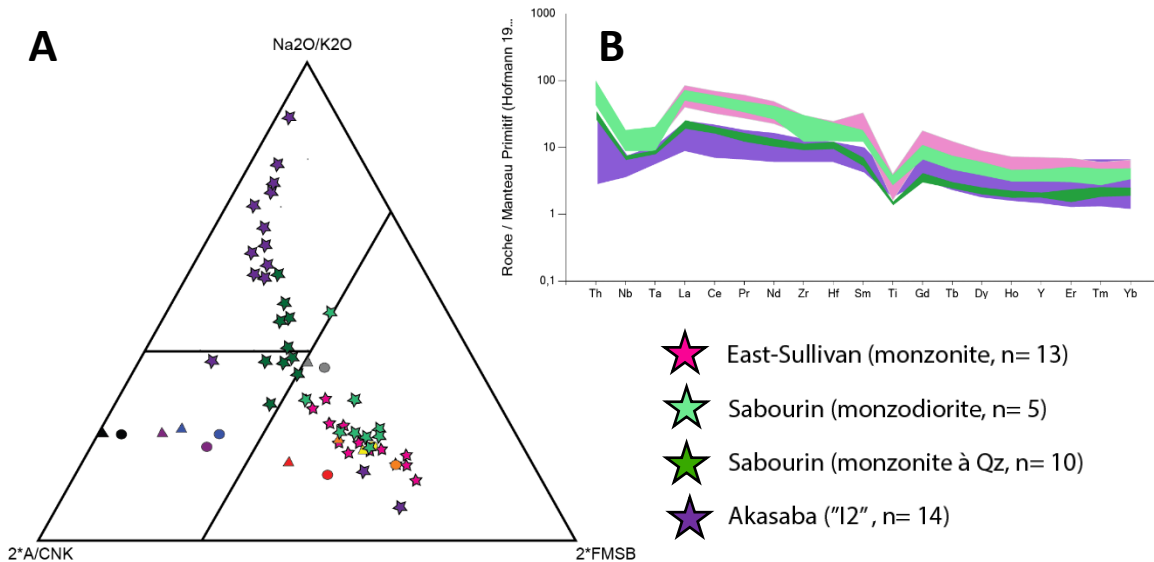


Figure 11. A) distribution des échantillons des plutons de East-Sullivan (étoiles roses), Sabourin (étoiles vertes) et Akasaba (étoiles violet) dans le diagramme de Laurent. Les échantillons de références de la base de données de Meinert *et al.* (2005) sont également montrés. B) signatures multi-éléments des intrusions étudiées. Les données sont issues des travaux de Bigot (2021), du SIGEOM (2021) et de la base de données privée de O3 Mining.

Les intrusions de type TTG pourraient représenter un épisode vraisemblablement antérieur à la mise en place des faciès intermédiaires de type SNK car l'échantillon de dyke daté à 2684 Ma (Pilote *et al.*, 1999) qui est recoupé par le Pluton d'East-Sullivan se localise dans le champ des TTG. Les datations qui seront publiées au cours de l'année 2022 par le MERN viendront solidifier cette hypothèse.

À partir de ces résultats, l'objectif est de cibler les intrusions favorables de type monzonite-monzodiorite-syérite appartenant au champ des SNK à partir de la base de données du SIGEOM (2021). Les échantillons de granodiorite les moins altérés ont également été considérés. La méthode de sélection des échantillons est la même que celle développée dans le projet CONSOREM 2019-01 (Gigoux, 2019). Le résultat de cette sélection est visible à la figure 12.

D'autres travaux sur la favorabilité des intrusions ont déjà été réalisés au CONSOREM pour les minéralisations de type porphyriques à Cu-Au (Faure, 2011) et IOCG (Lafrance, 2009). La méthodologie et les conclusions de ces projets pourraient également s'appliquer aux skarns. En effet la littérature nous prouve que les plus gros skarns sont associés spatialement ou génétiquement à des systèmes porphyriques (Ex : Singer, 2017; Mrozek, 2018) et qu'il existe bien souvent des confusions avec les minéralisations de type IOCG, comme en Australie (Lilly et Taylor, 2019).

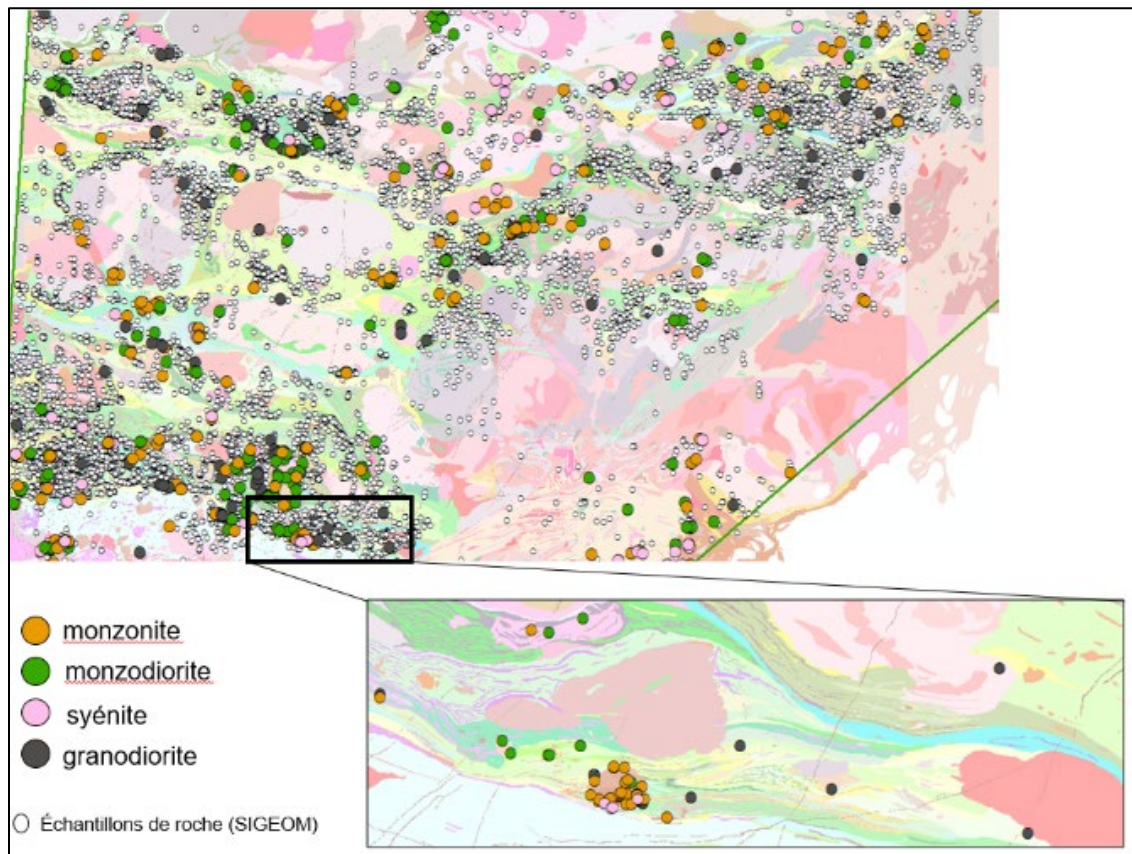


Figure 12. Distribution spatiale des échantillons de type SNK et de granodiorite les moins altérés en Abitibi. Le zoom réalisé sur le secteur de East-Sullivan / Akasaba met en évidence la dominante de monzonite, la présence de granodiorite à l'Est et de monzodiorite à l'Ouest, au niveau du pluton de Valentin.

4.1.2 Les roches hôtes

On observe que dans le secteur d'East-Sullivan les minéralisations de type skarn sont concentrées dans la Formation de Héva. Au-delà d'un contrôle stratigraphique, il s'agit de s'intéresser à la chimie de cette formation géologique. Est-ce que la formation de Héva avait une prédisposition initiale à réagir favorablement pour accueillir ce type de minéralisation ?

Nous savons que les plus gros skarns économiques se sont formés dans des encaissants très réactifs qui sont la plupart du temps représentés par les plateformes carbonatées. À l'Archéen, ces plateformes n'existent pas encore. Il y a cependant quelques occurrences de stromatolites calcaires en place observés dans le secteur de Joutel et Selbaie (Hofmann et Masson, 1994; Legault et al., 2002). Un mécanisme probablement plus réaliste pour expliquer la présence de roches riches en carbonates pour la période archéenne pourrait être la présence de zones d'altérations hydrothermales volcanogènes riches en carbonates (Lafrance, 2003; Legault *et al.*, 2002) ou bien plus tardives associées à des systèmes orogéniques.

La particularité de la Formation de Heva est qu'il y a une épidotisation pervasive de l'encaissant, avec la présence d'amphibole calcique, ce qui en fait un secteur intuitivement riche en CaO. À partir des échantillons de basaltes (V3B) les moins altérés de la Formation de Héva, la distribution des teneurs en CaO des basaltes montre des teneurs médiane et moyenne d'environ 9,5 % (n=131), ce qui est supérieur à la médiane et moyenne des basaltes les moins altérés de l'ensemble de l'Abitibi (n=2516), égale à environ 8 %. La même démarche a été faite pour les échantillons andésitiques (V2J) les moins altérés de la Formation de Héva (n=45). On observe que les teneurs moyenne et médiane en CaO sont de 6,6 % et 6,4 % respectivement alors que la moyenne et la médiane en CaO des andésites fraîches en Abitibi est d'environ 6 % (n= 2095), ce qui est relativement proche. La différence est ainsi plus visible entre les basaltes de la Formation de Héva et ceux du reste de l'Abitibi.

En partant de l'hypothèse que des basaltes et andésites préalablement carbonatés pourraient être propice à la mise en place des skarns (indépendamment du moment où cette carbonatation s'est produite), la norme CO₂ (SV350) ainsi que les proportions normatives de dolomite et d'ankérite ont été calculées à partir des échantillons de basaltes et andésites à l'échelle de l'Abitibi (figure 13). Les résultats sont présentés sous la forme d'interpolation réalisée à partir de la méthode des voisins naturels. Les interpolations ont été focalisées sur les unités basaltiques et andésitiques. Elles sont évidemment dépendantes de l'hétérogénéité spatiale de l'échantillonnage.

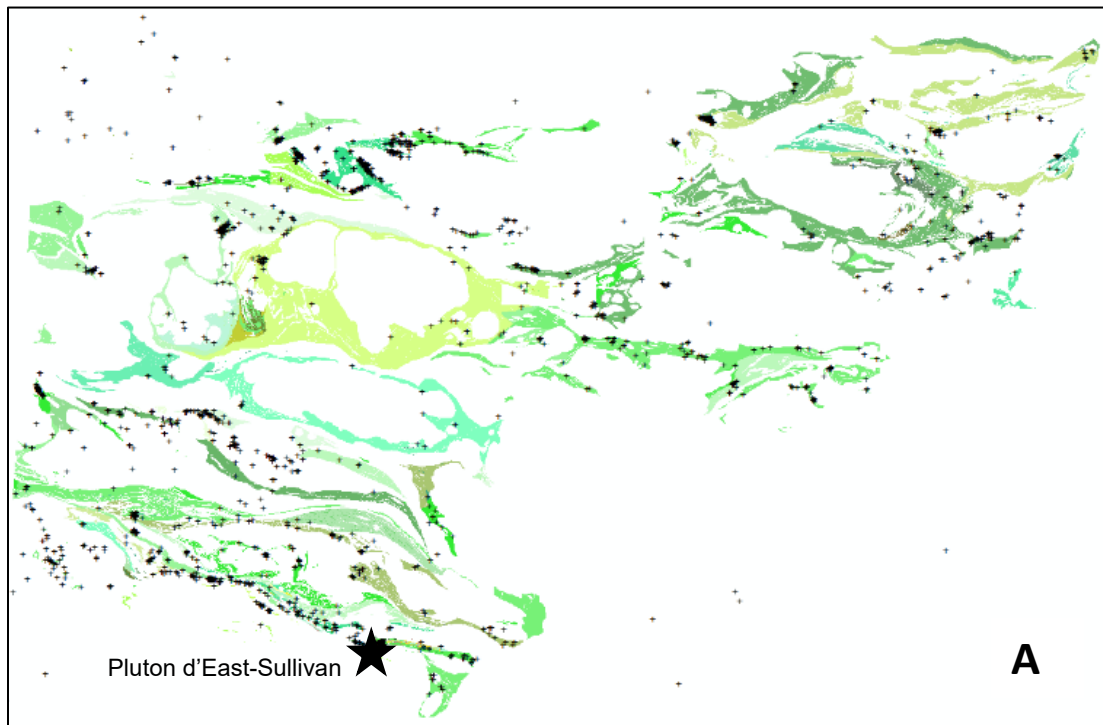


Figure 13. A) Cartographie des ceintures basaltiques et répartition des échantillons de basaltes (V3B, SIGEOM 2021).

Les valeurs de CO₂ normatif (norme bas grade SV350) révèlent que le secteur de Akasaba est ponctuellement riche en CO₂ (figure 13B). Différentes cartes des unités basaltiques ont été réalisées à partir des minéraux normatifs carbonatés soit la dolomite et l'ankérite (figure 14). La présence de volatiles (S, F et P) identifiés à East-Sullivan peut également faciliter le remplacement des roches volcaniques lors du passage des fluides oxydants, comme le suggèrent les travaux de Chang et Meinert (2008) et Lawrence *et al.*, (2017).

La stratégie de ciblage en Abitibi pourrait être de viser les bordures des intrusions de type SNK post 2700 Ma venant recouper des formations volcaniques carbonatées plus anciennes.

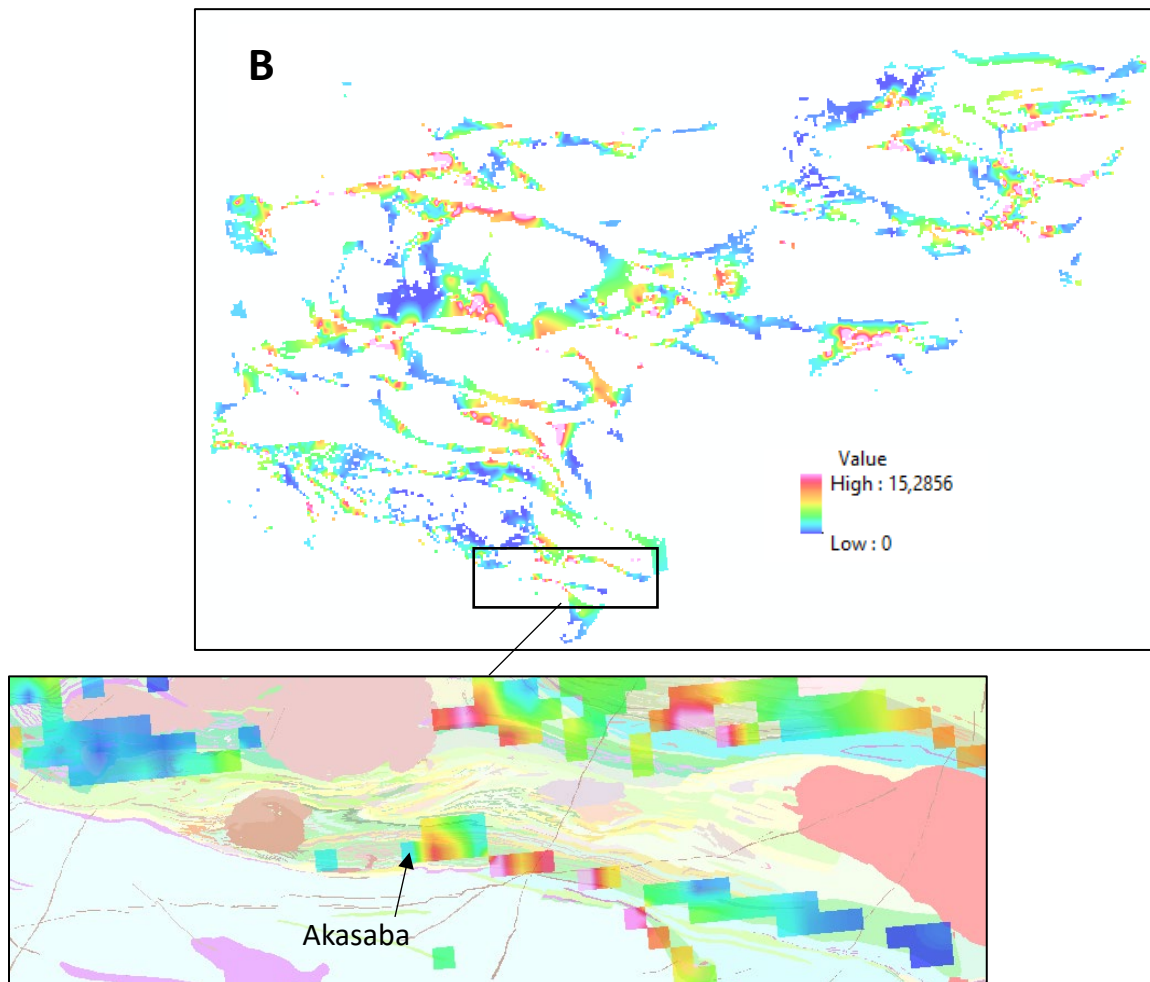


Figure 13. B) interpolation par la méthode des voisins naturels des valeurs de la norme CO₂ dans les basaltes.

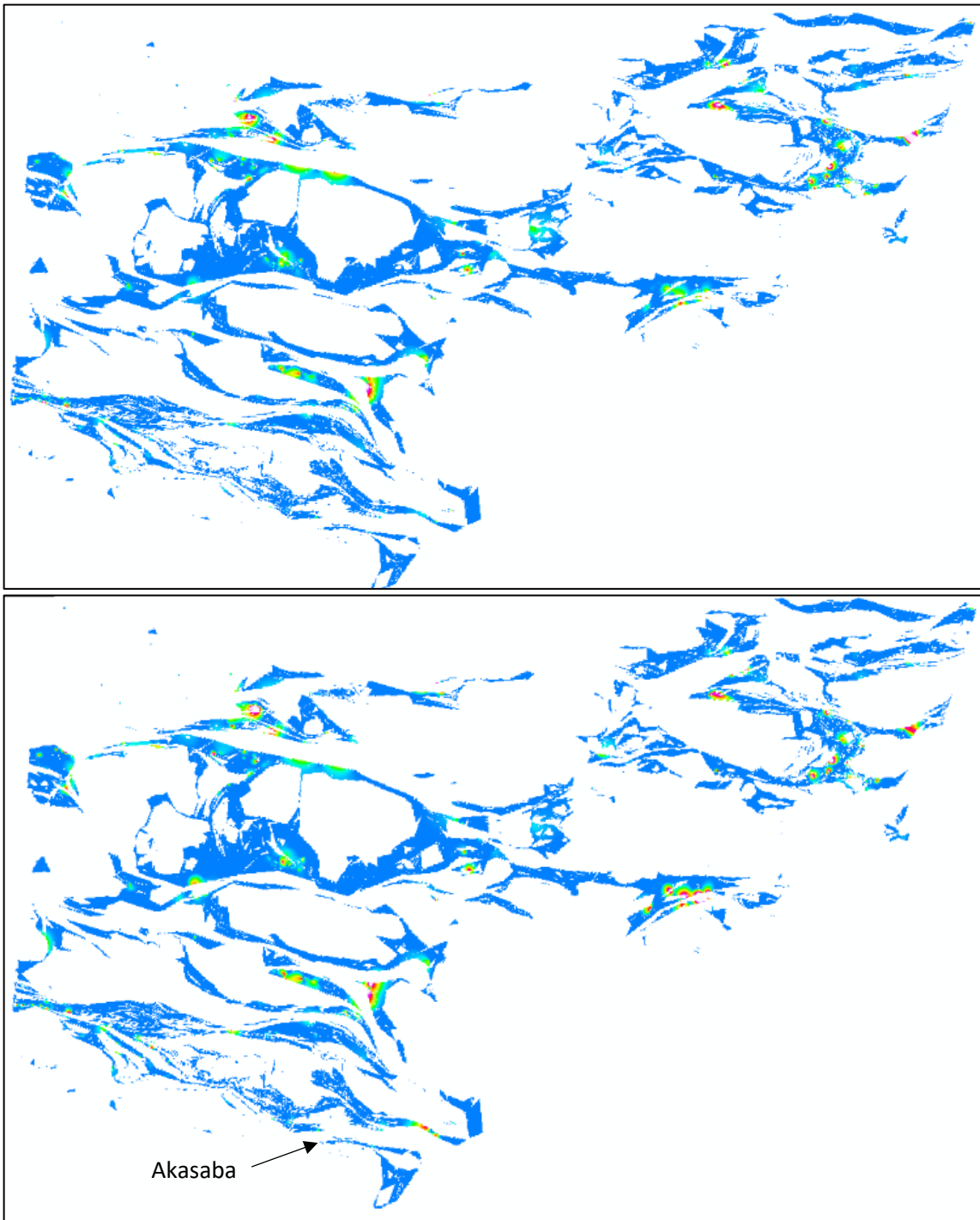


Figure 14. Interpolation des minéraux normatifs carbonatés, la dolomite (en haut) et l'ankérite (en bas).

4.1.3 Hydrothermalisme

Vorobiev (1998) mentionne que les roches mylonitisées sont enrichies en potassium et en baryum tandis que certaines zones de brèches sont probablement lessivées localement avec des gains en Na. Selon lui les dacites (ou granodiorites) du secteur d'Akasaba ont subi une forte albitisation avec une perte simultanée en potassium. Les minéralisations Cu-Au-Mo à proximité du Pluton d'East-Sullivan montrent un lien fort avec le métasomatisme potassique (Bigot, 2021). La molybdénite est restreinte aux faciès porphyriques. L'argent est plutôt associé aux minéralisations skarns et est bien corrélé aux teneurs Au-Cu. Les fortes teneurs en cuivre sont associées préférentiellement aux faciès syénitiques au pourtour du pluton.

Les altérations potassiques sont associées aux minéraux calco-silicatés avec la présence de biotite et de feldspaths potassiques. La présence d'albite est décrite également dans le secteur de East-Sullivan avec des phénocristaux dans le faciès trachytique de l'intrusion et dans l'auréole métamorphique. Les projets CONSOREM 2011-01 et 2012-01 (Rafini, 2014) ont démontré, le long de la faille Cadillac, un net contraste hydrothermal entre l'ouest (secteur Malartic) et le sud-est de la faille (secteur East-Sullivan). Ses travaux ont mis en évidence un antagonisme entre les altérations sodiques et potassiques et que la co-existence des deux se faisait très rare. À l'ouest de Akasaba, on note que l'altération sodique côtoie l'altération potassique, mais ne se superpose pas (figure 15).

4.1.4 Géologie structurale

Lebel (1987) mentionne qu'il n'y a pas de contrôle structural évident à Akasaba, mais que les minéralisations semblent être plutôt contrôlées par la porosité primaire de la roche encaissante. Il y aurait potentiellement un contrôle stratigraphique important, puisque les minéralisations skarns reconnues en Abitibi sont cantonnées à la Formation de Héva, initialement décrite comme proche du sommet des volcanites du Groupe de Malartic par Lebel (1987). Toutefois Vorobiev (1998) décrit localement la présence de structures bréchiques et schisteuses ainsi que des zones fortement mylonitisées.

Néanmoins, la faille Cadillac est localisée non loin des occurrences de skarns au sud du Pluton d'East-Sullivan (Bigot, 2021), et elle a sans nul doute joué un rôle au niveau de la mise en place ou de la remobilisation d'assemblages minéralogiques, métasomatiques ou métamorphiques. Elle est à l'origine de nombreuses minéralisations orogéniques dans le secteur. Bigot (2021) suggère également que la verticalisation des structures volcaniques au sud de l'Abitibi pourrait favoriser le développement vertical des skarns le long de niveaux riches en carbonates dans la Formation de Héva.

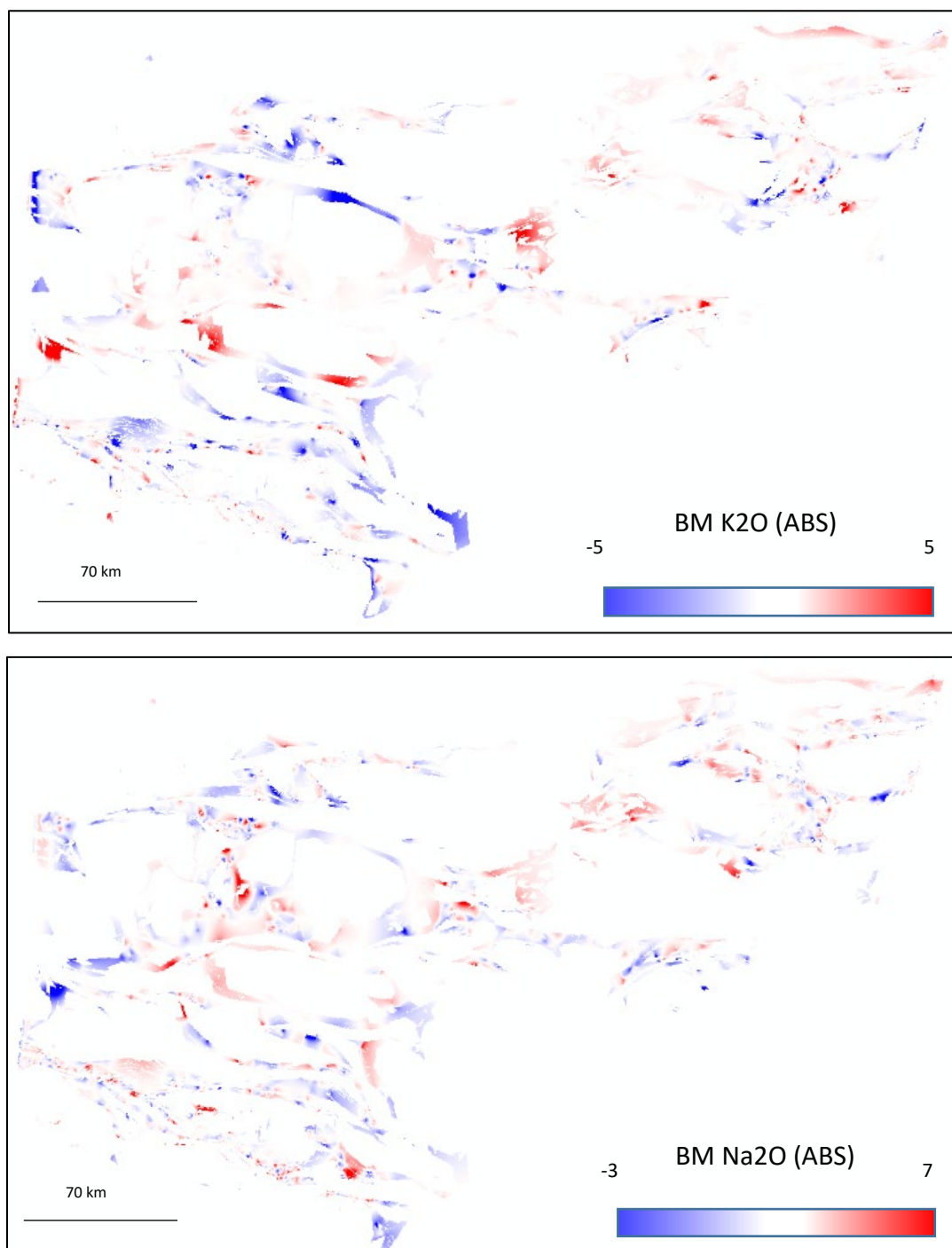


Figure 15. A) Distribution des gains et des pertes interpolées en K₂O et Na₂O (valeurs absolues pour 100 g de précurseur).

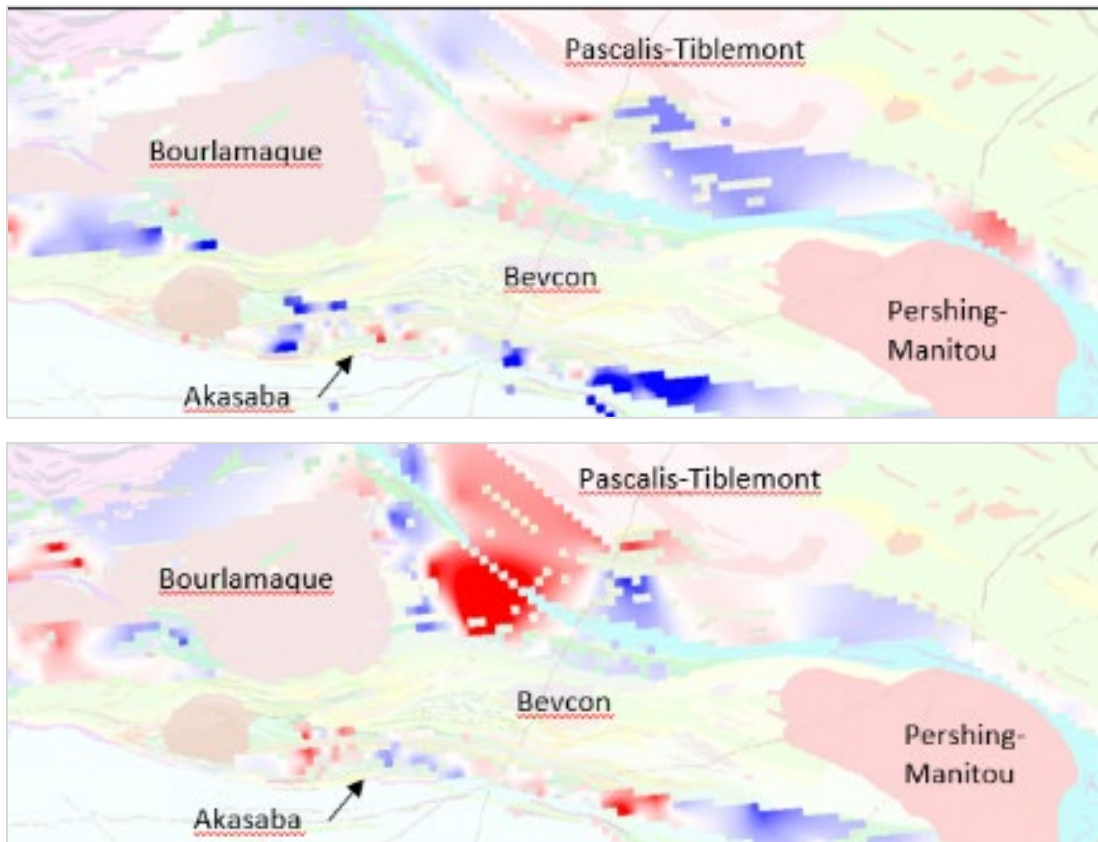


Figure 15. B) Zoom sur le secteur sud-est de l'Abitibi, avec les antagonismes visibles entre les bilans de masses en K₂O (en haut) et Na₂O (en bas) au niveau de Akasaba.

4.1.5 Magnétisme, conditions redox et profondeur de cristallisation

Les minéralisations de type skarn peuvent être associées à des hauts magnétiques dus à la présence de magnétite plus ou moins abondante dans la roche. La présence de plutons oxydés associés spatialement aux skarns montre très régulièrement ces signatures. Les zonalités des skarns sont également contrôlées par les conditions d'oxydoréduction. Des conditions plus oxydantes à proximité du pluton vont favoriser la formation de grenat avec la présence de Fe³⁺ tandis que la formation des pyroxènes va être favorisée par la présence de Fe²⁺ (Chang, 2020). Les variations de la couleur des grenats sont également le résultat des variations redox. En ce sens la signature magnétique peut être un guide.

Le type de substance dominante, Au ou Cu est aussi influencé par les conditions redox du pluton, mais aussi par sa profondeur de cristallisation (Meinert, 1993). Les teneurs en cuivre vont être plus importantes dans des plutons oxydés à assemblage magnétite-titanite à plus fortes profondeurs (> 8 km) que ceux qui vont contenir plus d'or à faible profondeur (< 4 km) et qui vont être associés à des plutons réduits à ilménite. De plus le skarn sera statistiquement plus développé (taille du gisement) lorsqu'il est associé à des plutons qui se mettent en place à plus faibles profondeurs (Meinert, 1993).

Lors de la mise en place des skarns, des formations de graphite peuvent se former suite à la redistribution du carbone et ainsi constituer des conducteurs bien visibles en résistivité électrique.

Cependant la complexité des signatures géophysiques ne permet pas d'utiliser ce critère comme très discriminant en exploration stratégique à l'échelle du territoire. Elle peut néanmoins être utile à localiser des minéralisations à une échelle tactique plus locale une fois le secteur défini à partir des critères les plus discriminants comme pour l'exemple du secteur de East-Sullivan / Akasaba (figure 16). Sur le levé magnétique, on observe que le gîte Akasaba est localisé sur la bordure orientale d'un haut magnétique. Le traitement du même levé avec l'aide du logiciel Magnetomodeleur développé par le CONSOREM permet également d'observer que le gîte est localisé sur la bordure du domaine magnétique de la classe 6 (jaune) et qu'il y a d'autres secteurs d'intérêts avec la même signature. À noter qu'il existe très peu de travaux sur la signature géophysique des gisements de type skarn.

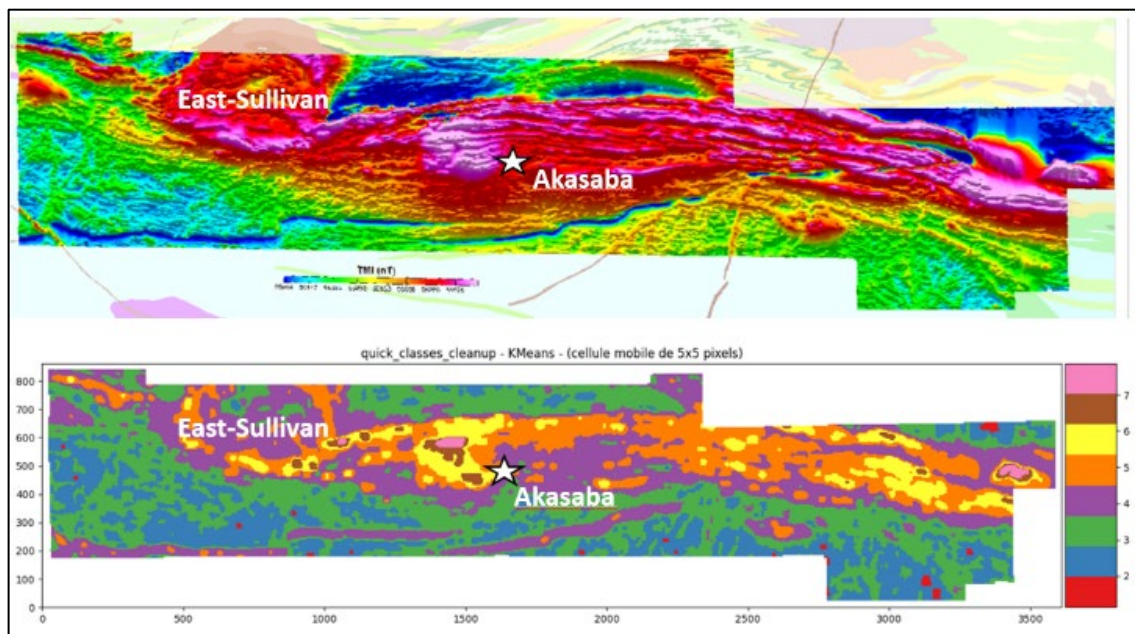


Figure 16. A) Levé aéromagnétique du secteur de East-Sullivan/Akasaba. B) domaines magnétiques calculés avec l'aide du logiciel Magnétomodeleur du CONSOREM (K-moyenne nettoyé).

4.1.6 Métamorphisme

Les skarns se distinguent des autres gisements en termes de conditions de pression et de température (P-T). En effet une des caractéristiques des skarns est le métamorphisme de contact de hautes températures avec la formation de minéraux autour de 500-600 degrés Celsius (ex : grenat et pyroxène) au cours du stade prograde (figure 7) en périphérie des intrusions. Au cours du stade rétrograde, la formation d'épidote, de chlorite et de calcite est très fréquente au faciès schiste vert. L'éternelle difficulté à l'Archéen est de dissocier les assemblages formés au cours du métamorphisme de ceux formés pendant le métasomatisme. Il est donc délicat d'en faire un critère très discriminant pour la vectorisation des skarns. Cependant la présence de grenat, de pyroxène et de magnétite au faciès schiste vert dans les basaltes en bordure d'intrusions favorables peut être considérée comme un indicateur de métamorphisme de contact. C'est la stratégie qui sera adoptée lors de la réalisation de cette couche pour la réalisation des cartes de favorabilité.

4.2 Les couches évidentielles et les cartes de favorabilité par critère

La dernière partie du travail a consisté à utiliser et valoriser les différents critères discriminants identifiés précédemment pour construire un modèle automatisé de production de cartes de favorabilité avec l'aide du module *ModelBuilder* du logiciel ArcGIS. Cette portion du travail a été réalisée avec la collaboration de Mélanie Lambert, géomaticienne au CONSOREM.

Des couches évidentielles traitées de façon individuelle ont été créées comme couches d'entrées afin de produire plusieurs cartes de favorabilité par critère à l'échelle du territoire de l'Abitibi. Un total de 28 couches évidentielles ont été créées et regroupées selon six critères importants qui ont été décrits dans la section précédente. L'exercice a permis de créer six cartes de favorabilités (cartes de favorabilité Critère 1 à Critère 6). L'ensemble des critères et des couches évidentielles sont résumés à la figure 17 et des explications sont apportées pour justifier l'utilisation de chacune de ces couches dans les paragraphes qui suivent. Un regard critique est également exposé afin de considérer la subjectivité du chercheur dans la création des cartes de favorabilité en fonction de l'état des connaissances scientifiques et du poids accordé à chacune des couches travaillées.

4.2.1 Critère 1 : les intrusions favorables (8 couches évidentielles)

Au regard des critères décrits précédemment, les intrusions les moins altérées (diagramme « box plot » d'altération et perte au feu < 2 %) tombant dans le champ des SNK du diagramme de Laurent, ont été ciblées comme favorables (granodiorite-monzodiorite-monzonite-syéénite, n=604).

Les ciblage de plusieurs anciens projets CONSOREM ont été intégrés également. Par exemple, les cibles visant les intrusions favorables pour les minéralisations de type IOCG et porphyriques à Cu-Au dans le cadre du projet 2009-05 (Lafrance, 2009). La méthode développée dans le projet 2011-07 (Faure, 2011) pour le ciblage du potentiel porphyrique Cu-Au a aussi été appliquée aux échantillons de roches intrusives les moins altérés du champ des SNK du diagramme de Laurent *et al.*, (2014). Ainsi les granodiorites (n= 56) et les monzodiorites/monzonites à quartz subalcalines (n=227) ont été testées selon les deux indices simplifié et étendu développés dans le projet 2011-07. Selon cette méthodologie, 15 échantillons de granodiorite et 45 échantillons de

monzodiorites/monzonites à quartz ressortent favorables. À noter que la méthode n'a pas été développée pour les roches alcalines. Le ciblage du potentiel porphyrique est justifié, car la littérature nous prouve que les plus gros skarns économiques (ex. Antamina au Chili) sont rattachés à un ou plusieurs systèmes porphyriques. D'autre part nous avons mentionné précédemment qu'il pouvait exister bien souvent des confusions entre les minéralisations skarns et les minéralisations de type IOCG, comme en Australie.

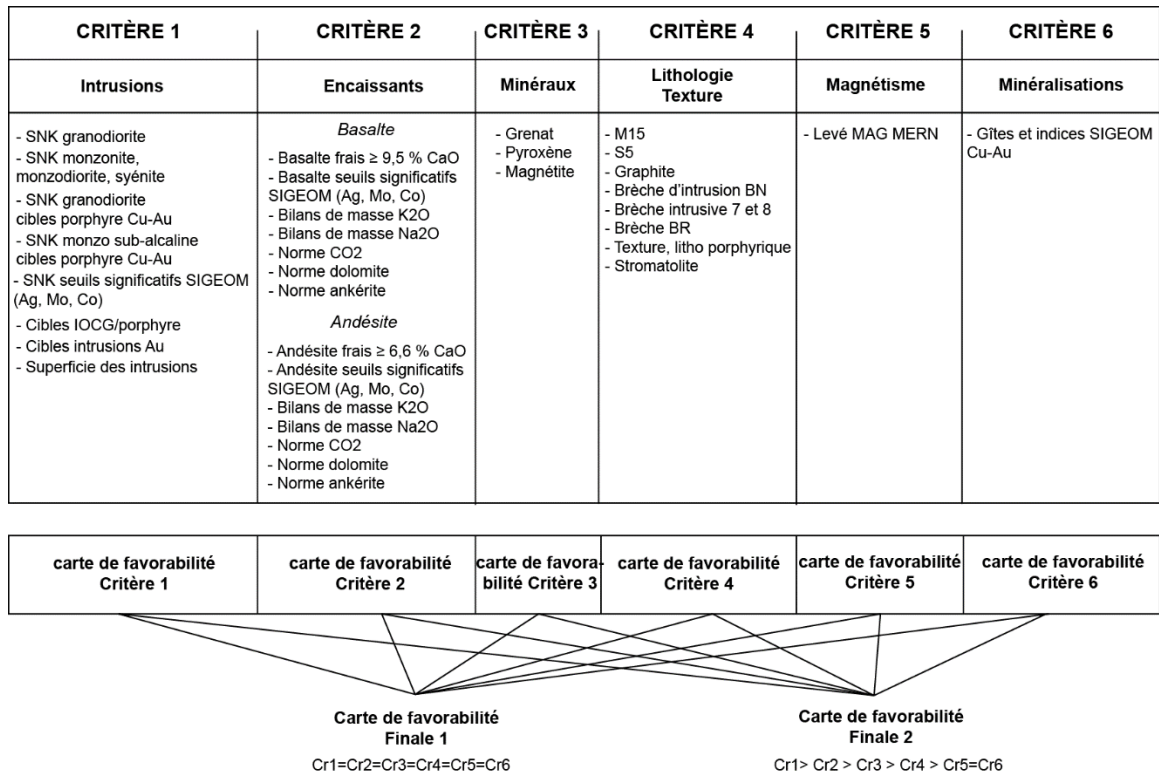


Figure 17. Tableau synthétique des critères et couches évidentielles utilisées pour la réalisation du modèle automatisé qui permet de générer les cartes de favorabilité. À partir de celles-ci seront réalisées les deux cartes de favorabilité finale 1 et 2, en fonction des connaissances géologiques. La carte Finale 1 est dite plus objective, car toutes les cartes de favorabilité par critère ont le même poids ($Cr1=Cr2=Cr3=Cr4=Cr5=Cr6$) tandis que la carte Finale 2 est plus subjective. Le poids accordé au critère 1 ($Cr1$) est plus important que les autres, décroissant d'un facteur 5 à 1.

Les dernières anciennes cibles qui ont été intégrées sont celles générées dans le cadre du projet 2010-03 (Faure, 2010). Il s'agit des cibles d'exploration pour l'or associé aux syénites. Les cibles sont localisées dans la partie nord-est de l'Abitibi, le long du couloir de déformation Lamarck.

Une autre couche évidentielle a été générée à partir des seuils anomaux significatifs déterminés dans les roches en Abitibi par le MERN. Des valeurs de Mo (≥ 5 ppm), Ag (≥ 1 ppm) et Co (≥ 100 ppm) ont été utilisées comme seuils anomaux et appliqués aux échantillons SNK présélectionnés

en amont. Le molybdène est réputé pour être associé aux systèmes porphyriques, l'argent est associé aux minéralisations du Pluton d'East-Sullivan et de Akasaba. Enfin le cobalt a été également sélectionné au regard des résultats obtenus dans le projet 2021-03 (Genna, 2021) sur la géochimie des pyrites de Akasaba et East-Sullivan.

La dernière couche évidentielle a été réalisée à partir de la carte géologique du SIGEOM (2022). Les polygones de syénite, monzodiorite, monzonite et granodiorite ont été extraits. Chacune des superficies a été calculée puis l'outil logique flou a été appliqué à la distribution de ces valeurs. L'idée étant d'accorder plus de poids aux intrusions de plus petites superficies (environ $< 20 \text{ km}^2$).

Pour la création de la carte de favorabilité du critère 1 à partir des huit (8) couches évidentielles, les facteurs poids suivants ont été attribués :

- Pour les couches ponctuelles de cibles générées dans les anciens projets : 8
- Pour la couche ponctuelle SNK à laquelle les seuils du SIGEOM ont été appliqués : 7
- Pour les couches ponctuelles SNK granodiorite, monzo, syénite : 6
- Pour la couche matricielle des superficies des intrusions : 5

Les zones de favorabilité ont été considérées jusqu'à 2 km autour de chaque donnée ponctuelle d'intrusion.

4.2.2 Critère 2 : les encaissants favorables (7 couches évidentielles)

Sept couches évidentielles similaires ont été utilisées pour créer deux modèles en fonction de la nature des encaissants volcaniques, un modèle pour les basaltes (V3B) et un modèle pour les andésites (V2J). En effet les skarns riches en épidote décrit au sud-est de l'Abitibi (Formation de Héva) et en Australie sont associés aux roches mafiques basaltiques, mais peuvent également être encaissés dans des roches intermédiaires andésitiques. Les deux lithologies coexistent au sein de la Formation de Héva.

Les échantillons de basaltes frais, dont les teneurs en CaO sont égales ou supérieures à 9,5 %, constituent une des premières couches évidentielles. Cette valeur est basée sur la moyenne/médiane des basaltes de la Formation de Héva, qui est supérieure à celles des basaltes frais de l'ensemble de l'Abitibi (environ 8,5 %). Une zone tampon de 2 km autour de chaque échantillon a été appliquée pour cibler une zone plus large que la donnée ponctuelle en tant que telle. Un facteur poids de 7 est appliqué pour cette couche.

D'autres couches évidentielles sont basées sur les bilans de masses en K_2O et Na_2O calculés à partir de la méthode des précurseurs modélisés avec un facteur poids appliqué de 4 et 3 respectivement, ainsi que sur le calcul de la norme CO_2 (facteur poids de 6) et les calculs de minéraux normatifs dolomite et ankérite au faciès SV350 (facteur poids de 5).

Les seuils significatifs en Mo, Ag et Co établis par le MERN dans les échantillons de roches constituent la dernière couche évidentielle utilisée.

4.2.3 Critère 3 : les minéraux favorables (3 couches évidentielles)

La présence de grenat, pyroxène et magnétite à proximité des intrusions favorables (dans un rayon de 2 km) a été intégrée au modèle. L'épidote est quant à elle omniprésente en Abitibi, tout comme la calcite et les amphiboles qui ne sont pas très discriminantes non plus dans le contexte

ciblé. Ce sont des minéraux qui peuvent être le résultat de métamorphisme rétrograde ou de métagénèse. Le choix a été de se concentrer sur la présence des trois minéraux, bien que la magnétite puisse être retrouvée partout en Abitibi, si elle est associée spatialement à la présence de grenat/pyroxène en bordure d'intrusion, sa présence devient alors pertinente à considérer. Le même poids a été attribué à chacune de ces 3 couches pour la carte de favorabilité du critère 3. Un rayon de favorabilité de 2 km a été considéré autour de chaque donnée ponctuelle.

4.2.4 Critère 4 : les lithologies et textures favorables (8 couches évidentielles)

Les lithologies décrites avec le code M15 dans le SIGEOM correspondent aux roches métagénétiques dont les skarns font partie, et elles constituent une couche évidentielle importante. Un facteur poids de 8 lui a été appliqué.

Selon Vorobiev (1998), les zones de skarns à Akasaba sont associées aux contacts lithologiques tectonisés et aux zones de bréchification. Les textures et lithologies de type brèche ont été extraites à partir des descriptions de géofiches, des affleurements de compilation et des forages du SIGEOM. Il est nécessaire néanmoins de rester très prudent sur la correspondance exacte des codes utilisés pour décrire ce type de texture. En effet le code S5 par exemple correspond au départ à des brèches sédimentaires. Dans le détail, ce code a été largement utilisé bien au-delà du contexte sédimentaire. Le poids accordé à cette couche sera moins important que les codes brèche d'intrusion (BN) et brèche intrusive 7-8 (géofiches) utilisés pour mentionner la présence de brèches intrusives. Le code brèche au sens large (BR) en forage a également été utilisé comme couche avec un facteur poids de 7.

Les textures et lithologies porphyriques ont été ciblées également. Une couche a été créée à partir de la combinaison des codes MP (megaporphyrique), MR (microporphyrique), OY (porphyroïde), PJ (porphyroclastique), PO (porphyrique), et PP (porphyre) décrits en forage et dans les géofiches du SIGEOM. Un facteur poids de 8 a été accordé à toutes ces textures.

Les lithologies graphiteuses ont été considérées comme favorables d'après les occurrences retrouvées en Australie à proximité des skarns. Lors de la mise en place des skarns, des formations de graphite peuvent se former suite à la redistribution du carbone et constituer notamment des conducteurs bien visibles en résistivité électrique. Le graphite peut être un guide local pour la découverte de skarn si les autres conditions sont réunies. Un facteur poids de 6 a été accordé à cette couche.

Puis enfin, bien qu'anecdotique à l'Archéen en Abitibi, des fragments de stromatolites dans le secteur de Selbaie-Joutel peuvent très bien constituer des reliques d'un encaissant carbonaté favorable pour accueillir des skarns (Hofmann et Masson, 1994 ; projet CONSOREM 2011-08, Faure). Ce ne serait pas la première découverte de minéralisations de type skarn associées aux stromatolites comme avec l'exemple des skarns à Fe-Cu-Au dans le Missouri dans un contexte de caldera (Lowell et Noll, 2001). Un facteur poids de 6 a été appliqué à cette couche.

4.2.5 Critère 5 : magnétisme (1 couche évidentielle)

La couche magnétique résiduelle homogénéisée à l'échelle de l'Abitibi du MERN a été utilisée comme couche évidentielle. L'objectif a été de sélectionner les hauts magnétiques. Le seuil de

coupure choisi à partir de la couche matricielle est basé sur les signatures magnétiques du secteur de Akasaba et d'East-Sullivan (Figure 16A).

4.2.6 Critère 6 : Indices/gîte minéralisés Cu et Au (1 couche évidentielle)

La couche de données ponctuelles des gîtes et indices de cuivre et d'or du SIGEOM a été utilisée pour créer la carte de favorabilité Critère 6. Cette couche ponctuelle étant particulièrement sensible aux secteurs connus et fortement travaillés par rapport à ceux qui ne sont pas et qui représentent un fort potentiel, un choix de poids a été effectué pour la réalisation des cartes de favorabilité finale comme discuté ci-dessous. Pour la réalisation de la carte de favorabilité Finale 2, le choix a été d'accorder un poids faible (= 1) par rapport aux cartes de favorabilité des critères 1 et 2.

4.3 Cartes de favorabilité finales

Les cartes de favorabilité Finales 1 et 2 ont été créées à partir de l'outil « weighted sum » disponible dans ArcGis qui a permis d'additionner les six cartes de favorabilité par critère déjà créés (carte de favorabilité Critère 1 à Critère 6; figure 17). La carte de favorabilité Finale 1 est dite plus objective, car tous les critères ont le même facteur poids ($Cr1=Cr2=Cr3=Cr4=Cr5=Cr6$) alors que pour la carte de favorabilité Finale 2, des facteurs poids décroissants ont été accordés en partant d'un facteur poids de 5 pour le Cr1 à un facteur poids de 1 pour les Cr5 et Cr6. Cette différence importante pour la production des deux cartes finales a des implications sur les résultats. Par exemple, cela ressort bien visuellement sur la carte Finale 2, avec le contour des intrusions qui est beaucoup plus marqué que sur la carte Finale 1, dite plus objective (figure 18). La résolution utilisée dans les deux modèles est de 500 m.

À partir de ces deux cartes de favorabilité finales, des cibles identifiant les secteurs favorables pour l'exploration de skarn à l'échelle de l'Abitibi ont été identifiées. Un seuil supérieur au 96^e centile par rapport à la distribution totale des données de ces cartes a été choisi pour identifier les zones anormales. Les cibles matricielles issues de cette sélection sont illustrées à la figure 19A. On peut noter que le modèle a réussi à bien identifier les secteurs connus, mais qu'il est également un peu biaisé par la densité des données comme illustrée à la figure 19B.

À partir d'un second modèle automatisé de production de cartes de favorabilité avec l'aide du module *ModelBuilder* du logiciel ArcGIS, ces cibles en format matriciel ont été transformées en polygone afin d'avoir accès à l'information statistique pour chacun d'entre eux et de connaître l'influence de chaque critère sur la cible en question. Chacun des polygones a son propre « score » de classification qu'il est possible de faire ressortir à l'échelle d'un secteur. Par exemple, il est ainsi possible de voir que le secteur de Akasaba est marqué par la présence d'un polygone rouge à fort score (>44,56) et que c'est le critère 4 qui a le plus de poids (figure 19C). On note également dans ce secteur la présence d'un second polygone rouge au nord-ouest, dont le score est plus élevé que celui de Akasaba et qui est localisé entre les plutons de Pressac et de Lacorne, au sein de la Formation volcanique de La Motte-Vassan. Ce polygone cible est localisé à proximité de la mine Marbridge, correspondant à des lentilles de sulfures massifs à Ni-Cu dominant ($\pm Co$ et EGP) dans des roches ultramafiques serpentinisées. Statistiquement, les critères ayant le plus de poids sur le score final du polygone sont le critère 4 des textures et celui du critère 2 des encaissements favorables.

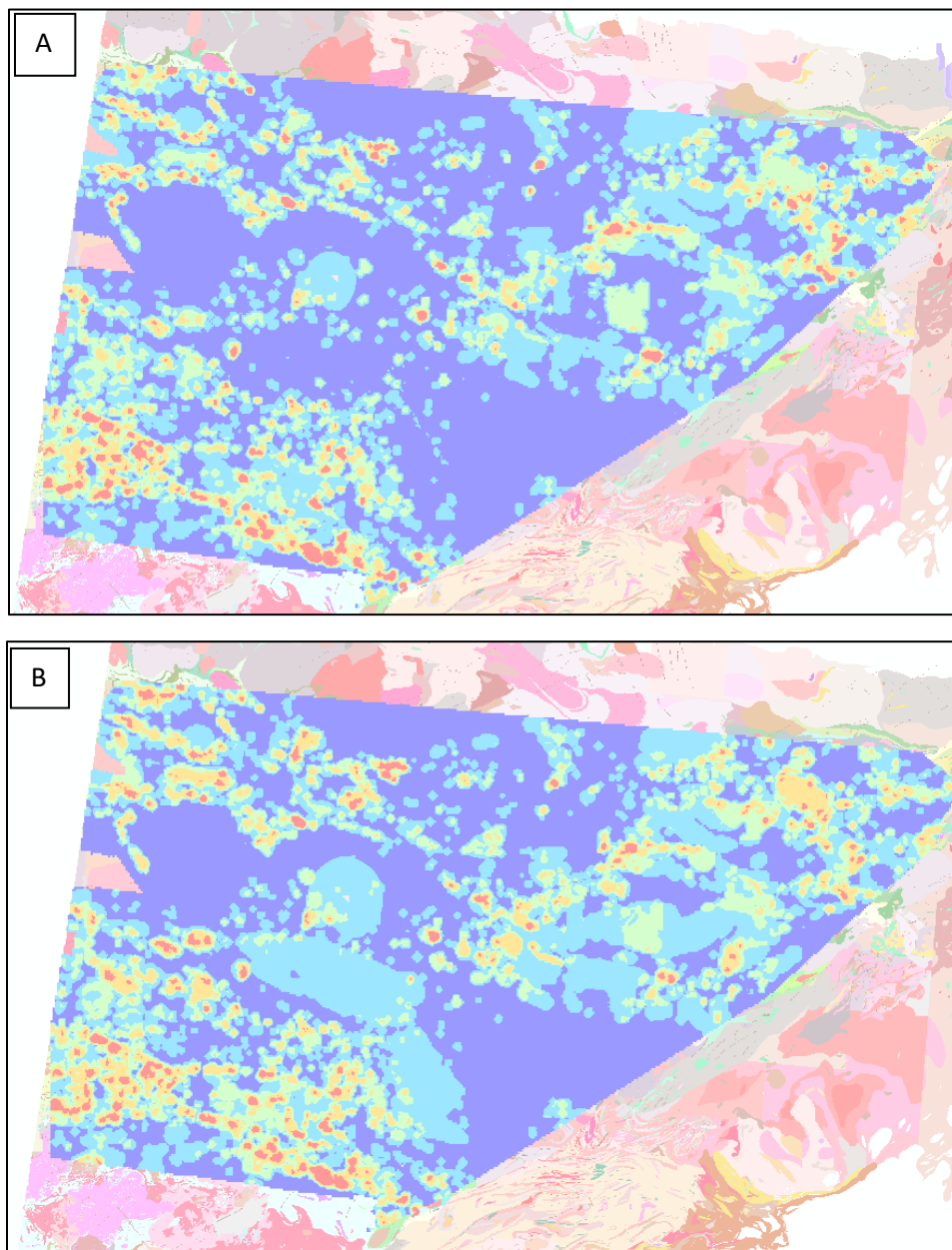


Figure 18. A) carte de favorabilité Finale 1 dite objective où toutes les cartes de favorabilité additionnées par critère ont le même poids, soit $Cr1=Cr2=Cr3=Cr4=Cr5=Cr6$. B) carte de favorabilité Finale 2 dite subjective où les cartes de favorabilité additionnées par critère ont des poids différents, soit $Cr1>Cr2>Cr3>Cr4>Cr5=Cr6$. À noter que Cr5 et Cr6 ont le même poids, égal à 1 tandis que Cr1 a un facteur poids de 5.

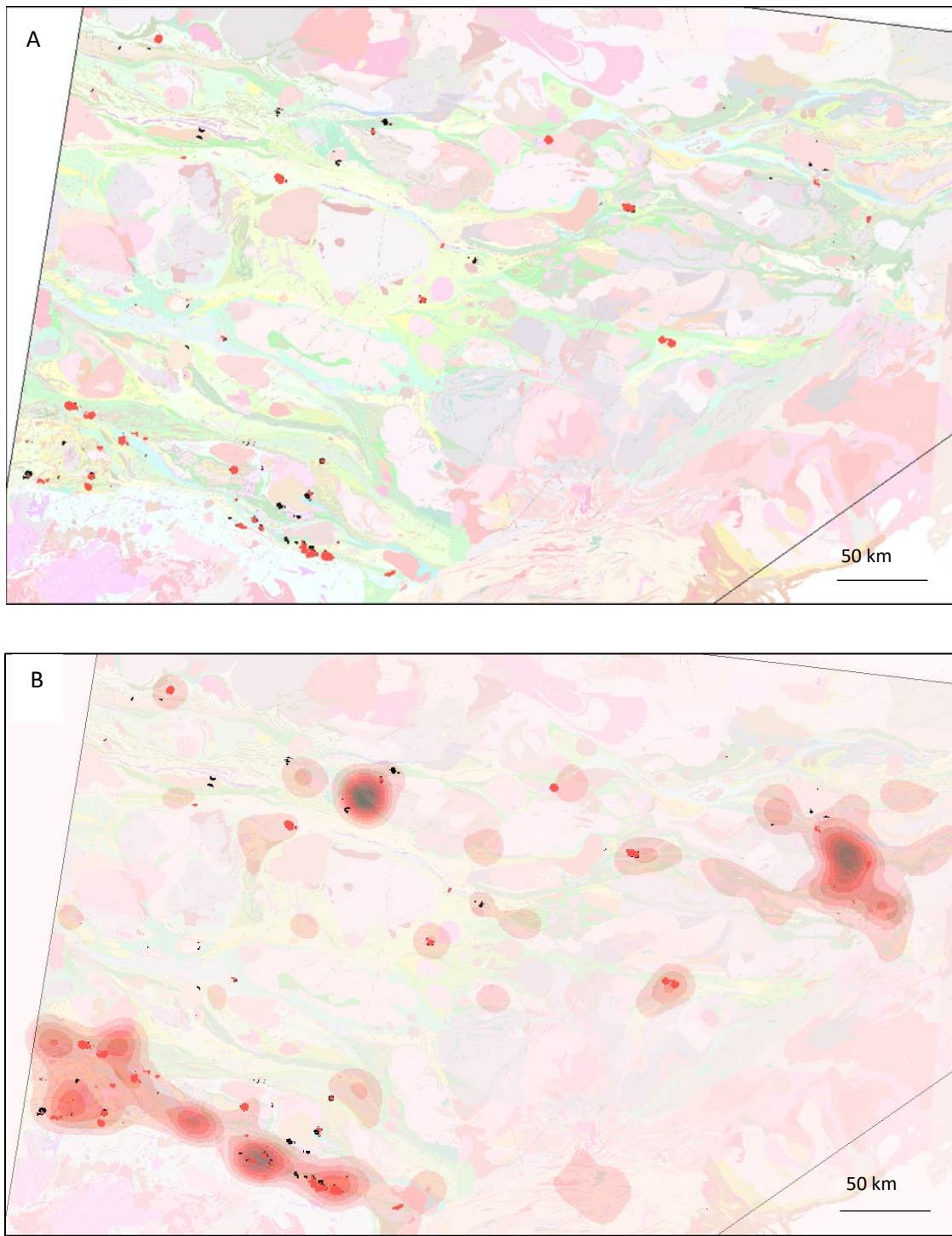


Figure 19. A) Cibles sélectionnées à l'échelle de l'Abitibi (> 96^e centiles). Les cibles en rouge sont issues de la carte de favorabilité Finale 1 et celles en noires de la carte de favorabilité Finale 2. B) Densité des données superposée aux cibles illustrant le biais dans la distribution des données utilisées. Les zones rouge foncé représentent les principaux camps matures d'exploration en Abitibi (Val-d'Or, Matagami et Chibougamau).

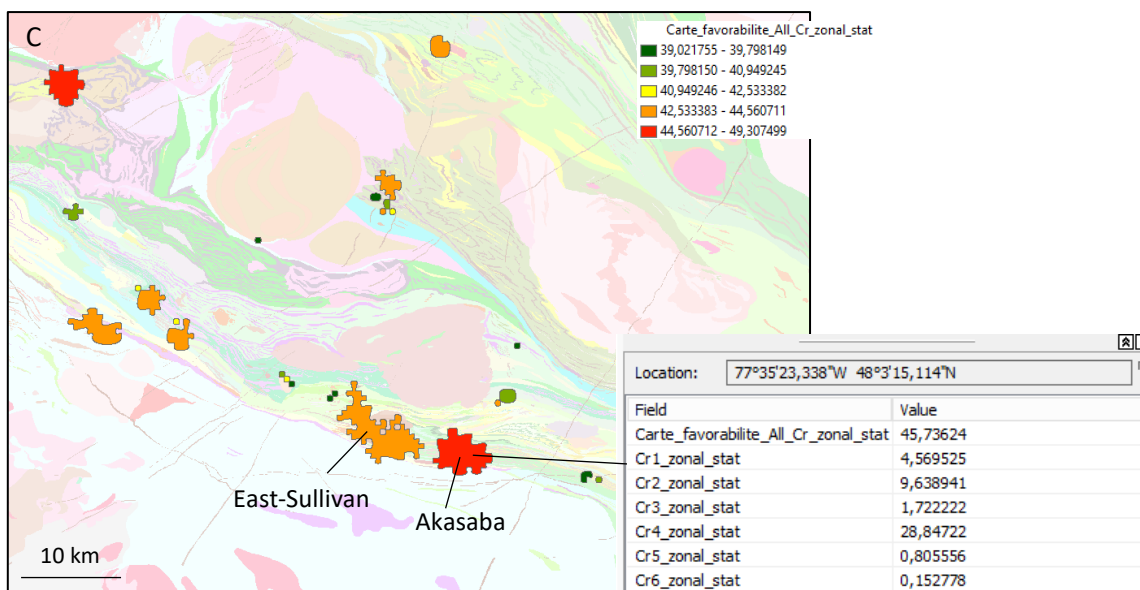


Figure 19. C) Classification des cibles par score dans le secteur du Pluton d'East-Sullivan et de Akasaba. La table d'information statistique par critères correspond à celle du polygone de Akasaba en rouge, qui représente un des deux polygones ayant le plus fort score du secteur. Le critère 4 (texture et lithologie) a le plus de poids ici (28,8) sur le score final (45,7).

En résumé, dans les encaissants basaltiques, 117 polygones ont été générés à partir de la carte de favorabilité Finale 1 et 108 polygones à partir de la carte de favorabilité Finale 2. Au total, il y a 73 cibles communes aux deux cartes, soit 60 % des cibles.

Dans les encaissants andésitiques, 130 polygones ont été générés à partir de la carte de favorabilité Finale 1 et 88 polygones à partir de la carte de favorabilité Finale 2. Au total, 53 cibles sont communes aux deux cartes, soit 40 % des cibles.

Les ciblage dans les basaltes et les andésites représentent 45 % de cibles communes.

5 Conclusion

Ce projet a permis de réévaluer le potentiel des minéralisations de type skarn, considérées comme anecdotiques à l'Archéen, à l'échelle de l'Abitibi. Les skarns archéens existent, mais ils ont des caractéristiques bien spécifiques au faciès schiste vert. Un épisode métallogénique favorable aux skarns, d'âge post 2684 Ma, est présent au sud-est de l'Abitibi dans les secteurs de Akasaba et de East-Sullivan. Les bordures des intrusions sanukitoïdes favorables encaissées dans des basaltes et andésites de textures, d'altérations et de chimie favorables sont des cibles potentielles ailleurs en Abitibi. Parmi la centaine de cibles générées, certaines bordures d'intrusions dans des secteurs sous explorés à faible densité de données sont ressorties comme favorables pour des minéralisations de type skarn et porphyrique. En effet, au regard des affinités

qu'il existe dans la littérature entre la présence de skarn et celle de porphyre, le ciblage final a été élargi au style porphyrique. Les couches évidentielles suggérées et le modèle proposé pourraient être appliqués à la Baie-James.

6 Remerciements

Je remercie Mélanie Lambert pour avoir contribué aux résultats de ce projet, ainsi que Benoit Lafrance et Silvain Rafini pour la relecture du rapport.

7 Lexique

Endoskarn : métasomatisme de l'intrusion (proximale)

Exoskarn : métasomatisme de l'encaissant carbonaté ou volcanique (distal)

Hornfel: mot allemand synonyme de cornéenne correspondant à une roche calco-silicatée en position distale par rapport au protolithe, résultant du métamorphisme de l'encaissant (Meinert et al., 2005).

Cornéenne : métamorphisme de contact synonyme de hornfel.

Mantos : « couverture » en espagnol, allure stratiforme, à plusieurs km de l'intrusion (position distale), gisement de remplacement sédimentaire.

Skarnoïde : roche calco-silicatée à grains plus fin que le skarn, pauvre en Fe, localisée à un emplacement intermédiaire par rapport à l'intrusion. Sa composition reflète en partie la composition du protolithe. Il est le résultat des prémices du métamorphisme de contact.

Tactite : connotation génétique (Hess, 1919) qui n'est plus à la mode, sauf aux États-Unis. Ce terme implique un métamorphisme de contact associé à la présence d'une intrusion.

8 Références

Allcock, J. (1982). Skarn and porphyry copper mineralization at Mines Gaspé, Murdochville, Quebec. *Economic Geology*, 77, 971-999.

Bigot, F. (2021). Les minéralisations à Cu-Au de type skarn du stock de East-Sullivan, ceinture de roches vertes de l'Abitibi, Québec, Canada. Mémoire de maîtrise, UQAM, p181.

Bucci, L., Hagemann, S.G., Groves, D.I., Standing, J.G. (2000). The Archean Chalice gold deposit: a record of complex, multistage, high-temperature hydrothermal activity and gold mineralisation associated with granitic rocks in the Yilgarn Craton, Western Australia. *Ore Geology Reviews*, 19, 23-67.

Chang, Z., Meinert, L.D. (2008). Zonation in skarns – complexities and controlling factors. Conference paper, PACRIM congress 2008.

Chang, Z. (2020). Skarns: zoning patterns and controlling factors. SEG travelling lecturer Webinars.



- Chen, Y.J., Chen, H.Y., Z, K., Pirajno, F., Zhang, Z.J. (2007). Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: an overview. *Ore Geology Reviews*, 31, 139-169.
- Dawson, K.M., Kirkham, R.V., (1996). Skarn copper; In *Geology of Canadian Mineral Deposit Types* (O.R. Eckstrand, W.D. Sinclair and R.I. Thorpe, eds.). Geological Survey of Canada, *Geology of Canada* 8, p. 460-476.
- Einaudi, M.T., Meinert, L.D., Newberry, R.J. (1981). Skarn deposits. *Economic Geology*, 75th Anniversary Volume, 317-391.
- Einaudi, M.T. (1981). General feature and origin of skarns associated with porphyry copper plutons. In S.R. Titley (ed), *Advances in geology of the porphyry copper deposits* (p. 185-209). The University of Arizona Press, Tucson.
- Einaudi, M.T., Burt, D.M. (1982). Introduction Terminology, Classification, and composition of skarn deposits. *Economic Geology*, 77, 745-754.
- Faure, S. (2011). Porphyres Cu-Au subcalins : caractéristiques géochimiques et cibles d'exploration dans les terrains de haut grade métamorphique archéens et paléoproterozoïque au Québec. *Projet CONSOREM 2011-07*, p31.
- Faure, S. (2011). Réévaluation paléo-environnementale du complexe volcanique de Selbaie et de son potentiel métallogénique. *Projet CONSOREM 2011-08*, p33.
- Galley, A.G., Jonasson, I.R., Watkinson, D.H. (2000). Magnetite-rich calc-silicate alteration in relation to syn-volcanic intrusion at the Ansil volcanogenic massive sulfide deposit, Rouyn-Noranda, Quebec, Canada. *Mineralium Deposita*, 35, 619-637.
- Gigoux, M. (2019). Typologie des intrusions felsiques à intermédiaires pour l'exploration à l'Archéen. *Rapport Consorem 2018-02 (phase 1) et 2019-01 (phase 2)*, p43.
- Groves, D.I., Santosh, M., Goldfarb, R.J., Zhang, L. (2018). Structural geometry of orogenic gold deposits: implications for exploration of world-class and giant deposits. *Geoscience Frontiers*, 9, 1163-1177.
- Hofmann, H.J., Masson, M. Archean stromatolites from Abitibi greenstone belt, Quebec, Canada. *Geological Society of America Bulletin*, 106, 424-429.
- Jansson, N.F., Rodney, Allen, R.L. (2011). The origin of skarn beds, Rylshyttan Zn-Pb-Ag + magnetite deposit, Bergslagen, Sweden. *Mineralium Deposita*, DOI 10.1007/s00710-011-0154-x.
- Jébrak, M., Marcoux, E. (2008). *Géologie des ressources minérales*. Livre p685.
- Lafrance, B. (2009). La filière plutonique comme outil d'exploration pour les IOCG : applications en Abitibi. *Rapport CONSOREM 2009-05*, p72.
- Lavoie, J., Allard, M., Simard, M., Cyr, J.L. (2021). Traitement automatique des levés magnétométriques : le logiciel prototypage CONSOREM « Magnetomodeleur », phase V. En cours.
- Laurent, O., Martin, H., Moyen, J.F., Doucelance, R. (2014). The diversity and evolution of late-Archean granitoids: evidence for the onset of "modern-style" plate tectonics between 3.0 and 2.5 Ga. *Lithos*, 205, 208-235.
- Lawrence et al 2017



Lebel, J. (1987). Gîtologie de la mine d'or Akasaba, Abitibi, Québec. Mémoire de maîtrise, École polytechnique de Montréal, p37.

Legault, M., Gauthier, M., Jébrak, M., Davis, D., Baillargeon, F. (2002). Evolution of the subaqueous to near-emergent Joutel volcanic complex, Northern Volcanic Zone, Abitibi Subprovince, Quebec, Canada. *Precambrian Research*, 115, 187-221.

Lilly, R., et Taylor, R. (2019). When does my IOCG become a skarn ? and does it matter ? GSSA IOCG Workshop, The University of Adelaide, Australie.

Lowell, G.R., Noll JR, P.D (2001). Fe-Cu-Au-bearing scapolite skarn in moat sediment of the Taum Sauk Caldera, southeastern Missouri, USA. *Mineralogical magazine*, 65, 373-396.

Meinert, L. (1993). Igneous petrogenesis and skarn deposits. In Kirkham, R.V., Sinclair, W.D., Thorpe, R.I., and Duke, J.M., eds., *Mineral Deposit modeling: geological Association of Canada*, Special paper 40, 569-583.

Meinert, L.D. (1995). Compositional variation of igneous rocks associated with skarn deposits – chemical evidence for a genetic connection between petrogenesis and mineralization. In J.F.H. Thompson (ed.), *Magma, Fluids, and ore deposits* (vol. Short Course Volume 23, chap. 18, p. 401-418). Victoria, British Columbia: Mineralogical Association of Canada.

Meinert, L.D., Dipple, G.M., Nicolescu, S. (2005). World skarn deposits. *Economic Geology*, 299-336.

Moritz, R. (1993). Skarn mineralization associated with the Grand Pabos – Restigouche Fault, Southern Gaspé Peninsula, Quebec, Canada. In: Maurice, Y. *Proceedings of the 8th quadriennial IAGOD Symposium*, Stuttgart, 271-284.

Mrozek, S.A (2018). The giant Antamina deposit, Peru: intrusive sequence, skarn formation, and mineralisation. Thèse de doctorat, Université James Cook, p193.

Mueller, A.G., Nemchin, A.A., Frei, R. (2004). The Nevea gold skarn deposit, Southern Cross Greenstone Belt, Western Australia: II. Pressure-Temperature-Time path and relationship to postorogenic granites. *Economic Geology*, 99, 453-478.

Mueller, A.G. (2007). Copper-gold endoskarns and high-Mg monzodiorite-tonalite intrusions at Mt. Shea, Kargoolie, Australia: implications for the origin of gold-pyrite-tennantite mineralization in the Golden Mile. *Mineralium Deposita*, 42, 737-769.

Mueller, A.G., Hall, G.C., Nemchin, A.A., Stein, H.J., Creaser, R.A., Mason, D.R. (2008). Archean high-Mg monzodiorite-syenite, epidote skarn, and biotite-sericite gold lodes in the Granny Smith-Wallaby district, Australia: U-Pb and Re-Os chronometry of two intrusion-related hydrothermal systems. *Mineralium Deposita*, 43, 337-362.

Mueller, A.G., Lawrance, L.M., Muhling, J., Pooley, G.D. (2012). Mineralogy and PTX relationships of the Archean Hannan South Au-Cu (Co-Bi) deposit, Kargoolie, Western Australia : thermodynamic constraints on the formation of a zoned intrusion-related skarn. *Economic Geology*, 107, 1-24.

Pilote, P., Mueller, W.U., Scott, C.R., Lavoie, S. (1999). Géologie des formations Val-d'Or, Héva et Jacola – nouvelle interprétation du bloc de Malartic. Séminaire d'Information sur la Recherche Géologique, programme et résumés 1999, DV 99-03; p19.

Rafini, S. (2014). Typologie des minéralisations aurifères associées à la faille de Cadillac. Rapport Consorem projets 2011-01 et 2012-01, p52.



Ray, G.E. (2013). A review of skarns in the Canadian Cordillera. British Columbia Geological Survey Open File 2013-08, p52.

Sauvé, P. (1985). Géologie de la mine d'or Akasaba, région de Val d'Or. Rapport MB 85-40, p. 53.

Singer, D.A. (2017). Future copper resources. Ore Geology Reviews, 86, 271-279.

Sillitoe, R.H. (2010). Porphyry copper systems. Economic Geology, 105, 3-41.

Taner, M.F. (1996). The East-Sullivan and its Gold-Copper potential, Val d'Or, Québec, Canada. Exploration Mining Geology, 5,1.

Théodore, T.G., Orris, G.J., Hammarstrom, J.M, Bliss, J.D. (1991). Gold-bearing skarns. U.S. Geological Survey, bulletin 1930, p61.

Vorobiev, L. (1998). Réévaluation de la nature et de l'origine de la minéralisation Au-Ag-Cu d'Akasaba district de Val-d'Or, Québec. Mémoire de maîtrise, École polytechnique de Montréal, Québec, p 229.

