
MOBILITE DE L'OR EN TERRAIN DE HAUT GRADE METAMORPHIQUE

Projet 2015-06

Par : Lucie Mathieu Ph.D.
2016



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. Le CONSOREM ne peut être tenu responsable pour des décisions prises sur la base de ces résultats.

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 :

Mathieu, L., 2016. Mobilité de l'or en terrain de haut grade métamorphique. Rapport, Projet CONSOREM 2015-06, 51 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
Site Web : www.consorem.ca

1 RÉSUMÉ

Explorer pour l'or dans les contextes de haut grade métamorphique (c.-à-d. ≥ 600 °C ; faciès supérieur des amphibolites à granulites) s'accompagne de nombreuses difficultés, non des moindres étant la reconnaissance des processus métamorphiques qui ont pu modifier la distribution de l'or. Dans ce rapport, plusieurs SMV aurifères et dépôts d'or orogéniques s'étant formés avant le pic du métamorphisme (dépôts pré-pic), ainsi que des minéralisations identifiées comme post- ou syn-pic mais ayant le potentiel d'être en fait des dépôts pré-pic, ont été compilés et leurs caractéristiques principales ont été listées. À l'aide de ces exemples, les principaux processus métamorphiques ayant pu modifier les teneurs et tonnages en or de ces dépôts, ainsi que leurs principales caractéristiques (halo d'altération, structure, etc.) ont été identifiés. Les principaux processus métamorphiques sont : 1) mobilisation mécanique (déplacement à l'état solide) ; 2) circulation des fluides (fluides à H-S capables de dissoudre et transporter l'or) ; 3) circulation de fondus à Si et/ou S (les liquides sulfurés incorporent l'or alors que les magmas silicatés felsiques ne l'incorporent pas) ; et 4) rétrogression (fluides à H qui ne transportent pas l'or mais qui peuvent modifier les assemblages de haut grade). Il a été tenté de qualifier l'effet positif, négatif ou neutre que le métamorphisme a pu avoir sur les teneurs en or, et beaucoup de travail reste à faire pour quantifier ces effets. Pour l'exploration, il est important de connaître les processus métamorphiques capables de modifier les gisements d'or. Il est aussi important d'utiliser le bon modèle génétique pour interpréter les gisements d'or orogénique, comme il est discuté dans la dernière partie de ce rapport. En effet, lorsque le modèle de dévolatilisation métamorphique est utilisé, qui n'autorise pas la formation syn-pic de dépôts dans les conditions de haut grade, les dépôts étudiés sont reconnus comme post-pic (rares) ou pré-pic, auquel cas le métamorphisme doit être pris en considération. Cependant, lorsque l'on travaille avec le cadre du modèle du « Continuum », un dépôt pré-pic situé dans un terrain du faciès des granulites pourra être interprété comme étant syn-pic, auquel cas les processus métamorphiques énumérés ici ne seront pas ou peu considérés; ou comme étant post-pic, auquel cas les minéraux hydratés liés à la rétrogression pourraient être faussement interprétés comme un halo d'altération, etc. De telles erreurs d'interprétations peuvent conduire à l'utilisation du mauvais modèle d'exploration.

TABLE DES MATIERES

Avertissement.....	ii
1 Résumé.....	iii
Table des matières.....	4
Liste des figures.....	5
Liste des tableaux.....	5
2 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS.....	6
3 INTRODUCTION.....	6
4 MODÈLES GÉNÉTIQUES.....	8
4.1 Identifier les dépôts pré-pic.....	8
4.2 Modèles du Continuum et de la devolatilisation métamorphique.....	9
4.3 Classification pour les dépôts d'or orogénique.....	11
5 EMPHASE DE L'ÉTUDE.....	12
5.1 Pic métamorphique >600 °C.....	12
5.2 Dépôts étudiés.....	13
6 DÉPÔTS « GOLD-PLUS » : L'EXEMPLE DES SMV.....	15
6.1 Les SMV Great Victoria et Hongtoushan.....	15
6.2 Les SMV Montauban et Calumet.....	16
6.3 Les SMV Mt-Gibson et Aquilon.....	17
6.4 Systèmes SMV - synthèse.....	18
7 OR OROGÉNIQUE ET FACIÈS DES GRANULITES.....	21
7.1 Challenger et Griffin's Find.....	21
7.2 Doornhoek et Renco.....	22
7.3 Tropicana and Corvet Est.....	23
7.4 Dépôts « gold-only » et faciès des granulites : résumé.....	23
8 DÉPÔTS D'OR OROGÉNIQUES SITUÉS DANS DES ROCHES MAFIQUES.....	27
8.1 Hemlo, Big Bell, Eastmain, Marvel Loch, Plutonic Gold et New Consort.....	27
8.2 Dépôts d'or situés dans les roches mafiques du faciès supérieur des amphibolites : résumé... ..	28
9 Nom.....	30
10 OR OROGÉNIQUE DANS LES FORMATIONS DE FER.....	31
10.1 Marymia, Nevoria, Granite Goldfield, Musselwhite et Mt York.....	31
10.2 Or situé dans les formations de fer : résumé.....	32
11 Scrimgeour et Sandiford (1993), Valenta et Wall (1996), Adams et al. (2007).....	34
12 OR OROGÉNIQUE DANS DES ROCHES SÉDIMENTAIRES.....	36
12.1 Roberto (propriété Éléonore) et Navachab.....	36
12.2 Dépôts d'or situé dans des unités sédimentaires (autres que formations de fer) : résumé.....	37
13 HAUT GRADE ET OR AU QUÉBEC.....	38
14 DISCUSSION.....	42

14.1	Processus métamorphiques	42
14.2	Explorer dans les terrains de haut grade	45
15	CONCLUSIONS	46
16	REFERENCES.....	47

LISTE DES FIGURES

Figure 1	: Croquis résumant les diverses textures et morphologies qui peuvent être observées dans un système SMV métamorphisé.	19
Figure 2	: Croquis résumant les diverses textures et morphologies qui peuvent être observées dans un dépôt d'or orogénique métamorphisé au faciès des granulites. Pour des dépôts métamorphisés à plus bas grade, certaines caractéristiques dessinées ici peuvent être observées, et seront moins prononcées qu'à très haut grade. Les morphologies particulières, comme celles observées à Challenger et Renco, ne sont pas représentées (pour des dessins de ces dépôts (Tomkins et Mavrogenes 2002, et Kisters et al. 1998).	26
Figure 3	: Croquis résumant les diverses textures et morphologies qui peuvent être observées dans un dépôt d'or orogénique situé dans une formation de fer et métamorphisé dans les conditions du faciès des amphibolites.	35
Figure 4	: Carte de la partie nord du Québec, d'après les données du SIGEOM 2015, montrant : a) migmatites et autres (polygones de la carte pour lesquelles les codes M22, M20, M21 ou M21A sont mentionnés) ; b) indices Au (extraits de « corps minéralisés.shp » et « gisements métalliques.shp ») ; c) Apy, Lo, Au (extraits de « affleurements de compilation et de géofiches », pour lesquels les codes LG, AS et/ou AU sont mentionnés).	39
Figure 5	: Carte de la partie nord du Québec, d'après les données du SIGEOM 2015, montrant : a) migmatites et autres (extraits de « affleurements de compilation et de géofiches » pour lesquelles les codes M22, M20, M21 ou M21A sont mentionnés) ; b) indices Au (extraits de « corps minéralisés.shp » et « gisements métalliques.shp ») ; c) Apy, Lo, Au (extraits de « affleurements de compilation et de géofiches » pour lesquels les codes LG, AS et/ou AU sont mentionnés).	40
Figure 6	: Carte de la partie nord du Québec, d'après les données du SIGEOM 2015, montrant : a) diopside et autres (extraits de « affleurements de compilation et de géofiches » pour lesquelles les codes DP, WL, GG, CB, et/ou CC sont mentionnés) ; b) indices Au (extraits de « corps minéralisés.shp » et « gisements métalliques.shp ») ; c) Apy, Lo, Au (extraits de « affleurements de compilation et de géofiches » pour lesquels les codes LG, AS et/ou AU sont mentionnés).	41
Figure 7	: Carte de la Baie James, d'après les données du SIGEOM 2015. La légende et la source des données sont identiques à celles des Figures 4, 5, et 6.	42

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	: Diverses interprétations de synchronisme entre le métamorphisme et l'événement minéralisateur.	10
Tableau 2	: Événements susceptibles d'être à l'origine du pic du métamorphisme dans les dépôts étudiés.	14
Tableau 3	: Résumé des caractéristiques principales des systèmes SMV compilés.	20
Tableau 4	: Résumé des caractéristiques principales des dépôts « gold-only » métamorphisés au faciès des granulites.	25
Tableau 5	: Résumé des caractéristiques principales des dépôts d'or orogéniques situés dans des roches mafiques.	30
Tableau 6	: Résumé des caractéristiques principales des dépôts d'or orogéniques situés dans des formations de fer.....	34
Tableau 7	: Résumé des caractéristiques principales des dépôts d'or situés dans des roches sédimentaires (autres que formations de fer).....	37

2 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

Les terrains de métamorphisme élevé contiennent peu de gisements comparativement aux terrains de métamorphisme faible. Par contre quelques gisements importants sont reconnus: Hemlo, Tropicana, Roberto, et Big Bell, par exemple. Avec l'intérêt grandissant de l'exploration pour les terrains de métamorphisme élevé, il devient important de documenter les particularités des gisements situés dans de tels contextes afin de mettre en œuvre des stratégies d'exploration adaptées. Ce projet se propose donc de documenter divers gisements d'or qui se retrouve dans des contextes de métamorphisme élevé, d'identifier les processus métamorphiques qui doivent être pris en considération dans de tels contextes et de tenter d'estimer l'influence que ces processus peuvent avoir sur les teneurs en or.

3 INTRODUCTION

Les dépôts d'or situés dans des roches qui ont été métamorphisées dans des conditions de haut grade sont peu nombreux par rapport aux dépôts de faible grade, mais ils peuvent avoir des valeurs économiques importantes. Parmi les plus significatifs de ces dépôts, nous pouvons citer Hemlo (95 Mt @ 8 g/t Au ; Schnieder et al. 2000) et d'autres exemples de plus petite taille, comme Tropicana, Roberto, et Big Bell.

Historiquement, les terrains de métamorphisme élevé ont pu être peu explorés, car considérés stériles, mais une telle vision est en train de changer. Explorer dans de tels contextes, par contre, est difficile, puisque la morphologie des dépôts d'or métamorphisés à haut grade peut sembler atypique à des géologues habitués à explorer dans des roches du faciès des schistes verts. Dans les terrains de haut grade, la non-reconnaissance des processus métamorphiques et la mauvaise interprétation du contexte de minéralisation, de la géométrie du halo d'altération et du synchronisme entre les processus métamorphiques et hydrothermaux, peut conduire à de mauvaises décisions.

L'exploration utilise des modèles géologiques pour cibler les zones favorables. Cependant, il est difficile de sélectionner le modèle génétique le plus pertinent lorsque l'on explore pour les dépôts de type « or orogénique », puisque deux modèles de formation pour ce type de dépôts, qui sont des théories dominantes et incompatibles, sont aujourd'hui débattus (p.ex. Groves et al. 1992, Phillips et Powell, 2010). La principale différence entre ces modèles concerne la source des fluides hydrothermaux et le synchronisme entre l'événement minéralisateur et le pic du métamorphisme. Le premier point est un intéressant débat académique, le second à un impact important sur l'exploration.

En effet, un dépôt d'or peut se former avant (pré-pic), pendant (syn-pic) ou après (post-pic) l'apogée du métamorphisme. Pour le moment, les dépôts situés dans des terrains de haut grade sont communément interprétés comme des dépôts syn-pic ou post-pic, bien que quelques réinterprétations récentes montrent que certains de ces dépôts sont en fait pré-pic (p.ex. Griffin's Find, voir ci-dessous), alors que d'autres sont clairement post-pic (p.ex. Jiaodong) (Phillips and Powell 2009, Goldfarb et Groves, 2015). Comme cela sera discuté dans ce rapport, l'exploration sera faite de façon différente selon que le dépôt en question est pré-pic ou post-pic, d'où l'importance de résoudre les problèmes de synchronisme le plus tôt possible.

Le but de cette étude est de documenter les principales caractéristiques de dépôts d'or métamorphisés, afin d'identifier les principaux processus métamorphiques capables de modifier

la distribution de l'or et de modifier teneurs et tonnages. Également, l'étude vise à déterminer comment les stratégies d'exploration peuvent être adaptées à ces contextes particuliers.

Après avoir présenté les principaux modèles génétiques disponibles pour les minéralisations aurifères, les dépôts les mieux documentés seront compilés et, pour chacun d'entre eux, on tentera d'identifier les principaux processus métamorphiques qui ont pu avoir des effets positifs ou négatifs sur la distribution de l'or. Ensuite les processus métamorphiques qui devraient être pris en ligne de compte, lors de l'exploration dans les terrains de haut grade métamorphique, seront discutés. Aussi, il sera montré que l'utilisation d'un modèle génétique erroné a un impact sur la stratégie d'exploration.

Notez que, dans ce rapport, les minéraux sont désignés selon les abréviations recommandées par Whitney et Evans, (2010).

Abréviations utilisées selon Whitney et Evans, (2010).

Als	aluminosilicate
Afs	feldspath alcalin
Apy	arsénopyrite
Amp	amphibole
Bt	biotite
Cb	carbonate
Cct	chalcocite
Ccp	chalcopyrite
Cpx	clinopyroxene
Di	diopside
Ghn	gahnite
Gn	galena
Grt	grenat
Gr	graphite
Gru	grunérite
Grs	grossulaire
Mag	magnétite
Mus	Muscovite
Lo	löllingite (loellingite)
Py	pyrite
Po	pyrrhotite
Ser	séricite
Sp	sphalérite
Wo	wollastonite

4 MODÈLES GÉNÉTIQUES

4.1 Identifier les dépôts pré-pic

Afin de comprendre comment un événement métamorphique de haut grade peut modifier les minéralisations aurifères, plusieurs dépôts seront documentés. Une partie de ces dépôts sont des gisements de type « *gold-plus* », c.-à-d. que l'or y est une substance secondaire qui ne serait pas économique en elle-même, et d'autres sont de type « *gold-only* » (Phillips and Powell 2015).

Dans le cadre de ce projet, les dépôts de type « *gold-plus* » seront principalement représentés par les systèmes SMV (Volcanogenic Massive Sulphides). Les SMV sont des sulfures massifs accumulés par la circulation de fluides hydrothermaux enrichis en chlore, qui se forment sur ou immédiatement en dessous du niveau de la mer dans des roches volcaniques et/ou sédimentaires (Galley et al., 2007). Leur formation est liée à l'activité magmatique. Où ils sont observés en terrains métamorphisés, les SMV sont toujours et sans ambiguïtés des dépôts pré-pic.

Les autres dépôts qui seront étudiés ici sont de type « *gold-only* », or filonien, mésothermal ou hypozonal (Kolb et al., 2015), mais sont plus souvent appelés dépôts de type or orogénique (Groves et al., 1992). Ces accumulations d'or sont des dépôts hydrothermaux communément structuralement contrôlés. La morphologie la plus commune est celle de minéralisations situées dans des veines de quartz observées dans des zones de faille. Ces dépôts présentent des altérations potassiques, de la sulfuration et de la carbonatation, et leur formation est liée à des processus orogéniques (p.ex. Groves et al., 1992).

Les modèles génétiques qui ont été proposés pour expliquer la formation de tels dépôts sont considérablement débattus. La dispute s'est principalement cristallisée autour de deux théories, qui sont les suivantes : 1) le modèle du Continuum (Groves et al., 1992); et 2) le modèle de la dévolatilisation métamorphique (Phillips et Powell, 2010). Selon le modèle qui est utilisé, un même dépôt pourra être qualifié de pré-pic, syn-pic ou post-pic (**Tableau 1**). Pour cette étude, seuls les dépôts pré-pic ont un intérêt.

4.2 Modèles du Continuum et de la devolatilisation métamorphique

La plupart des dépôts d'or orogénique qui sont documentés sont situés dans des roches métamorphisées à environ 2 kbar et < 300-350 °C (Ho et al. 1985, Ridley et Diamond, 2000), ce qui correspond à peu de choses près aux conditions de P-T de l'événement minéralisateur (dépôts syn-pic ; Groves et al., 1992, Phillips et Powell, 2010). Les principaux modèles génétiques prennent en considération que les dépôts d'or orogénique sont épigénétiques, structuralement contrôlés et ont été formés par des fluides ayant des compositions relativement monotones (c.-à-d. des fluides de faible salinité et contenant H₂O-CO₂-CH₄ en proportions variables).

Les principales différences entre les modèles dominants concernent la source des fluides et les conditions de P-T auxquels se forment les dépôts d'or orogénique. Pour le modèle du *Continuum*, la source des fluides est profonde, crustale ou possiblement sub-crustale (Goldfarb et Groves, 2015), et ces fluides sont capables de remonter à travers toute l'épaisseur de la croûte terrestre pour former des dépôts d'or dans des conditions allant de 5 kbar et 500 °C à < 1 kbar et 180 °C (Groves et al., 1992). Pour le modèle de dévolatilisation métamorphique, les fluides, l'or, le soufre et les autres éléments proviennent de la dévolatilisation de la croûte. Puisque la plus grande quantité de fluides est libérée à la transition entre les faciès schistes verts et amphibolites, les dépôts sont interprétés comme s'étant formés principalement, et peut-être exclusivement, dans de telles conditions, c.-à-d. à environ 2 kbar et 300-350 °C (Phillips et Powell, 2010).

Dans les terrains métamorphiques de haut grade, le modèle du *Continuum* considère que les dépôts pré-pic ayant été métamorphisés sont possibles, mais que la plupart des gisements observés à haut grade sont des dépôts syn-pic (Groves et al. 1992, Kolb et al., 2015). Le *Continuum* indique aussi que les fluides sont capables de circuler librement dans les conditions du faciès des granulites sans initier une fusion partielle importante de la croûte (anatexie), et que ces fluides sont capables de déposer l'or à des températures auxquelles la solubilité de l'or est extrême. Ces difficultés, et d'autres observations faites sur les dépôts métamorphisés, ont conduit à la remise en question du *Continuum* (Phillips et Powell, 2009).

Le modèle de dévolatilisation métamorphique, d'un autre côté, implique que les dépôts observés dans des terrains de haut grade ont été métamorphisés après leurs formations (dépôts pré-pic ; Phillips et Powell, 2010). Ce modèle implique que l'événement métamorphique s'est surimposé à l'événement minéralisateur, et ouvre la possibilité que la distribution finale de l'or soit liée à des processus hydrothermaux et métamorphiques. Dans ce rapport, il est choisi de ne prendre en considération que le modèle de dévolatilisation métamorphique. Ceci signifie que les dépôts observés dans des terrains de haut grade métamorphiques ne seront pas regardés comme étant des dépôts syn-pics, mais pourront avoir une origine soit pré-pic, soit post-pic.

Aussi, les modèles génétiques discutés ci-dessus considèrent que les dépôts peuvent postdater le pic du métamorphisme. Des exemples clairs de minéralisations post-pics sont représentés par les gisements de la province aurifère de Jiaodong (Chine de l'est) (voir volume spécial de *Ore Geology Reviews* ; Santosh and Pirajino, 2015). Cependant, pour les nombreux dépôts souvent classés comme syn-pic ou post-pic, la possibilité qu'ils correspondent à des dépôts pré-pic ayant été métamorphisés reste présente et sera considérée ici. Ces problèmes de synchronisme ne seront cependant pas résolus pour la plupart des dépôts, puisque ceci demanderait des études qui ne sont pas réalisables dans le cadre de ce projet.

Tableau 1 : Diverses interprétations de synchronisme entre le métamorphisme et l'événement minéralisateur.

Nom	Pré-pic	Syn-pic	Post-pic
Aquilon	Lapointe (2006) ⁽¹⁾		
Calumet	Williams (1990), Jourdain (1993)		
Hongtoushan	Gu et al. (2007)		
Montauban	Sangster (1967), Prabhu (1981)		
Great Victoria	McQueen (1992)		
Mt Gibson		Yeats and Groves (1998) ⁽²⁾	
Marymia		Vielreicher et al. (2002)	
Mt York		Neumayr et al. (1993)	
Nevoria			Mueller (1997), Fan et al. (2000)
Granite		Adams et al. (2007)	Vandenberg et al. (2001)
Musselwhite		Otto (2002), Oswald et al. (2015)	
Navachab		Dziggel et al. (2000)	Nörtemann et al. (2000)
Roberto	Ravenelle (2013) ⁽³⁾	Ravenelle (2013)	
Challenger	Tomkins and Mavrogenes (2001)	Groves (1993), Goldfarb et al. (2005)	
Doornhoek			Stefan (1997)
Griffin's Find	Tomkins and Grundy (2009)	Groves (1993), Goldfarb et al. (2005)	
Hemlo	Cameron and Hattori (1985), Muir (2002), Tomkins et al. (2004)	Burk et al. (1986)	Pan and Fleet (1992)
Marvel Loch		Mueller (1991)	
Big Bell	Phillips and De Nooy (1988)		Wilkins (1993)
New Consort		Otto et al. (2007)	Otto et al. (2007)
Plutonic Gold		Gazley (2011)	Gazley (2011)
Corvet Est	Aucoin et al. (2012)		
Eastmain		Couture and Guha (1990)	
Tropicana	Crawford and Doyle (2016)		Blenkinsop and Doyle (2014)
Renco	Phillips et Powell (2009)		Kisters et al. (1998), Kolb et al. (2000), Blenkinsop et al. (2004)

(1) Pour chaque dépôt, seule une quantité limitée de références a été reportée pour des raisons de clarté.

(2) À Mont-Gibson, le dépôt d'or est interprété être syn-pic, mais le SMV est interprété pré-pic.

(3) Une référence reportée dans deux colonnes indique soit que l'or est interprété avoir été introduit en deux temps, soit que des doutes persistent sur le synchronisme.

4.3 Classification pour les dépôts d'or orogénique

Les dépôts d'or orogénique sont généralement classés selon la nature de leurs roches hôtes (roches magmatiques mafiques, formations de fer ou autre type de roches sédimentaires), parce que la morphologie de ces dépôts varie d'un contexte à l'autre. Puisque l'on travaille ici dans le cadre du modèle de dévolatilisation métamorphique, on considérera que ces sous-types se forment de façons relativement similaires.

Les dépôts d'or orogénique « typiques » sont des minéralisations situées dans des zones de déformation observées dans des roches méta-volcaniques mafiques faisant partie de ceintures de roches vertes. D'autres dépôts sont observés dans des contextes similaires, mais sont plutôt situés dans des formations de fer qui ont agi comme des pièges chimiques; c.-à-d. que les mécanismes de précipitation de l'or et des sulfures sont particuliers. Les dépôts situés dans des formations de fer sont morphologiquement distincts de ceux situés dans des roches volcaniques mafiques, puisqu'ils peuvent être stratigraphiquement contrôlés et présenter une structuration dominée par des plis plutôt que par des zones de failles. Aussi, les formations de fer peuvent contenir des sulfures d'origine sédimentaire (p.ex. Ford et Duke, 1993) qui peuvent influencer davantage la morphologie finale des dépôts. Les dépôts d'or orogénique, qu'ils soient situés dans des roches magmatiques ou sédimentaires, pourraient s'être formés de façon similaire, c.-à-d. à partir de fluides à Au-S dérivés de sources externes à la zone minéralisée (Phillips et al., 1984).

Un type différent de dépôt d'or correspond à ceux situés dans des roches sédimentaires riches en carbone, qui sont des dépôts de type Carlin et qui sont bien décrits par Large et al., 2001. Pour ces dépôts, la séquence sédimentaire hôte de l'or est aussi la source de l'or, des fluides et d'autres éléments, et la position des dépôts est contrôlée par les sites en dilatation (charnière de plis, etc.), ce qui donne aux dépôts une morphologie finale différente de celle de ceux observés dans des roches mafiques.

5 EMPHASE DE L'ÉTUDE

5.1 Pic métamorphique >600 °C

Pour les besoins de cette étude, un total de 25 dépôts a été documenté. Ces dépôts sont tous situés dans des zones où des températures du pic du métamorphisme ≥ 600 °C ont été reportées (conditions des faciès supérieurs des amphibolites à granulites). La limite à 600 °C est élevée, mais a été choisie, car elle est deux fois supérieure au maximum de la température à laquelle la plupart des dépôts d'or orogénique se forment (voir Phillips et Powell, 2010). Notez que les mécanismes décrits ci-après pourraient aussi être présents dans des dépôts métamorphisés à plus faible grade après leurs formations.

Puisque les modèles pour la formation des dépôts d'or orogénique sont intensément débattus, distinguer les dépôts pré-pic métamorphisés à haut grade des dépôts post-pic peut-être difficile, alors que les formations syn-pic ne seront pas considérées pour des conditions de température ≥ 600 °C (voir section précédente). Pour la plupart des dépôts étudiés ici, à l'exception des SMV, le synchronisme entre les événements minéralisateur et métamorphique est débattu (**Tableau 1**).

Les indications qu'un gisement est de type « pré-pic métamorphique » sont les suivantes :

- 1) les sulfures et l'or ont recristallisés dans les conditions du pic du métamorphisme ;
- 2) présence de « pegmatites » (ce mot est possiblement mal utilisé dans la littérature pour référer à des leucosomes) qui recoupent la minéralisation ;
- 3) assemblages complexes de sulfures enrichis en métaux précieux et observés en inclusions dans divers minéraux (indication possible de la fusion partielle de sulfures) ; etc. (p. ex. Tomkins et Mavrogenes, 2001, Tomkins et Grundy, 2009).

Dans ce rapport, le mot « pegmatite » désignera des dykes au grain grossier produit par les derniers jus de la cristallisation de magmas felsiques (qui peuvent provenir de la fusion de la croûte ou du manteau), et le mot « leucosome » désignera les roches felsiques provenant de la cristallisation de magmas produits par anatexie.

Les indications d'une formation post-pic peuvent inclure :

- 1) veines minéralisées recoupant les plans de foliation et les assemblages du pic ;
- 2) abondance de minéraux d'altération hydratés ; etc.

Notez cependant que, dans certains cas, les veines recoupant la foliation peuvent provenir de la remobilisation syn-métamorphique du gisement et que les minéraux hydratés peuvent aussi refléter un épisode de rétrogression (réhydratation). Ainsi, là où de telles indications sont observées, les dépôts ne sont pas forcément post-pic (p.ex. Phillips et Powell, 2009). Renco et Big Bell sont des exemples intéressants de la façon dont les mêmes observations peuvent être interprétées de façons radicalement différentes par divers auteurs (voir Tableau 1 pour les références).

5.2 Dépôts étudiés

Afin de documenter l'effet que le métamorphisme peut avoir sur les minéralisations aurifères, il est nécessaire de compiler la morphologie des dépôts connus. Les dépôts « *gold-plus* » qui ont été compilés sont des SMV, dont l'origine pré-pic n'est pas débattue (**Tableau 1**). Pour les dépôts d'or orogénique, ceux identifiés comme des dépôts pré-pic par divers auteurs ont été compilés, et ces dépôts sont *Roberto*, *Challenger*, *Griffin's Find*, *Hemlo*, *Big Bell*, *Corvest Est*, et *Renco* (**Tableau 1**).

Les autres dépôts compilés ont souvent été décrits comme syn-pic (**Tableau 1**), mais la formation de dépôts syn-pics à > 600 °C n'est pas considérée être une hypothèse viable. De plus, il est attendu que la plupart des dépôts pré-pic ne sont pas reconnus comme tel, car, comme cela a été mieux expliqué par d'autres : « *La compréhension de la surimposition d'un métamorphisme élevé est à ses débuts et est communément négligé* » (citation traduite de Phillips et Powell, 2015, p. 569).

Il y a donc une possibilité que les dépôts « syn-pic » soient en fait pré-pic, surtout ceux pour lesquels les caractéristiques suivantes sont observées :

- 1) anatexie post-minéralisation ;
- 2) fusion partielle des sulfures (p.ex. assemblages complexes de minéraux à Au-Ag-Bi-Cu-Pb-etc.) ;
- 3) rééquilibrage des sulfures (p.ex. assemblage Lo-Po) ; et/ou
- 4) dévolatilisation (présence de calcosilicates, de silicates avec des ratios Mg/Fe élevés, etc.).

Avant de détailler la morphologie de ces dépôts, il est intéressant de documenter la cause du pic du métamorphisme qui s'est éventuellement surimposé aux dépôts étudiés (**Tableau 2**). Le principal intérêt de cette compilation est de définir le contexte dans lequel les dépôts d'or sont susceptibles d'être métamorphisés, et où il est nécessaire de tenter de reconnaître les effets de ce métamorphisme.

Il semble y avoir deux causes principales pour un métamorphisme post-minéralisation, qui sont :

- 1) événements tectoniques conduisant à la cratonisation (collisions entre terranes et cratons, pour les dépôts Archéens) ; et
- 2) orogénies qui retravaillent les marges des cratons ou de terrains post-Archéens (**Tableau 2**).

Ainsi, les dépôts compilés ici sont soit situés dans des ceintures mobiles, en bordure des cratons dans la plupart des cas, ou à l'intérieur des cratons, près de frontières entre terranes. Lorsque l'exploration se déroule dans ce type de contextes, il est recommandé de garder un œil sur les indications d'événements métamorphiques de haut grade qui auraient pu se surimposer à la minéralisation.

Tableau 2 : Événements susceptibles d'être à l'origine du pic du métamorphisme dans les dépôts étudiés.

Nom	Cause possible du pic du métamorphisme	Référence (synthèses régionales)
Aquilon	Cratonisation (Orogénie kénoréenne)	Thurston (1991), Hocq (1994)
Calumet	Orogénie grenvillienne	Rivers et al. (1989)
Hongtoushan	Modification de la marge du craton par l'orogénie « <i>Central Asia Orogenic Belt</i> »	Sengör et al. (1993)
Montauban	Orogénie grenvillienne	Rivers et al. (1989)
Great Victoria	Intrusion d'un batholite	Ahmat (1986)
Mt Gibson	Cratonisation	Wang et al. (1993), Myers (1995)
Marymia	Cratonisation (incorporation d'une terrane)	Vielreicher et al. (2002)
Mt York	Compression régionale et événements intrusifs	Hickman (1990), Huston et al. (2002)
Nevoria	Intrusion d'un batholite	Dalstra et al. (1998)
Granite	Orogénie barramundienne (Barramundi Orogen)	Scrimgeour and Sandiford (1993)
Musselwhite	Collision de terranes ? Intrusions ?	Biczok et al. (2012)
Navachab	Ceinture mobile Damara	Jung and Mezger (2003)
Roberto	Cratonisation (collision de terranes ?)	Gauthier et al. (1997)
Challenger	Orogénie sleafordienne (sleafordian)	Teasdale (1997)
Doornhoek	Modification de la marge du craton par la ceinture mobile Limpopo	Ridley (1992)
Griffin's Find	Modification de la marge du craton	Myers (1995)
Hemlo	Régime tectonique qui a fortement déformé la ceinture de roches vertes qui contient le dépôt	Corfu and Muir (1989)
Marvel Loch	Intrusion d'un batholite	Dalstra et al. (1998)
Big Bell	Cratonisation	Wang et al. (1993), Myers (1995)
New Consort	Régime tectonique en lien avec le début de la cratonisation	de Ronde and de Witt (1994)
Plutonic Gold	Cratonisation (incorporation d'une terrane)	Vielreicher et al. (2002)
Corvet Est	Cratonisation (collision de terranes ?)	Gauthier et al. (1997)
Eastmain	Cratonisation (Orogénie kénoréenne)	Thurston (1991), Hocq (1994)
Tropicana	Modification de la marge du craton par l'orogénie Albany-Fraser	Blenkinsop et Doyle (2014)
Renco	Modification de la marge du craton par la ceinture mobile Limpopo	Ridley (1992)

6 DÉPÔTS « GOLD-PLUS » : L'EXEMPLE DES SMV

Dans cette section, les sulfures massifs contenant de l'or et ayant été métamorphisés dans les conditions du faciès supérieur des amphibolites sont compilés. Ces dépôts permettent d'appréhender la façon dont le métamorphisme peut modifier les accumulations de sulfures massifs. Les principales caractéristiques de ces dépôts, ainsi que les principales références consultées pour les besoins de cette compilation, sont présentées dans le **Tableau 3**.

6.1 Les SMV Great Victoria et Hongtoushan

Great Victoria est un SMV pauvre en métaux de base situé dans le sud de la ceinture de roches vertes de Southern Cross, dans le bloc de Yilgarn (Australie). La déformation a donné leurs morphologies aux sulfures massifs en forme de « cheminée », qui sont situées à la charnière d'un pli anticlinal. Dans les corps de sulfures massifs, l'or prend la forme de grains ou de globules irréguliers observés dans la pyrrhotite, dans les fractures de la pyrite et dans des veines à quartz-carbonate. La variation spatiale des teneurs en Au, Ag et \pm Cu est importante, même à petite échelle.

Hongtoushan est un SMV situé dans une ceinture de roches vertes, dans le terrain archéen de Hunbei (Chine). Le dépôt a été déformé. Il est situé dans l'axe d'un pli et a une forme en « Y ». La déformation a peut-être aussi mobilisé la chalcocite et la sphalérite, et électrum plus efficacement que la pyrite pour former les vecteurs enrichis en Cu-Zn-Ag-Au et qui sont situés dans une zone en dilatation, au centre du « Y » (Yang and Yu 1984, Zhang et al. 2013). La déformation a donné une texture particulière aux sulfures, qui a été décrite en détail (voir texture gneissique et durchbewegung, déformation fragile de la pyrite et ductile des autres sulfures, et indications de recristallisation ; Zhang et al. 2013).

Dans ce dépôt, l'électrum est observé en inclusions dans la chalcocite, Py, Po et les silicates de la gangue. Aussi, les assemblages à Py-Po-Mag pourraient résulter de processus de désulfuration. La circulation syn-métamorphisme de fluides à H-S a probablement formé les veinules à Qz-sulfures qui recoupent les sulfures. De plus, des mylonites enrichies en Cu, Ag et Au (Py, Cct, Apy, et électrum) forment des vecteurs minéralisés (*ore shoots*) (<10 % de la réserve totale) observés dans et en périphérie de la lentille de sulfures massifs, dans lesquels des textures de remobilisation et des silicates hydratés sont observés (Gu et al. 2007).

Effet de métamorphisme – La déformation a grandement modifié la morphologie des corps de sulfures massifs de Great Victoria et Hongtoushan, ayant épaissi les parties des lentilles situées dans les charnières des plis et étiré les autres parties.

Aussi, à Great Victoria, il a été proposé que les fluides à H-S provenant de la désulfuration et de la déshydratation du dépôt auraient favorisé la remobilisation, à l'intérieur du sulfure massif, de Au et Ag surtout (McQueen 1992). Ce processus ne semble pas avoir grandement amélioré les locales teneurs en or.

Les mylonites enrichies en Cu-Ag-Au de Hongtoushan sont interprétées comme étant des zones de déformation dans lesquels un fluide dérivé de l'extérieur aurait déposé Cu, Ag et Au pendant le métamorphisme (Gu et al. 2007). Ces zones pourraient aussi avoir été formées par un fluide à H-S dérivé localement (c.-à-d. par un fluide provenant de la dévolatilisation du SMV), qui aurait

collecté les métaux du SMV, comme cela a été proposé pour Great Victoria. Ce processus n'a amélioré les teneurs en or que localement.

6.2 Les SMV Montauban et Calumet

Montauban est un SMV situé dans les roches supra-crustales déformées de l'orogénie du Grenville (Québec). À Montauban, l'électrum est observé en inclusions dans les phases chalcocite, galène, arsénopyrite, cubanite, grenat et ghanite, et dans des fractures qui recourent les fabriques formées par les silicates. La lentille de sulfures massifs est plissée et épaissie dans l'axe d'un pli. Cette déformation est mieux enregistrée par l'assemblage de silicates que par les sulfures, qui recristallisent plus rapidement (Tomkins, 2007).

Aussi, le dépôt comprend des zones à sulfures disséminés enrichies en Au-Ag et situées en périphérie des lentilles de sulfures massifs. Ces zones enrichies en Au ne sont pas stratigraphiquement restreintes et sont associées avec des minéraux hydratés enrichis en Mg. Ces zones ont été formées par un processus appelé « *prograde hydrothermal remobilisation* » (Tomkins, 2007), qui correspond à la mobilisation de H et S à partir du SMV (dévolatilisation), pendant le métamorphisme prograde, qui a formé des fluides enrichis en H-S capables de transporter Au, Ag and \pm Pb depuis le sulfure massif vers ses roches encaissantes (Tomkins, 2007).

Aussi, la décarbonatation est reportée à Montauban, puisque l'unité à calco-silicates est reconnue comme une unité altérée (carbonatation) qui a perdu du CO₂ pendant le métamorphisme (Latvalahti 1979, Large and Both 1980). Aussi, la complexité de l'assemblage de sulfures, la reconnaissance de globules de sulfures dans les silicates et la présence de quelques sulfures à l'écart des zones altérées sont des indications de fusion partielle des sulfures. Cette fusion a formé des fondus à As-S qui ont consommé la galène, incorporé l'or et qui se sont accumulés dans des zones en dilatation (Tomkins, 2007).

Calumet est un dépôt de Zn contrôlé par la stratigraphie, qui est soit un SMV, soit un SEDEX (Goodfellow et Lydon, 2007) et qui est situé dans l'orogénie de Grenville (Québec). Ce dépôt comprend : 1) une zone enrichie en Zn ; et 2) des sulfures disséminés enrichis en Au et situés en périphérie de la zone à Zn. Des indications d'anatexie sont reportées dans la zone à Au, mais l'assemblage de silicates enregistre des conditions de P-T plus faibles que celles du pic du métamorphisme. Là, l'or est observé sous forme d'électrum et les sulfures sont observés en inclusions dans les silicates. Dans l'ensemble du dépôt, quelques sulfures sont observés dans des fractures tardives et ont probablement été remobilisés (Jourdain, 1993).

À Calumet, l'or est interprété avoir été remobilisé depuis la zone à Zn, avec peut-être une partie de l'or ayant été introduit pendant un événement minéralisateur indépendant de la formation du SMV (Williams, 1990, Jourdain, 1993). La zone à Au a aussi pu se former selon un mécanisme similaire à celui qui a été proposé pour la formation des zones à Au observées en périphérie du SMV de Montauban (Tomkins, 2007).

Effet du métamorphisme – L'événement métamorphique a fortement modifié la forme du SMV de Montauban, en réduisant peut-être son étendue spatiale (concentration des sulfures dans la charnière d'un pli) et en déplaçant l'or en dehors de la lentille principale (circulation de fluides à H-S), alors que la fusion partielle des sulfures a probablement joué un rôle limité dans la remobilisation générale de l'or et des autres éléments (Tomkins, 2007). Des processus similaires semblent avoir joué à Calumet. D'une importance particulière pour l'exploration sont que les zones à Au sont détachées des lentilles de sulfures massifs pour les deux dépôts, une caractéristique inhabituelle pour les dépôts de bas grade mais qui doit être prise en compte dans les terrains de haut grade.

6.3 Les SMV Mt-Gibson et Aquilon

Aquilon est un dépôt filonien aurifère mais dans un environnement de SMV, non économique, situé dans une ceinture de roches vertes de la Baie-James, Province de Supérieur (Québec). La minéralisation comprend : 1) des zones à sulfures disséminés très déformées localement associées avec des zones altérées puis métamorphisées ; et 2) des veines de quartz à Au-Ag.

Les veines de quartz fortement déformées (foliées, démembrées, boudinées) sont localement situées dans une zone de déformation linéaire et sont observées loin des zones enrichies en sulfures. Les veines de quartz peuvent contenir Cc, < 2 % de sulfures et des pépites d'or natif. En bordure de ces veines, des minéraux hydratés de faible température sont observés qui ont sûrement été formés pendant le métamorphisme rétrograde. Aussi, les ratios Au/Ag sont plus élevés et plus variables dans les veines que dans les zones à sulfures.

Les veines de quartz d'Aquilon se sont formées soit syn-SMV ou sont reliées à un événement minéralisateur de type or orogénique tardif, car elles sont structurellement contrôlées (Desbiens 1998, Quirion 2000). Alternativement, ces veines pourraient provenir de la remobilisation syn-déformation de Au, Ag, H et S depuis le SMV vers son encaissant (Legault, 2003, Lapointe, 2006).

Mont-Gibson est un SMV situé dans la ceinture de roches vertes de *Yalgoo-Singleton* dans la Province Murchison, craton Yilgarn (Australie). Une partie du dépôt est stratiforme et composée de sulfures massifs à semi-massifs pauvres en or. Les inclusions de sulfures sont observées dans les grenats, ce qui confirme l'origine pré-pic des minéralisations de type SMV (Yeats et Groves, 1988).

Le dépôt comprend aussi des sulfures disséminés et quelques veines de quartz à Au, qui sont situées dans des zones de déformation et qui sont observées près et loin des sulfures massifs. Les zones à Au sont caractérisées par des altérations de type Si, K et S, ainsi que par des veines de quartz déformées et recristallisées. Là, l'électrum est observé dans des veines tardives, ce qui indique des remobilisations tardives de Au-Ag.

Le dépôt d'or de Mont-Gibson est fortement folié, est observé dans une zone de déformation ductile épaisse et est interprété comme un dépôt d'or syn-pic qui s'est surimposé à un dépôt de SMV (Yeats et Groves, 1988). La lentille de sulfures massifs et son halo d'altération sont des zones de faiblesses de la croûte qui ont probablement concentré les déformations (Yeats et Groves, 1988).

Effet du métamorphisme – Les veines de quartz à Au d'Aquilon pourraient correspondre à une remobilisation syn-métamorphique de l'or qui aurait initialement été accumulée par le système SMV (Lapointe, 2006). D'après la coïncidence spatiale entre les veines de Mont-Gibson et la lentille SMV à Au-Ag, une remobilisation prograde et préférentielle de Au-Ag par des fluides provenant de la dévolatilisation du SMV est aussi envisageable pour ce dépôt.

Aquilon était probablement non économique avant le métamorphisme. Le métamorphisme a déformé et étiré les zones enrichies en sulfures, les rendant encore moins économiques, mais a aussi remobilisé l'or dans des veines de quartz. Ce dernier processus aurait pu améliorer la valeur économique du dépôt, si les veines n'avaient pas été dispersées sur des zones aussi vastes. À Mont-Gibson, le métamorphisme a principalement déformé le dépôt et possiblement amélioré les teneurs en or, si l'interprétation « remobilisation » proposée ici est correcte.

6.4 Systèmes SMV - synthèse

Dans les systèmes SMV, l'or est d'abord accumulé par les lentilles de sulfures massifs, dont les morphologies sont principalement modifiées par la déformation. Les processus mécaniques sont probablement ceux qui déplacent le plus l'or dans de tels systèmes.

Aussi, le mouvement des fluides à H-S produits par la dévolatilisation prograde des systèmes SMV semble avoir joué un rôle important dans la remobilisation de l'or (**Figure 1**). De telles remobilisations sont restreintes à la zone de la lentille de sulfures massifs à Hongtoushan et Great Victoria, soit parce que la quantité de fluides était limitée ou parce que le régime de contraintes les a circonscrits à la lentille. Ailleurs, le mouvement des fluides semble avoir déplacé l'or en-dehors des lentilles de sulfures massifs, formant des sulfures disséminés (Montauban, Calumet) ou des veines de quartz là où les fluides ont pu être concentrés par, possiblement, des zones de failles (Aquilon, et peut-être aussi Mont-Gibson) (**Figure 1**).

Tous les dépôts décrits dans cette section ont été métamorphisés dans les conditions du faciès supérieur des amphibolites, où la déformation et la circulation des fluides sont des processus dominants (Tomkins, 2007). Au faciès des granulites cependant, d'autres processus peuvent avoir un impact plus important sur la morphologie des dépôts, comme l'anatexie et la fusion des sulfures.

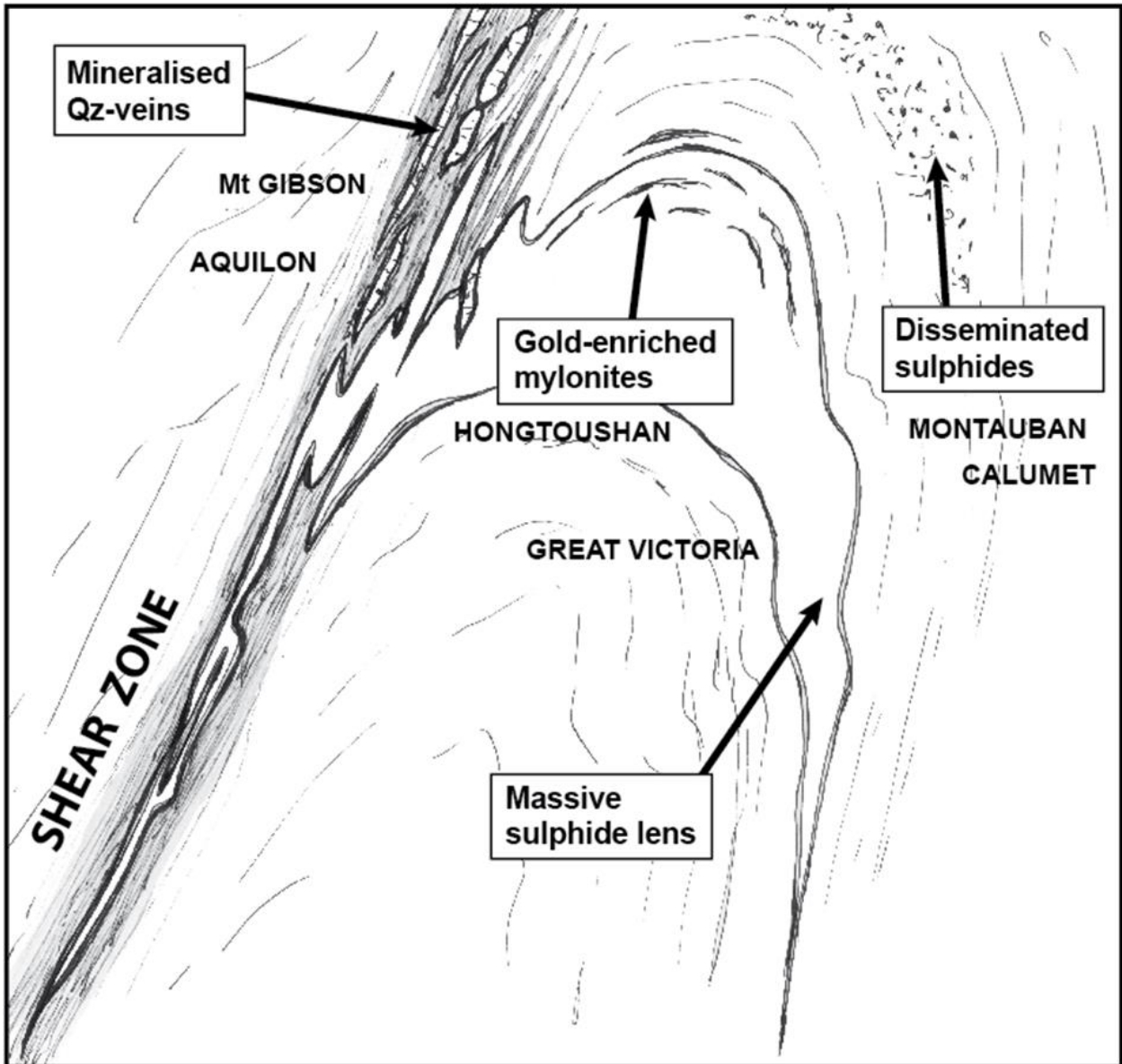


Figure 1 : Croquis résumant les diverses textures et morphologies qui peuvent être observées dans un système SMV métamorphisé.

Tableau 3 : Résumé des caractéristiques principales des systèmes SMV compilés.

Nom	Métamorphisme	Roche hôte principale ⁽¹⁾	Minéralisation	Morphologie	Principales références
Great Victoria	550-600°C, 3-4 kbar (McQueen 1992)	Contact entre grauwacke et roches volcaniques mafiques ultramafiques	Po-Py-Cct-Apy-Sp	Lentille de sulfures massifs déformée, en forme de pilier	McQueen (1992)
Hongtoushan	600-650°C, environ 10 kbar (Yang et Yu, 1984)	Horizon rythmique (horizon marqueur), dans une pile de roches volcaniques felsiques à mafiques	Py-Po-Cct-Sp, ±cubanite-Mag-Gn et électrum	Lentille de sulfures massifs déformée, en forme de « Y »	Gu et al. (2007), Zhang et al. (2013)
Montauban	570-680°C, 5.5-7.5 kbar (Bernier 1992)	Roches volcaniques intermédiaires ou felsiques	Sp-Po-Cct-Gn-Py, ±Apy-Mol-Ttr-Au-électrum (massif), électrum-Gn-Cct, ±Apy (disséminé)	Lentille de sulfures massifs déformée, zones à Au et sulfures disséminés en périphérie	Prabhu and Weber (1984), Bernier et al. (1987), Côté (1989), Bernier et McLean (1993), Jourdain (1993)
Calumet	650-700°C, 4-6 kbar (Williams 1990)	Volcanites mafiques interlitées avec des roches sédimentaires	Sp-Po-Gn, ±Py-Cct-Ttr-Apy-Mol-Ag et argentite (zone à Zn), Po-Cct-Py-Sp-Gn (zones à Au)	Sulfures stratoïdes (zone à Zn), zones à Au et sulfures disséminés en périphérie.	Williams (1990), Jourdain (1993)
Aquilon	Faciès des amphibolites (Lapointe 2006)	Roches volcaniques felsiques	Py, ±Po-Cct-Sp (sulfure), Py, Po, ±Sp-Cct-Gn-Au (veines de Qz)	Sulfures disséminés à massifs et veines de Qz, déformés	Lapointe (2006)
Mt Gibson	Faciès des amphibolites (Yeats et al. 1996)	Roches volcaniques mafiques et quelques felsiques	Py-Po-Sp-Gn-Cct (massif), Po-Py ±Cct (disséminé, veines de Qz)	Sulfures massifs à semi-massifs, sulfures disséminés et quelques veines de Qz	Yeats et Groves (1988)

(1) Le préfix « méta- » est omis.

7 OR OROGÉNIQUE ET FACIÈS DES GRANULITES

Dans cette section, les dépôts de type « gold-only » métamorphisés dans les conditions du faciès des granulites seront présentés. Les principales caractéristiques des dépôts compilés, ainsi que les principales références utilisées pour rédiger cette section, sont résumées par le **Tableau 4**.

7.1 Challenger et Griffin's Find

Challenger est situé dans le craton Gawler, Australie, et a été décrit comme un dépôt pré-pic de façon convaincante par diverses observations et expérimentations (Tomkins and Mavrogenes 2001, 2002). Le dépôt comprend des vecteurs minéralisées (*ore shoots*) en forme de cigares enrichis en Au-As, qui sont situés dans des roches fortement migmatisées, où les zones altérées enrichies en K-H du dépôt ont favorisé l'anatexie. Les vecteurs minéralisées sont des zones à sulfures disséminés qui sont observés dans les mésosomes et leucosomes, et sont concentrés dans les mélanosomes. Dans le dépôt de *Challenger*, une fusion partielle des sulfures a formé des assemblages à Au-Bi-As-S aux textures particulières et qui forment des inclusions dans les silicates. Des réactions rétrogrades ont formé l'arsénopyrite, ainsi que des minéraux hydratés qui ne sont pas liés au processus minéralisateur (Tomkins et Mavrogenes 2001, 2002).

Aussi, les mécanismes conduisant à la formation de l'assemblage Apy-Lo-Po-Au ont été étudiés en détail à Challenger (Tomkins et Mavrogenes, 2001). Ces auteurs ont montré que l'arsénopyrite aurifère avait été déposé par le fluide minéralisateur, que le métamorphisme prograde avait transformé l'arsénopyrite en pyrrhotite et loellingite aurifère et que, pendant le métamorphisme rétrograde, l'assemblage Apy-Po-Lo et grains d'or s'était formé.

Griffin's Find est un petit dépôt situé dans un lambeau de ceinture de roches vertes, dans la Province de « *Western Gneiss* », dans le bloc de Yilgarn (Australie). Le dépôt comprend des sulfures disséminés aurifères et des veines à Qz-Di-Grt avec des bordures enrichies en Au-K. Les veines de quartz sont boudinées ou non, sûrement parce qu'un liquide silicaté (anatexie) a partitionné les contraintes (Tomkins et Grundy, 2009). Les sulfures se sont accumulés aux nez des boudins et dans les zones de charnières de plis. La rétrogression est localement importante, et a formé des veines de Qz-Cb et des silicates hydratés.

La fusion post-minéralisation des sulfures est indiquée par les assemblages de sulfures à Ag-Sb-Pb-(etc.), l'anatexie est indiquée par la présence de leucosomes, et d'autres épisodes de fusion sont peut-être responsables de la formation des pegmatites qui recoupent les veines minéralisées. Les silicates avec des ratios Mg/Fe élevés indiquent des processus de désulfurisation, et les minéraux comme grenat, wollastonite, et diopside sont indicateurs de la décarbonatation. L'origine des assemblages de Lo-Apy-Po-Au est similaire à celle proposée pour le dépôt *Challenger* (Tomkins et Grundy, 2009).

Effet du métamorphisme – Au dépôt de *Challenger*, une fusion partielle des silicates et des sulfures a eu lieu, et les fondus à Si-S-métaux semblent avoir été collectés dans les vecteurs minéralisés, probablement grâce à un régime de contraintes syn-pic favorable (Tomkins et Mavrogenes 2002). Si le dépôt contenait initialement des sulfures disséminés sur une large étendue, alors Challenger semble être un exemple particulier d'un dépôt dans lequel les teneurs en or ont été améliorées par un épisode de fusion partielle. Au dépôt de *Griffin's Find*, l'anatexie ne semble pas avoir modifié les teneurs en or et, puisque les veines de quartz sont recoupées par des pegmatites, une activité magmatique tardive a pu diluer la minéralisation plutôt que d'en améliorer la valeur économique. Les deux dépôts ont été métamorphisés dans des conditions similaires (**Tableau 4**), mais l'anatexie a été plus importante à Challenger car le gisement est situé

dans des pélites, qui sont des roches plus fusibles que les hôtes volcano-sédimentaires de Griffin's Find.

7.2 Doornhoek et Renco

Le dépôt de Doornhoek est situé en marge du craton Kaapvaal (Afrique de Sud). La minéralisation est principalement observée dans et autour de veines déformées à quartz et parfois quartz-carbonate, où l'or est associé à l'arsénopyrite, la loellingite et graphite. Les sulfures et l'or sont aussi observés en inclusions dans le grenat. La présence de magnétite, pyrrhotite et l'abondance de graphite pourrait indiquer des processus de désulfuration et de décarbonatation. Aussi, sulfures, Au et Fe-oxydes ont été remobilisés dans des veinules et dans les plans de clivage des silicates. La zone minéralisée contient aussi d'abondants minéraux hydratés, qui ont été formés par une intense réhydratation post-pic qui a grandement modifié l'assemblage de haut grade (Stefan, 1997).

Le dépôt de Renco est aussi situé en marge du craton de Kaapvaal (Zimbabwe). Il a été décrit comme un dépôt syn-pic mis en place dans une mylonite active (Blenkinsop et Frei 1996, Kisters et al., 1998, Kolb et al., 2000) et, plus récemment, comme un dépôt pré-pic (Phillips et Powell, 2009). L'intensité de la déformation est maximale dans la zone minéralisée, qui est une mylonite. Les sulfures sont disséminés, accumulés dans les fractures, parallèles aux plans de foliations, forment des agrégats, et sont observés dans les ombres de pression de composants compétents. Les sulfures tendent à se concentrer dans les macrolithons, qui correspondent aux parties les moins déformées d'une mylonite. L'or forme des grains en marge de la chalcocite et de la pyrrhotite, ou forme des assemblages à Au-Bi ou autre assemblage complexe observé en inclusions dans les silicates. L'or a aussi été remobilisé dans des veinules tardives, ou dans les fractures de divers minéraux.

Par rapport aux roches environnantes, la zone minéralisée contient plus de migmatites, qui sont déformées, discontinues et qui contiennent des sulfures (Tabcart, 1988). De plus, la minéralisation est recoupée par des pegmatites dépourvues d'or (Phillips et Powell, 2009). La minéralisation au dépôt de *Renco* était probablement située dans des zones de faille qui ont continué à accommoder de la déformation après l'évènement minéralisateur, et les zones altérées enrichies en K-H ont probablement facilité l'anatexie une fois les conditions du faciès des granulites atteintes. De plus, la rétrogression y est importante et a conduit à la formation d'assemblages du faciès des schistes verts dans la zone de déformation. Cette rétrogression a modifié les âges, rétrogradé la plupart des minéraux et possiblement remobilisé de faibles quantités d'or (Phillips et Powell, 2009).

Effet du métamorphisme – Le dépôt de *Renco*, présente une déformation et une anatexie intenses qui ont probablement fortement modifié ses caractéristiques initiales. Mais l'effet le plus frappant du métamorphisme pour les dépôts de *Doornhoek* et de *Renco* est l'intense réhydratation rétrograde des assemblages, qui a probablement remobilisé très peu d'or, puisque la solubilité de l'or est très basse dans les fluides à H de faible température (Tomkins, 2007). Mais l'abondance d'assemblages hydratés est un problème pour l'exploration, car ces minéraux miment les halos d'altération mais ne sont pas spatialement corrélés aux teneurs en or. De tels assemblages peuvent aussi donner l'impression que les dépôts sont pré-pic, ce qui peut conduire à l'utilisation du mauvais modèle d'exploration et à ne pas prêter attention aux processus d'anatexie, de déformation et autres qui ont pu modifier le dépôt.

7.3 Tropicana and Corvet Est

Tropicana est un dépôt qui a été découvert en 2005 et qui est situé en bordure du craton de l'ouest australien. Le dépôt comprend une zone d'altération enrichie en S-K-(Au ?) qui recoupe une séquence volcanique avec un angle faible, et qui a été métamorphisée au faciès des granulites. L'or a été introduit possiblement pré-pic, et a été fortement remobilisé dans des zones de déformations à Bt-Ser-Py pendant un métamorphisme rétrograde du faciès des schistes verts (Crawford et Doyle, 2016).

Les veines de quartz déformées (près-pic) et les leucosomes (syn-pic) sont peu abondants (Doyle et al., 2007). L'or libre est situé dans la Py, dans des fractures à Bt-Ser qui recoupent la foliation et de l'or visible (rare) est observé dans des veinules à Mus et des fractures qui recoupent S1, les veines de quartz et les zones minéralisées à Bt-Py. L'essentiel du gisement est disséminé et situé dans des zones de déformation à Bt-Py formées pendant le métamorphisme rétrograde (Crawford et Doyle, 2016). La rétrogression est importante dans le dépôt de *Tropicana*, ce qui a pu conduire à de mauvaises interprétations du moment où l'or a été introduit. Des travaux supplémentaires semblent nécessaires pour résoudre les problèmes de chronologie, et pour déterminer comment le métamorphisme a pu modifier un dépôt qui pourrait être pré-pic.

Corvet Est est un dépôt situé dans la Sous-province de La Grande, près de son contact avec la Sous-province d'Opinaca, dans la Baie-James, Province de Supérieur (Québec). Le dépôt comprend des sulfures disséminés situés dans des roches fortement foliées. L'or est observé en inclusions dans les sulfures et les silicates, en bordure des grains, et en grains dans des veines tardives déformées à Qz-Carb. Ces caractéristiques, ainsi que la difficile reconnaissance de la carbonatation, pointent vers une origine pré-pic (Aucoin et al., 2012). Des pegmatites sont reportées. L'importance de l'anatexie n'est pas connue. Des remobilisations tardives et mineures de l'or sont aussi observées. Aussi, la rétrogression a formé des minéraux hydratés qui ne sont pas spatialement corrélés avec les teneurs en or.

Effet du métamorphisme – Compte tenu des conditions du métamorphisme *aux dépôts de Tropicana et Corvet Est*, l'anatexie a pu s'initier et a peut-être modifié ces dépôts. La déformation peut aussi avoir joué un rôle. Les deux minéralisations sont principalement disséminées, et le métamorphisme ne semble pas avoir fortement amélioré les teneurs en or. À *Tropicana*, la morphologie du dépôt semble avoir été fortement modifiée pendant une phase rétrograde du métamorphisme (schistes verts). Cependant, dans les deux cas, beaucoup d'éléments demandent encore à être documentées.

7.4 Dépôts « gold-only » et faciès des granulites : résumé

Lorsque les dépôts sont métamorphisés au faciès des granulites, l'anatexie est probablement toujours présente, surtout dans le halo d'altération enrichi en K-H. Mais le seul dépôt qui semble avoir été fortement modifié par la fusion partielle est celui de *Challenger*, qui est situé dans un matériau particulièrement fusible: des métagéolites. Pour les autres dépôts, l'anatexie a pu n'avoir aucun effet sur les teneurs en or, ou avoir eu un effet négatif, puisque les liquides silicatés (maintenant des leucosomes) ont pu recouper et diluer la minéralisation. Les leucosomes peuvent prendre des formes, orientations et épaisseurs irrégulières, et là où ils sont observés en relation de recoupement avec la minéralisation, une attention particulière doit être portée à l'évaluation de leur volume et de leur potentiel de dilution au moment du calcul des ressources.

D'autres processus ont joué dans ces dépôts du faciès des granulites, comme la dévolatilisation, la déformation et, probablement dans certains cas, la fusion des sulfures. Le dépôt de *Renco* est possiblement un exemple extrême de la façon dont la déformation intense d'un dépôt par une zone de faille (mylonite dans ce cas) peut redistribuer des sulfures disséminés.

Aussi et particulièrement pour *les dépôts de Doornhoek* et de *Renco*, le métamorphisme rétrograde a formé de grandes quantités de minéraux hydratés qui rendent l'interprétation de ces dépôts plus difficile. Dans de tels cas, il est important de distinguer les minéraux hydratés formés pendant la rétrogression et qui ne sont pas corrélés à l'or, de ceux qui font partie de halos d'altération de bas grade, qui sont corrélés à l'or et qui ne seront observés que dans des gisements post-pic (ou dans des gisements non-métamorphisés).

Tableau 4 : Résumé des caractéristiques principales des dépôts « gold-only » métamorphisés au faciès des granulites.

Nom	Métamorphisme	Principales roches hôtes ⁽¹⁾	Minéralisation	Morphologie	Références principales
Challenger	800-850°C, 6-9 kbar (Tomkins et al., 2004b)	Pélites	Lo-Apy-Po, ±Cct-Pn-Bi-Mol-Sp et maldonite	Sulfures disséminés (vecteurs minéralisés en forme de cigare)	Barnicoat et al. (1991), Neumayr et al. (1998), Tomkins et Mavrogenes (2001, 2002)
Griffin's Find	820-870°C, 5,5 kbar (Tomkins and Grundy 2009)	Succession sédimentaire- volcanique (Grt-Bt-gneiss et granulites mafiques)	Lo-Apy-Po, ±Gn-Sp-Cpy-Pn	Veines de Qz-Di-Grt irrégulières, sulfures disséminés	Neumayr et al. (1993), Tomkins and Grundy (2009)
Doornhoek	870°C, 8-9 kbar (Stevens and van Reenen 1992)	Granulites felsiques à ultra- mafiques, formation de fer (faciès Si)	Lo-Apy-Po, ±Cct-Sp-Py, électrum et autres minéraux à Ni-Co	Veines de Qz et ±Qz- Carb, déformées	Stefan (1997)
Renco	730-850°C, 6-8 kbar (Rollinson 1989, Ridley 1992)	Granulite felsique et mafique migmatisée	Po, ±Cct-Py, ±±Mol-Sp-Cbn-Au- Bi, maldonite, Bi-S-tellurides et Au-Bi-sulphosels	Sulfures disséminés à semi-massifs	Tabeart (1988), Blenkinsop et Frei (1996), Kisters et al. (1998), Kolb et al. (2000), Phillips et Powell (2009)
Tropicana	Amphibolite à granulite (Blenkinsop and Doyle 2014)	Gneiss (séquence volcanique mafique à felsique)	Py, ±Po-Cpy-electrum- tellures; ±±Moly-bismuthinite- Sp-Gn-bornite	Sulfures disséminés	Blenkinsop et Doyle (2014), Crawford et Doyle (2016)
Corvet Est	~700 °C, 1-5 kbar (Aucoin et al. 2012)	Succession sédimentaire- volcanique (volcanites mafiques principalement)	Py, Apy, Po, ±Cpy et Au	Sulfures disséminés	Aucoin et al. (2012)

(1) Le préfix « méta- » est omis

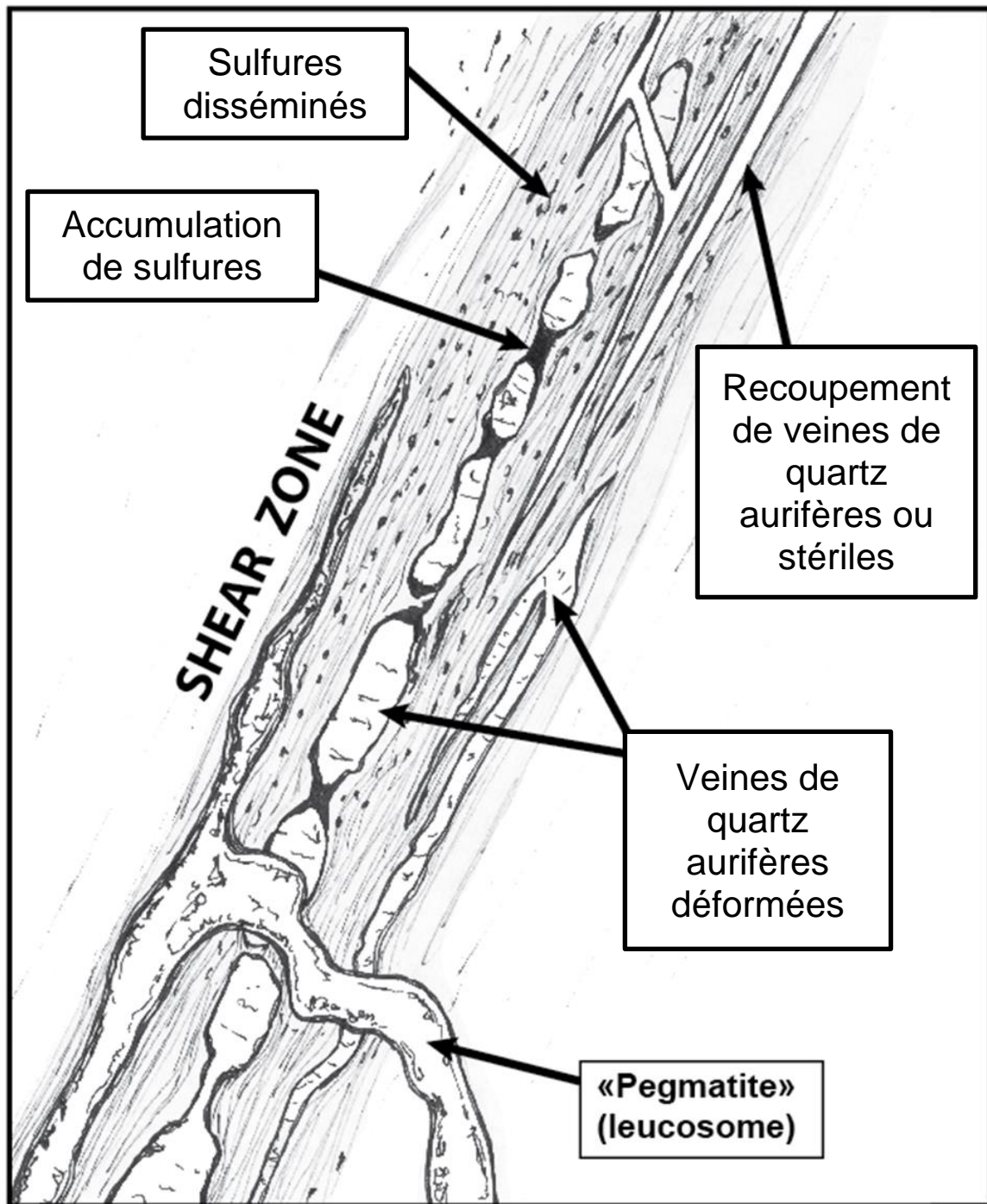


Figure 2 : Croquis résumant les diverses textures et morphologies qui peuvent être observées dans un dépôt d'or orogénique métamorphisé au faciès des granulites. Pour des dépôts métamorphisés à plus bas grade, certaines caractéristiques dessinées ici peuvent être observées, et seront moins prononcées qu'à très haut grade. Les morphologies particulières, comme celles observées à Challenger et Renco, ne sont pas représentées (pour des dessins de ces dépôts (Tomkins et Mavrogenes 2002, et Kisters et al. 1998).

8 DÉPÔTS D'OR OROGÉNIQUES SITUÉS DANS DES ROCHES MAFIQUES

Dans cette section, les dépôts d'or orogéniques situés dans des roches à dominance mafique et métamorphisés aux conditions du faciès supérieur des amphibolites sont présentés. Parmi ces dépôts, les exemples les mieux documentés sont ceux de *Hemlo* et de *Big Bell*, qui seront utilisés pour lister les processus métamorphiques pouvant être attendus dans de tels contextes. Les autres dépôts (*Eastmain*, *Plutonic Gold*, *New Consort*, *Marvel Loch*) sont présentés pour comparaison. Les principales caractéristiques des dépôts compilés, ainsi que les principales références utilisées pour écrire cette section, sont reportées dans le **Tableau 5**.

8.1 Hemlo, Big Bell, Eastmain, Marvel Loch, Plutonic Gold et New Consort

Le dépôt d'Hemlo est situé dans la ceinture de roches vertes étroite de Hemlo, Sous-province de Wawa, Province de Supérieur (Ontario, Canada). La minéralisation est logée dans des roches plus déformées que les roches environnantes, et correspond à un assemblage complexe de sulfures et sulfosels (pour une revue récente, voir Muir, 2002).

L'or est observé à la frontière des grains, dans des zones de déformation tardives, des veines calco-silicatées et des fractures, et forme des inclusions dans le quartz et les autres silicates, des pépites dans les veines de quartz et est associé à des assemblages complexes de phases sulfurées. La minéralisation a peut-être été remobilisée plusieurs fois (Muir, 2002). Aussi, des pegmatites d'origine indéterminée sont reportées (Phillips et Powell, 2009), et la fusion des sulfures a été étudiée en détail (Tomkins et al., 2004). D'autres processus sont décrits pour le dépôt de *Hemlo*, comme la décarbonatation et la remobilisation rétrogrades des phases sulfurées.

Hemlo est particulièrement utile pour comprendre l'initiation de la fusion des phases à soufre. En effet, la température était suffisamment élevée pour faire fondre les sulfosels (phases à As et Sb principalement), ce qui a produit un liquide sulfuré qui a collecté Hg, Ag, Tl et Au, et qui s'est déplacé sur quelques centimètres et s'est accumulé dans les zones en dilatation où des teneurs en or localement élevées sont reportées. Mais la température était trop faible pour permettre aux sulfures de fondre (Tomkins et al., 2004). Au final, la fusion des phases sulfurées ne semble pas avoir fortement modifié la distribution de l'or.

Le dépôt de ***Big Bell*** est situé dans la ceinture de roches vertes de Meekatharra-Wydney, Province de Murchison, craton de Yilgarn (Australie). La minéralisation est associée avec une génération précoce et déformée de veines de quartz, et est recoupée par des veines de quartz à métaux et à pyrite qui ne contiennent pas d'or. L'or est rarement visible et est observé dans les sulfures, le quartz et les autres silicates.

Plusieurs processus métamorphiques sont reportés au dépôt de *Big Bell*. Les carbonates pré-pic ont été perdus pendant la décarbonatation. La désulfurisation a modifié les ratios Fe/Mg des silicates et a formé une zonation minéralogique autour du dépôt : schistes à muscovite et/ou feldspath alcalin proximaux (à pyrite) et schistes à biotite distaux qui ont perdu leurs sulfures (Phillips et De Nooy, 1988). Les sulfures et l'or remobilisés sont observés dans des fractures et veinules qui recoupent les plans de foliation. L'anatexie a peut-être commencé dans le halo d'altération enrichi en K-H, où des veinules déformées à quartz-feldspath alcalin (leucosomes), des silicates avec des ratios K/Rb variables, des roches anormalement pauvres en Na (restites) et des assemblages particuliers sont observées (Phillips et De Nooy, 1988, Phillips et Powell, 2009).

Le dépôt d'Eastmain est situé dans la ceinture de roches vertes de la rivière *Eastmain*, Baie-James, Province de Supérieur (Québec). Le dépôt est situé dans une zone de faille ductile

montrant une forte déformation. L'or est principalement observé dans des veines de quartz et localement en bordure de ces veines. L'or est associé avec des minéraux à Te et Bi. Il forme des inclusions dans les silicates et les sulfures, et des pépites à finesses variables (Couture et Guha, 1990). La décarbonatation a pu retirer les carbonates. La remobilisation et les mouvements post-minéralisation le long de la zone de déformation ont déformé les veines de quartz et ont formé des veinules de grenat-sulfures et des fractures remplies de sulfures qui recoupent la veine de quartz principale, ainsi que des brèches à quartz-sulfures contenant de l'or, des accumulations de sulfures aux nez des boudins et des remplissages de sulfures dans les fractures des minéraux. Le dépôt de **Marvel Loch** est situé dans la ceinture des roches vertes de Southern Cross, bloc de Yilgarn (Australie). Le dépôt est structuralement contrôlé par une zone de déformation et a été classé comme un skarn, peut-être parce que les calco-silicates sont abondants (Mueller et al., 1991). Marvel Loch est pauvre en sulfures et contient des veines de Qz-Cpx massives ou laminées qui sont parallèles aux plans de foliation et de cisaillement, qui contiennent des vecteurs minéralisés à haute teneur. L'or natif est observé en inclusions dans les silicates, en bordure des sulfures, et dans les fractures remplis de chalcocite-sphalérite. Des pegmatites recoupent la minéralisation et les zones de cisaillement, et peuvent contenir de l'or. Le dépôt de *Marvel Loch* s'est peut-être formé avant le pic du métamorphisme (d'après les inclusions d'or dans les silicates et les assemblages Arsénopyrite - loellingite), auquel cas on peut se demander si les vecteurs minéralisés observés dans les veines de quartz sont des caractéristiques syn-minéralisation ou s'ils correspondent à une morphologie acquise pendant le métamorphisme.

Le dépôt de **Plutonic (Plutonic Gold Mine)** est situé dans la ceinture de roches vertes de *Plutonic Well*, inlier de Marymia (Australie). Le dépôt contient surtout des sulfures disséminés situés dans des filons de 1 à 3 m d'épaisseur, qui sont parallèles aux plans de foliation et à la stratigraphie. Une faible partie de l'or et des sulfures ont été remobilisés dans des zones de cisaillement et des veines de quartz-carbonate tardives. L'or est observé en grains libres, dans les fractures de la tourmaline, dans ou en bordure de l'arsénopyrite et de la pyrrhotite, et en inclusions dans les silicates. Les minéraux hydratés sont aussi observés autour de veines tardives qui se sont possiblement formées pendant la rétrogression. Le dépôt de *Plutonic* a été remobilisé, et certaines de ses caractéristiques (inclusions d'or dans les silicates, difficulté de reconnaître les altérations K-H) pourraient mieux s'intégrer dans un modèle pré-pic, mais encore beaucoup de travail reste à faire pour élucider ce point. La minéralisation est principalement disséminée et ne semble pas avoir été fortement redistribuée par le métamorphisme.

Le dépôt de **New Consort** est situé dans la ceinture de roches vertes archéenne de Barberton (Afrique de Sud). La minéralisation est située dans la *Consort Bar*, une mylonite fortement silicifiée qui sépare des séquences méta-volcaniques et méta-sédimentaires. La minéralisation est soit associée avec la zone de déformation *Consort Bar* (zone de hautes teneurs en or), soit située sous la *Consort Bar*, dans un corps gneissique compétent (sulfures remobilisés ?). Les sulfures sont généralement disséminés et les veines de quartz sont fines et peu abondantes. L'or est associé avec arsénopyrite, loellingite et pyrrhotite, est observé en grains dans l'arsénopyrite et remplis les fractures d'arsénopyrite et autres minéraux. Les sulfures remobilisés et l'or sont aussi observés dans des fractures et zones de cisaillement qui recoupent les structures ductiles. La zone contient aussi une abondance de pegmatites. Les remarques faites pour le dépôt de *Plutonic* s'appliquent aussi à celui de *New Consort*, et davantage de travail est nécessaire pour préciser le synchronisme entre les événements minéralisateur et métamorphique.

8.2 Dépôts d'or situés dans les roches mafiques du faciès supérieur des amphibolites : résumé

La déformation, qui correspond généralement à la continuation des mouvements le long des zones de cisaillement qui ont contrôlé le dépôt de l'or, est un processus important qui a modifié la

plupart des dépôts compilés dans cette section. La déformation est plus facilement observable dans les dépôts qui contiennent des veines de quartz alors que, pour ceux qui ne contiennent que des sulfures disséminés, l'effet de la déformation peut être plus difficile à évaluer. Les autres processus importants sont la dévolatilisation, et surtout la décarbonatation qui rend le halo d'altération plus difficile à identifier (rappelons que les gisements d'or orogéniques de bas grade sont entourés par des halos de carbonatation de grande étendue, qui ne sont pas observés autour des gîtes métamorphisés) La désulfurisation a pu modifier la chimie des silicates et la minéralogie des unités hôtes (p.ex. *Big Bell*). La fusion des sulfures et localement, l'anatexie sont observées. La redistribution de l'or par la circulation de fluides à H-S ne peut pas être exclue, et a pu ajouter (ou déplacer) des veines de Qz et des sulfures disséminés au dépôt (voir processus décrits pour les SMV). Il est difficile de quantifier la redistribution de l'or dans les dépôts compilés ici, ou d'estimer de combien le métamorphisme a modifié les teneurs et tonnages dans ces zones. Ces processus nécessitent des études dédiées pour être quantifiés mais, en première approximation, la plupart des minéralisations sont disséminées, et aucuns des processus du faciès supérieur des amphibolites (voir déformation, mouvement des fluides, fusion des sulfures) ne semblent suffisants pour détruire ces dépôts ou pour collecter l'or et améliorer la valeur économique de ces gisements.

Tableau 5 : Résumé des caractéristiques principales des dépôts d'or orogéniques situés dans des roches mafiques.

9 Nom	Métamorphisme	Principale roche hôte ⁽¹⁾	Minéralisation	Morphologie	Références principales
Hemlo	600-650°C, 6-7 kbar (Tomkins et al. 2004 b)	Tuff (volcanites felsiques) proche de turbidites	Py-Mol-Po-Sp-cinnabre-stibnite-réalgar, \pm sulfosels, tellures, et natifs (Au inclus)	Sulfures disséminés principalement, rares veines de Qz déformées	Phillips (1985), Kuhns et al. (1986), Pan et Fleet (1995), Muir (2002), David and Lin (2003), Tomkins et al. (2004)
Big Bell	650-700°C, 4-5 kbar (Phillips et De Nooy, 1988)	Roches intensément altérées avec un précurseur mafique (schistes à Musc, Afs et Bt)	Py-Po-Sp-Mol-Apy, stibnite, scheelite, Au libre, aurostibnite, électrum	Sulfures disséminés et veines de Qz (filon déformé et parallèle à la stratigraphie)	Phillips et De Nooy (1988), Wilkins (1993), Mueller et al. (1996)
Eastmain	600 °C, 2-5 kbar (Couture 1993)	Volcanites felsiques et mafiques	Py principalement (disséminée), et Po-Cct, \pm Py-Apy-Sp (veines)	Sulfures disséminés et une veine de Qz principale	Couture et Guha (1990)
Marvel Loch	550-680°C, 3-5 kbar (Mueller et al., 1991)	Volcanites mafiques et ultramafiques	Po-Cct, \pm Py-Apy-Lo-Gn-Sp et niccolite	Veines à Qz-Cpx	Mueller (1988, 1991), Mueller et al. (1991)
Plutonic Gold Mine	550-650°C, 6-10 kbar (Gazley et al. 2011)	Volcanites mafiques plissées	Apy-Po, \pm Cct-Au et scheelite	Sulfures disséminés, veines tardives à Qz-Cb	Gazley (2011), Gazley et al. (2011, 2014)
New Consort	570-700°C, 4-8 kbar (Otto et al. 2007)	Contact faille entre des volcanites mafiques à ultramafiques et des pélites-psammites	Apy-Lo-Po, \pm Cct-Py-Au-Sb, ullmaniite et stibnite	Sulfures disséminés, veines de Qz fines et rares	Tomkinson et Lombard (1990), Otto et al. (2007)

(1) Le préfix « méta- » est omis.

10 OR OROGÉNIQUE DANS LES FORMATIONS DE FER

Dans cette section, les dépôts d'or situés dans des formations de fer faisant communément partie d'empilements volcaniques, et qui ont possiblement été métamorphisés dans les conditions du faciès supérieur des amphibolites, seront décrits. Les principales caractéristiques de ces dépôts, ainsi que les principales références utilisées pour rédiger cette section, sont résumées au **Tableau 6**.

10.1 Marymia, Nevoria, Granite Goldfield, Musselwhite et Mt York

Le dépôt de **Marymia** est situé dans la ceinture de roches vertes de Plutonic Well, Inlier Marymia (Australie). Il est localisé sur dans le flanc ouest d'une antiforme, et est situé dans une formation de fer fortement déformée (plissée, boudinée). Les vecteurs minéralisés sont fins et discontinus, et comprennent des sulfures disséminés recoupés par des veines de quartz qui sont soit parallèles aux plans de stratification et de foliation, soit situées dans des zones en dilatation. Les sulfures disséminés (< 5 vol%) sont observés dans des veines de quartz et quartz-carbonate, et dans les roches environnantes silicifiées. L'or est observé en inclusions dans les sulfures et les silicates, dans les fractures des minéraux, et sa finesse varie beaucoup. Il est aussi associé avec des assemblages dominés par des minéraux à Te qui remplacent la pyrrhotite ou qui remplissent les fractures et clivages de divers minéraux, et qui pourraient correspondre à du liquide sulfuré cristallisé (Vielreicher et al., 2002). Des veinules tardives recoupent également les zones de déformation, et correspondent à des remobilisations tardives de la minéralisation, qui n'ont pas amélioré les teneurs en or.

Le dépôt de **Nevoria** est situé dans la ceinture de roches vertes de *Southern Cross*, Bloc de Yilgarn (Australie). Il est interprété comme post-pic et est décrit comme un skarn (Mueller 1997, Mueller et al., 2004), bien qu'il pourrait s'agir d'un dépôt d'or orogénique (Fan et al., 2000). Il est situé dans le flanc sud d'un pli régional, dans une zone déformée et métamorphisée par la mise en place d'un batholite. Il contient des sulfures disséminés (principalement pyrrhotite, et quelques grains de pyrite et d'arsénopyrite) qui forment des laminations dans la formation de fer hôte et des inter-croissances avec les silicates. Des veinules tardives irrégulières de Po-Qz et Py-Po sont aussi observées. Le dépôt contient aussi les ensembles de veines de quartz suivantes :

- 1) veines précoces à quartz-calcosilicates, structuralement contrôlées et pauvres en or ;
- 2) veines à quartz-sulfures tardives qui recoupent la séquence stratigraphique et qui sont enrichies en or et Po ; et
- 3) veines locales à Qz-Py pauvres en or.

Les assemblages d'or et de phases à Te-Bi pourraient provenir de la fusion des sulfures. L'or et les sulfures associés (incluant les phases à Bi-Te et Au-Bi) sont aussi observés dans les silicates.

Le dépôt de **Granite Goldfield** est situé dans le Bloc de Granite-Tanami (Australie). Il est souvent vu comme un dépôt syn-pic qui aurait été déformé après sa mise en place (Scrimgeour et Sandiford, 1993, Valenta et Wall, 1996, Adams et al. 2007). Le dépôt contient des veines de Qz et des sulfures disséminés stratigraphiquement contrôlés qui sont confinés dans une unité enrichie en amphibole. Les veines de quartz, quartz - carbonate et quartz-calcosilicates sont structuralement contrôlées et situées dans des zones en dilatation. L'or est principalement associé avec des veines précoces, qui sont déformées (plissées, boudinées, foliées) et qui sont recoupées

par des veines tardives pauvres en or. L'or forme des inclusions dans Arsénopyrite - loellingite, et est localement associé à la pyrrhotite - chalcocite.

Le dépôt de **Musselwhite** est situé dans la ceinture de roches vertes de North Caribou, Province de Supérieur (Ontario, Canada). Le dépôt est situé dans des zones de cisaillement qui se sont développées pour accommoder le plissement des unités hôtes du dépôt, déformées par la mise en place d'un pluton. Le dépôt est stratigraphiquement contrôlé et comprend :

- 1) des zones de remplacement enrichies en pyrrhotite et associées avec une intense silicification (« quartz-flooding ») ; et
- 2) des veines de quartz - pyrrhotite dont l'orientation indique une mise en place syn-cinématique.

L'or est observé dans les veines de quartz et les roches altérées environnantes, dans des veinules de pyrrhotite, dans les fractures du grenat qui sont remplies de pyrrhotite, en inclusion dans le grenat et dans les ombres de pressions de divers silicates. La remobilisation est mineure, et est mise en évidence par les rares veines de quartz - carbonate qui recoupent les zones enrichies en or visible.

Le dépôt de **Mt York** est situé dans la ceinture de roches vertes de Pilgangoora, Bloc de Pilbara (Australie), dans le flanc de plis, dans ou proche de zones de cisaillement liées au plissement. Il comprend :

- 1) des brèches à quartz avec une matrice à pyrrhotite (sulfures semi-massifs) ; et
- 2) des veines de quartz – biotite - amphibole et quartz, où l'or est le plus souvent observé en bordure de ces veines.

Les grains d'or sont observés dans pyrrhotite, pyrite, et amphibole, sont associés avec l'assemblage loellingite - arsénopyrite - pyrrhotite et des inclusions de pyrrhotite - arsénopyrite sont observées dans le grenat. Des mouvements tardifs de fluides ont formé des veines à Cb et des fractures remplies d'arsénopyrite.

10.2 Or situé dans les formations de fer : résumé

Les dépôts décrits dans cette section partagent diverses similitudes. Les sulfures disséminés stratigraphiquement contrôlés (**Figure 3**) ont pu se former pendant le processus minéralisateur, par sulfuration de la formation de fer, ou correspondre à des enrichissements en sulfures syn-sédimentaires (p.ex. *Musselwhite*; *Goucerol* et al. 2015). Le système de veines de quartz à or prédominant (**Figure 3**) est, d'après sa position dans les parties cisillées des charnières des plis, syn-déformation et s'est formé syn-minéralisation ou plus tard, quand le grade métamorphique a augmenté, auquel cas les veines de quartz seraient le résultat d'un processus de remobilisation syn-métamorphique.

Le synchronisme entre la formation des veines de quartz et les sulfures disséminés, et entre la déformation et les événements thermiques semble difficiles à résoudre pour ces dépôts, ce qui rend difficile la distinction entre les éléments liés à la mise en place du dépôt et ceux dus au métamorphisme. La principale différence entre les dépôts compilés ici et leurs équivalents de bas grade est probablement l'intensité du plissement et du cisaillement, et possiblement de la remobilisation syn-métamorphique (c.-à-d. le mouvement des fluides à H-S) qui pourrait augmenter la quantité de veines de quartz et redistribuer les sulfures disséminés à l'intérieur de la formation de fer. L'anatexie ne jouera pas un rôle important ici, puisque les formations de fer ne sont pas des roches particulièrement fusibles.

La relation entre ces dépôts et les parties les plus intensément plissées des formations de fer est particulièrement intéressante pour l'exploration.

De telles morphologies sont soit le résultat du fait que les fluides ont été canalisés par les zones fortement déformées, ou que la déformation s'est concentrée dans les zones de faiblesses enrichies en sulfures. Dans un cas comme dans l'autre, les zones les plus fortement plissées des formations de fer devraient être regardées comme des cibles d'exploration.

Tableau 6 : Résumé des caractéristiques principales des dépôts d'or orogéniques situés dans des formations de fer.

Nom	Métamorphisme	Principale roche hôte ⁽¹⁾	Minéralisation	Morphologie	Références principales
Marymia	540-575 °C, <3 kbar (McMillan 1996)	FeFm intercalées avec des volcanites mafiques	Py-Po-Cct, ±Gn, scheelite, minéraux à Te (petzite, hessite, altaite, Bi-tellures)	Sulfures disséminés dans et autour de veines de Qz et Qz-Cb	Vielreicher et al. (2002)
Nevoria	560-660 °C, 3-5 kbar (Mueller et al. 2004)	FeFm intercalées avec des volcanites mafiques à ultramafiques	Po-Py-Cct-Lo-Apy-Au, maldonite, ±scheelite-stilpnomelane	Sulfures disséminés (Po surtout), veines de Qz	Mueller (1997), Mueller et al. (2004), Fan et al. (2000)
Granite Goldfield	600 °C, 4,5 kbar (Scrimgeour and Sandiford 1993)	FeFm (BIF, facies silicaté) dans des unités de pélites et psammite	Apy-Lo-Po, ±Py-Cct-marcasite, rare Gn	Sulfures disséminés stratigraphiquement contrôlés, veines de Qz	11 Scrimgeour et Sandiford (1993), Valenta et Wall (1996), Adams et al. (2007)
Musselwhite	540-600 °C, 3 kbar (Hall and Rigg 1986, Otto 2002)	FeFm intercalées avec des volcanites mafiques	Po, ±Au-Cct-Apy	Po disséminée, veines de Qz-Po	Otto (2002), Biczok et al. (2012), Goucerol et al. (2015), Oswald et al. (2015), McNicoll et al. (2015)
Mt York	520-640 °C, 4 kbar (Neumyar et al. 1994)	FeFm intercalées avec des volcanites mafiques à ultramafiques	Po-Apy-Lo-Cct-Sp	Sulfures semi-massifs, veines de Qz	Neumyar et al. (1993)

(1) Le préfix « méta- » a été omis.

(2) FeFm signifie formation de fer

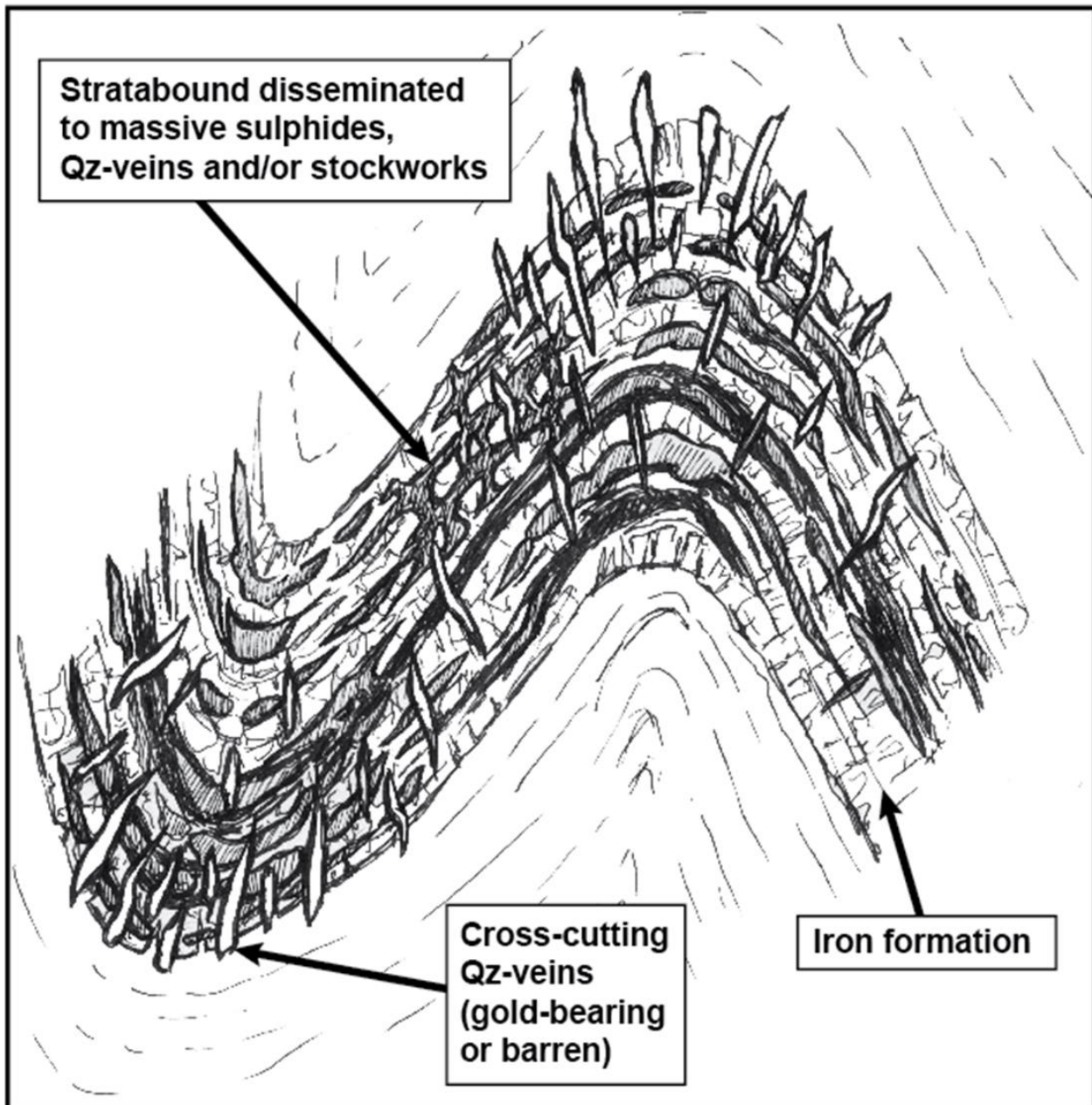


Figure 3 : Dessin résumant les diverses textures et morphologies qui peuvent être observées dans un dépôt d'or orogénique situé dans une formation de fer et métamorphisé dans les conditions du faciès des amphibolites.

12 OR OROGENIQUE DANS DES ROCHES SÉDIMENTAIRES

Dans cette section, les dépôts d'or situés dans des roches sédimentaires et métamorphisés dans les conditions du faciès supérieur des amphibolites seront décrits. Les principales caractéristiques de ces dépôts, ainsi que les principales références utilisées pour rédiger cette section, sont résumées au **Tableau 7**.

12.1 **Roberto (propriété Éléonore) et Navachab**

Le dépôt de **Roberto** est situé à proximité du contact entre les Sous-provinces d'Opinaca (dominé par des roches sédimentaires) et de La Grande (principalement magmatique) de la Province de Supérieur (Québec), dans la charnière d'un pli, où il est coupé et déplacé par de nombreuses zones de faille. Les sulfures et les grains d'or sont disséminés dans et autour de veines de quartz (stockwerk) qui peuvent contenir des minéraux à Ca ou K (Ravenelle 2013). Les veines, veinules et stockwerk sont déformés, et sont parallèles aux plans de stratification et de foliation. Une quantité importante de pegmatites sont reportées, qui sont déformées et qui peuvent contenir arsénopyrite, pyrrhotite, et Au où elles recoupent la minéralisation. Des minéraux rétrogrades et des remobilisations mineures des sulfures dans des failles cassantes sont également observés.

Le dépôt de Roberto est situé dans des roches ± fusibles (wacke, quelques pélites) et contient des assemblages similaires à ceux du dépôt de Challenger (Lo-Apy-Po-Au). Cependant, Roberto est situé dans des wackes, pas dans des pélites, et a été métamorphisé à plus bas grade (amphibolite supérieur ?) que Challenger (granulites), ce qui pourrait expliquer que l'anatexie ne joue qu'un rôle mineur à *Roberto*, où la déformation est le principal processus post-minéralisation qui ait modifié le dépôt.

Le dépôt de Navachab est une mine d'or située dans la ceinture de Damara (Namibie), dans le Super-groupe de Damara (séquence sédimentaire de marge continentale). Les fluides métamorphiques ont pu former ce dépôt (Wulff et al., 2010), qui a aussi été décrit comme un skarn, c.-à-d. formé par des fluides magmatiques ayant interagi avec une unité calcaire (Nörtemann et al., 2000).

Le dépôt est situé dans le flanc d'un anticlinal. Il comprend des corps de sulfures semi-massifs en forme de cigare qui sont stratigraphiquement contrôlés, déformés et recristallisés, et qui sont situés à la base de l'unité de marbre hôte. Cette unité de marbre a pu être étirée (boudinée) par la déformation pendant le plissement. Il contient aussi des veines déformées à sulfure-quartz qui recoupent les plans lithologiques et les sulfures semi-massifs, et qui se sont développées pendant le plissement. L'or est principalement natif ou associé avec le Bi, et est observé avec chalcocite, arsénopyrite, sphalérite et des sulfures à Bi qui forment des inclusions dans le grenat. Une partie de l'or a été remobilisé par des pegmatites liées à une activité intrusive tardive.

12.2 Dépôts d'or situé dans des unités sédimentaires (autres que formations de fer) : résumé

Les dépôts décrits dans cette section tendent à être stratigraphiquement contrôlés, et sont principalement observés dans des charnières de plis comme leurs équivalents de bas grade (Large et al., 2011), et comme les dépôts situés dans des formations de fer (voir section précédente). Contrairement aux dépôts situés dans des formations de fer, les veines de quartz recoupant la stratigraphie ne sont pas observées dans les méta-wacke (dépôt de *Roberto*), puisque ces roches sont plus ductiles que les formations de fer. De tels systèmes de veines sont cependant décrits dans les séquences dominées par le marbre du dépôt de *Navachab*. Pour ces dépôts, la remobilisation mécanique semble dominer. Du travail supplémentaire est nécessaire pour évaluer l'effet d'autres processus, comme la circulation de fluides à H-S par exemple.

Tableau 7 : Résumé des caractéristiques principales des dépôts d'or situés dans des roches sédimentaires (autres que formations de fer).

Nom	Métamorphisme	Principale roche hôte (1)	Minéralisation	Morphologie	Références principales
Roberto	Faciès des amphibolites (Ravenelle 2013)	Wacke (séquence turbiditique)	Lo-Apy-Po, grains d'or	Sulfures disséminés, veines de Qz	Ravenelle (2013)
Natacha	kbar (Steven 1994)	Roche sédimentaire carbonatée, intrudée par lamprophyre, aplites et pegmatites	scheelite-uranite (sulfures), Py-maldonite-Apy-Bi-Au (veines)	veines de Qz	Kisters (2005), Dziggel et al. (2009a, b), Vollgger et al. (2015)

(1) Le préfix « méta- » est omis.

13 HAUT GRADE ET OR AU QUÉBEC

Les dépôts d'or orogéniques métamorphisés à haut grade pourraient être associés spatialement à des migmatites et à des minéraux calciques (diopside, etc.), vestiges des halos d'altération qui accompagnent habituellement les dépôts de bas grade (carbonatation). Dans cette section, ces deux éléments sont identifiés en carte pour la Province de Supérieur du Québec, grâce aux données du SIGEOM. Les cartes de cette section comprennent aussi les indices et minéralisations en or connu dans la région, ainsi que les minéraux arsénopyrite, loellingite, et Au natif identifiés en affleurements.

Les observations suivantes peuvent être faites :

1) mis à part les indices d'Au de la fosse du Labrador, les indices d'Au sont situés à proximité (ou en périphérie à la Baie-James) des polygones de la cartes du SIGEOM pour lesquels des migmatites sont signalées (**Figures 4, 7**);

2) mis à part les indices d'Au de la Fosse du Labrador, les indices d'Au sont systématiquement situés à proximité d'affleurements pour lesquels des migmatites ont été observées (**Figure 5**);

3) à la Baie-James, les indices d'Au sont spatialement corrélés aux affleurements pour lesquels carbonate - calcite sont reportés, et ± corrélés aux affleurements contenant diopside, wollastonite et/ou grossulaire (**Figures 6, 7**). Dans le reste de la Province de Supérieur, ces relations spatiales sont moins claires (**Figure 6**).

En conclusion, les **migmatites** et les **minéraux-Ca** pourraient constituer des éléments utiles à l'exploration régionale pour les gisements d'or orogénique.

Un autre élément important correspond aux **ceintures de roches vertes**, bien que des gisements comme le dépôt de *Tropicana* montrent que l'or peut être observé en dehors de telles ceintures (ou que le métamorphisme rend les empilements volcaniques méconnaissables ; Crawford et Doyle, 2016), donc l'exploration doit être conduite dans et en dehors des ceintures de roches vertes connues.

Les **zones de failles d'échelle crustale** sont aussi importantes, à condition de prendre en considération celles qui ont été actives avant les épisodes de métamorphisme de haut grade, et que le métamorphisme de haut grade pourrait rendre difficiles à identifier.

La présence de corps de sulfures massifs à semi-massifs peut aussi perturber le régime des contraintes locales, et provoquer le développement de structures particulières qui peuvent devenir des cibles d'exploration (p.ex. **plis irréguliers** dans une formation de fer, etc.).

Ces divers éléments sont difficiles à intégrer à une carte de favorabilité à l'échelle du Québec, mais ils peuvent servir à des échelles de prospection plus locales.

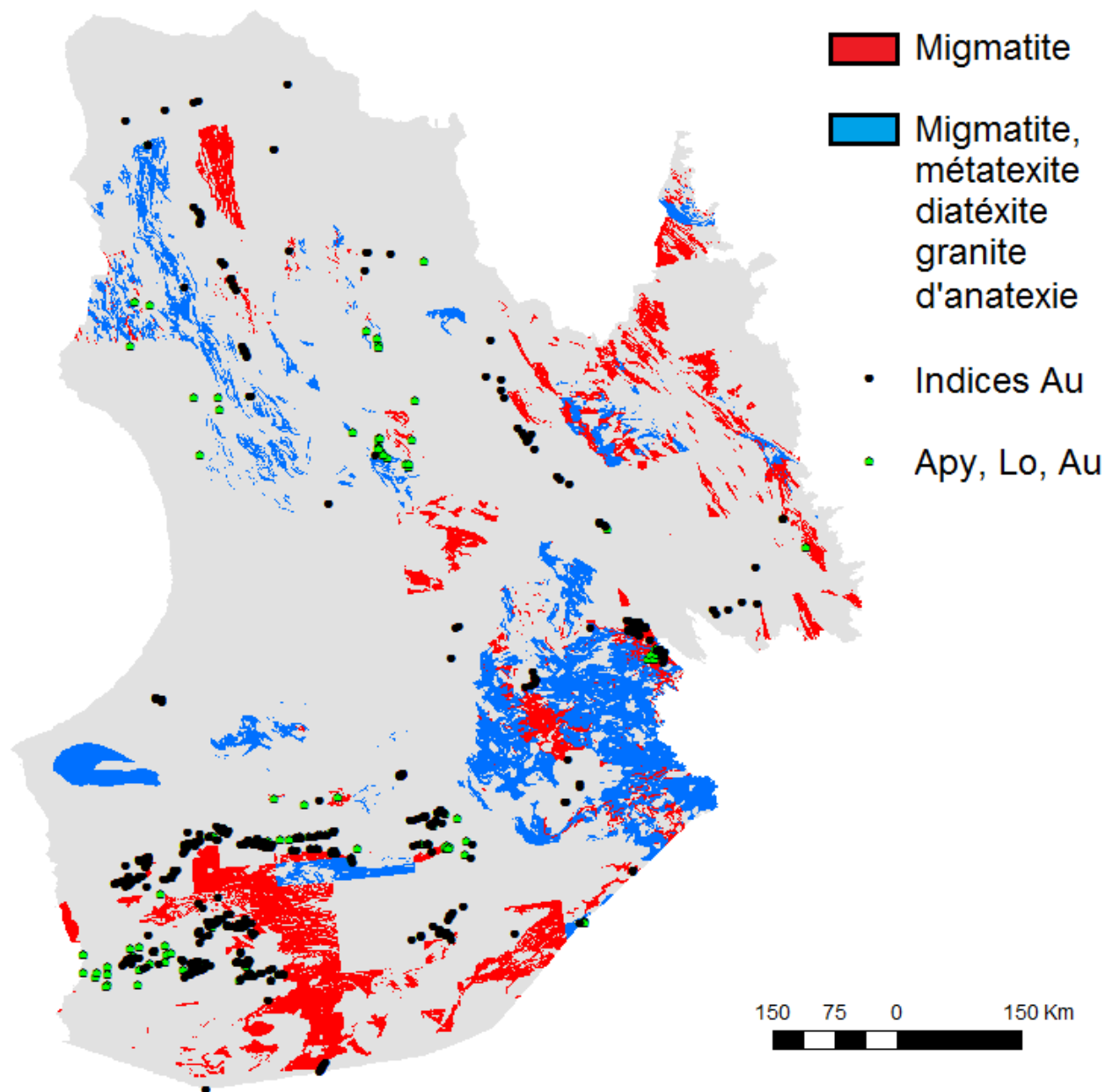


Figure 4 : Carte de la partie nord du Québec, d'après les données du SIGEOM 2015, montrant : a) migmatites et autres (polygones de la carte pour lesquelles les codes M22, M20, M21 ou M21A sont mentionnés) ; b) indices Au (extraits de « corps minéralisés.shp » et « gisements métalliques.shp ») ; c) Arsénopyrite, loellingite, Au (extraits de « affleurements de compilation et de géofiches », pour lesquels les codes LG, AS et/ou AU sont mentionnés).

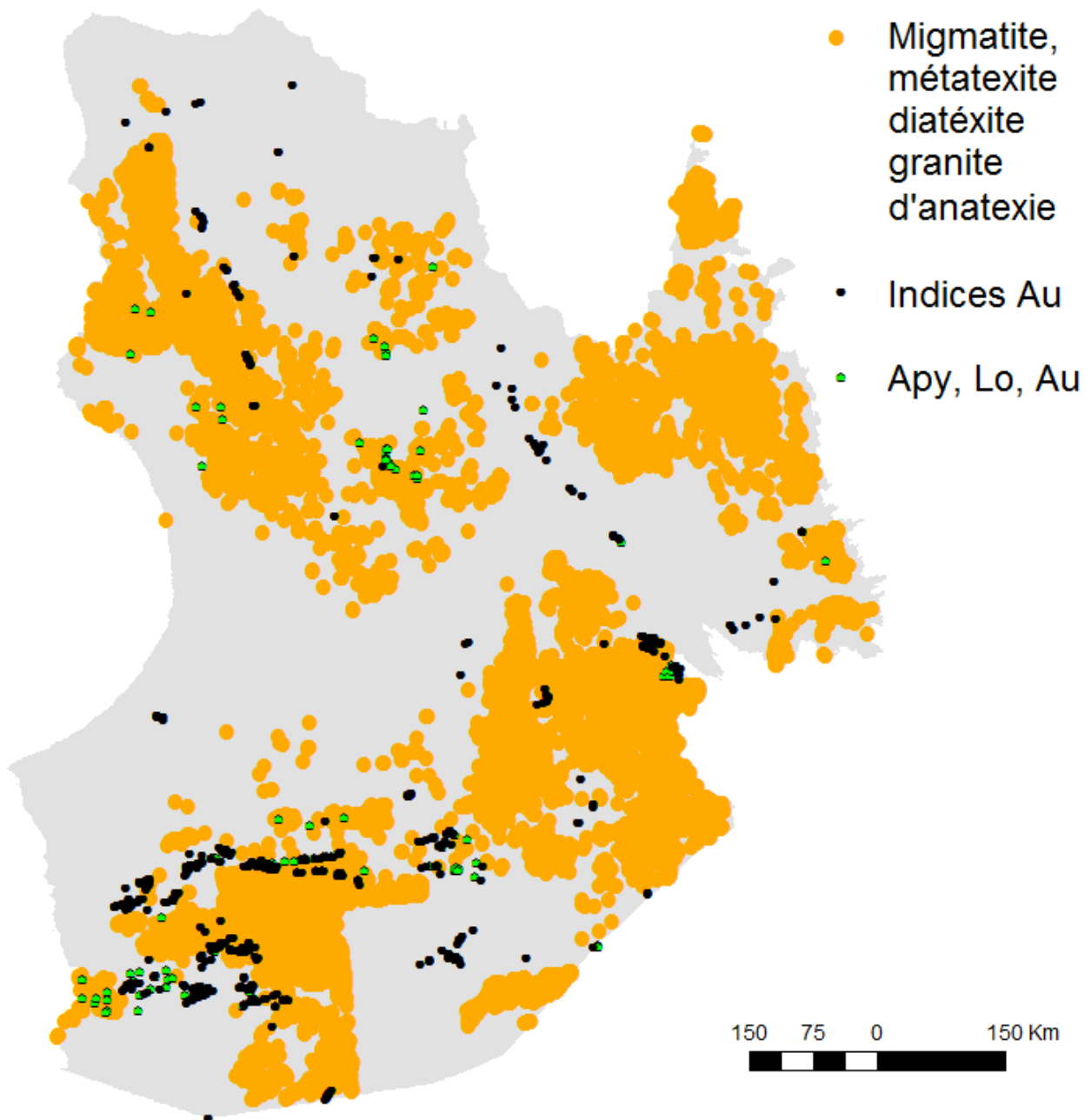


Figure 5 : Carte de la partie nord du Québec, d'après les données du SIGEOM 2015, montrant : a) migmatites et autres (extraits de « affleurements de compilation et de géofiches » pour lesquelles les codes M22, M20, M21 ou M21A sont mentionnés) ; b) indices Au (extraits de « corps minéralisés.shp » et « gisements métalliques.shp ») ; c) Arsénopyrite, loellingite, Au (extraits de « affleurements de compilation et de géofiches » pour lesquels les codes LG, AS et/ou AU sont mentionnés).

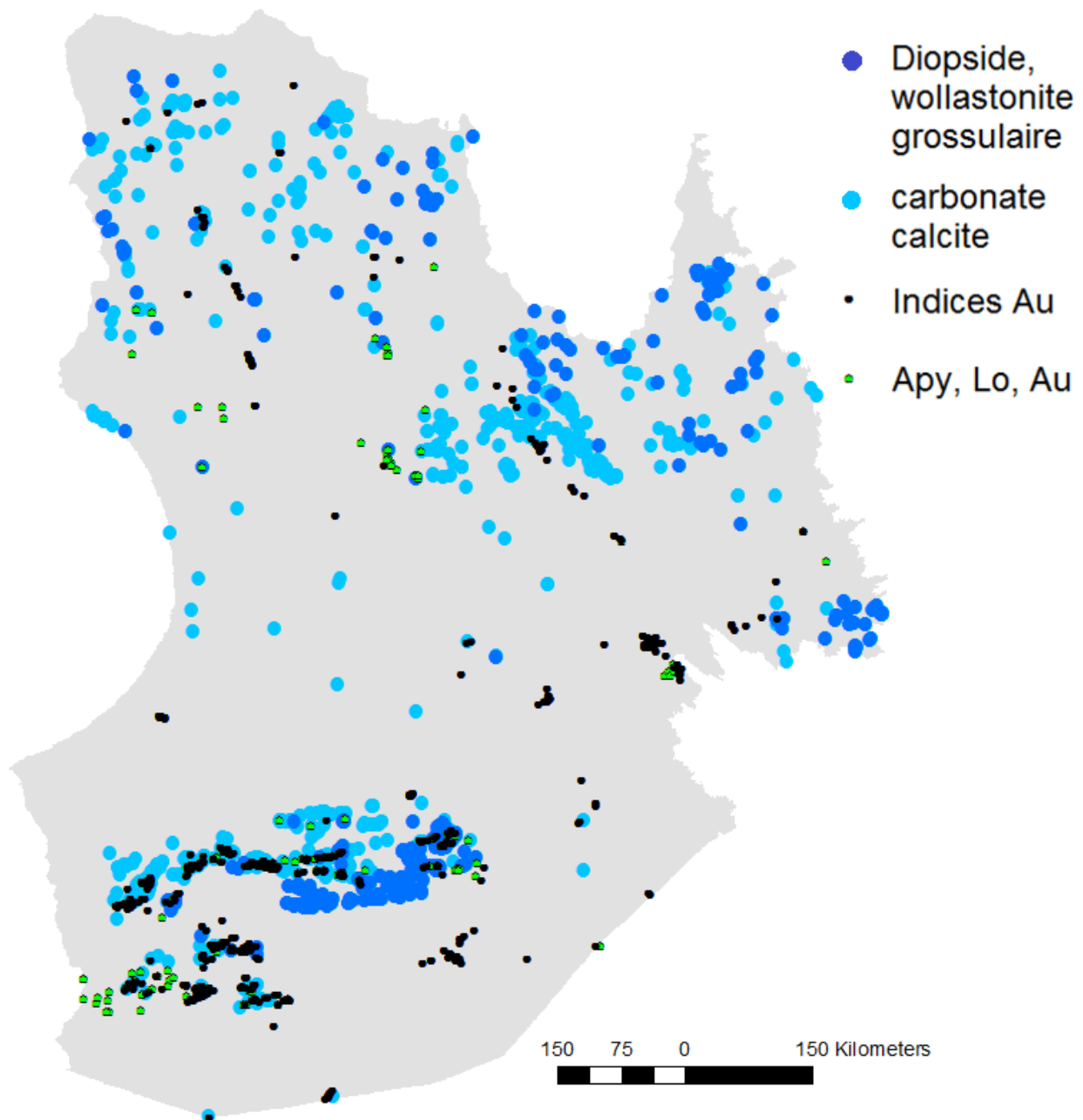


Figure 6 : Carte de la partie nord du Québec, d'après les données du SIGEOM 2015, montrant : a) diopside et autres (extraits de « affleurements de compilation et de géofiches » pour lesquelles les codes DP, WL, GG, CB, et/ou CC sont mentionnés) ; b) indices Au (extraits de « corps minéralisés.shp » et « gisements métalliques.shp ») ; c) Arsénopyrite, loellingite, Au (extraits de « affleurements de compilation et de géofiches » pour lesquels les codes LG, AS et/ou AU sont mentionnés).

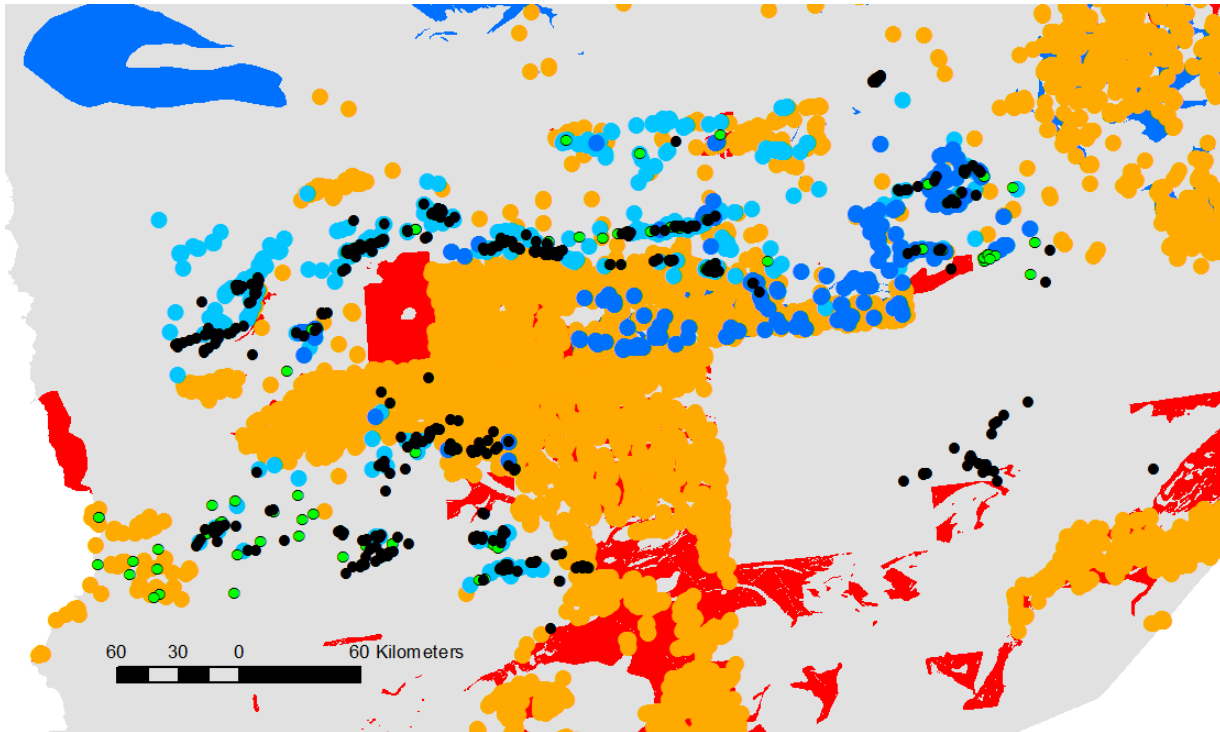


Figure 7 : Carte de la Baie James, d'après les données du SIGEOM 2015. La légende et la source des données sont identiques à celles des **Figures 4, 5, et 6**.

14 DISCUSSION

14.1 Processus métamorphiques

De nombreux processus pouvant avoir un impact sur la redistribution de l'or et la morphologie générale des dépôts sont présents dans les terrains de haut grade. Ces processus sont : 1) mobilisation à l'état solide ; 2) recristallisation ; 3) circulation des fluides à H-S ; 4) fusion des sulfures ; 5) anatexie ; et 6) métamorphisme rétrograde.

La mobilisation mécanique est probablement le processus qui modifie le plus les dépôts compilés ici. De tels processus à l'état solide peuvent déplacer les sulfures sur des distances plus grandes que les silicates, puisque les sulfures sont plus ductiles. Les divers processus par lesquels les sulfures peuvent être mobilisés mécaniquement, et les structures en découlant, sont bien décrits par Marshall et Gilligan, (1993) et Marshall et al., (2000).

La mobilisation mécanique déplace les sulfures accumulés comme un seul corps, et les déplace vers le site en dilatation le plus proche. Ainsi, les corps de sulfures massifs comme ceux des lentilles de SMV peuvent être déplacés sur des dizaines de mètres, alors que les sulfures isolés seront déplacés à l'échelle centimétrique. Aussi, les unités lithologiques auront tendance à se plisser autour de leurs zones de faiblesses, et les sulfures massifs sont des zones de faiblesse par rapport aux silicates environnants. Ainsi, les charnières des plis auront tendance à se former autour des lentilles de SMV, où la mobilisation mécanique déplacera les sulfures, et épaissira et étirera la lentille de long de l'axe du pli (p.ex. *Montauban, Great Victoria*). Aussi, la mobilisation mécanique a tendance à déplacer les sulfures comme un seul corps, et n'a pas tendance à réorganiser l'or ou les autres métaux de base à l'intérieur de ces lentilles. Ce processus modifie la forme générale du dépôt, mais a peu de chances de modifier les teneurs locales en or.

Ce qui est important pour l'exploration est que les sulfures se concentrent dans les zones les plus fortement déformées et que le plissement aura tendance à être plus intense et plus complexe dans les parties minéralisées des unités lithologiques. Des anomalies locales dans le plissement peuvent devenir des cibles d'exploration pour les corps de sulfures massifs à semi-massifs situés dans des roches compétentes (p.ex. SMV, et dépôts situés dans des formations de fer).

Pour les dépôts d'or orogéniques disséminés, la déformation correspond généralement à la continuation des mouvements le long de la zone de faille qui contient la minéralisation. De telles déformations peuvent plisser ou étirer (boudinage) les veines de quartz mais ne pourront pas efficacement collecter les sulfures disséminés. Dans les cas extrêmes, les zones de cisaillement peuvent fortement modifier la zone de faille, et la transformer en mylonite (p.ex. dépôt de *Renco*).

La recristallisation déplace l'or sur des distances insignifiantes. Par contre, elle peut augmenter la taille des sulfures qui contiennent l'or, et augmenter l'effet pépite (formation de grains d'or) et modifier l'assemblage de sulfures. Ces processus sont principalement importants pour l'estimation des ressources et les études métallurgiques. Aussi, les silicates du pic peuvent incorporer de l'or qui aurait été libéré par, par exemple, la désulfuration ; ce qui peut rendre la récupération de l'or plus difficile. Ce dernier effet, cependant, semble ne concerner qu'une faible proportion de l'or.

Les fluides produits par dévolatilisation et qui circulent pendant le métamorphisme prograde, d'un autre côté, ont le potentiel de fortement réorganiser les teneurs en or. La désulfuration et la déshydratation, en particulier, peuvent former des fluides à H-S capable de collecter l'or et de le déplacer dans et à l'extérieur des corps de sulfures massifs (p.ex. *Hongtoushan* et *Montauban*), ou de réorganiser l'or dans des veines de quartz nouvellement formées (p.ex. *Aquilon* et, peut-être, les dépôts situés dans des formations de fer). La présence de tels fluides peut aussi faciliter la déformation (Marshall et al., 2000).

Alternativement, de tels fluides ont le potentiel de détruire les dépôts mais, comme il a été dit par Phillips et De Nooy, (1988), les dépôts économiques métamorphisés existent, donc il doit exister des processus permettant de les préserver de la circulation des fluides issus de la dévolatilisation. Par exemple, les halos d'altération sont des zones de faiblesse (voir richesses en eau) qui peuvent concentrer les déformations, et ainsi faire dévier les fluides autour du dépôt, comme il a été proposé pour *Montauban* (Bernier et McLean 1993). Aussi, l'anatexie, en retirant efficacement l'eau sans retirer l'or (l'or ne partitionne que très peu dans les magmas felsiques), peut protéger les dépôts de la dévolatilisation, comme il a été proposé pour *Big Bell* (Tilling et al. 1978, Kwong and Crocket 1978).

La périphérie des dépôts est cependant souvent (toujours ?) modifiée par la désulfuration, qui peut modifier la chimie des silicates lorsque S interagit avec le Fe des silicates pour former des sulfures et des silicates enrichis en Mg (p.ex. *Big Bell*, *Montauban*) (Phillips et De Nooy 1988, Tomkins, 2007). De tels processus doivent être gardés en mémoire lorsque des calculs de bilans de masse sont effectués pour délimiter les halos d'altération. Un autre processus de dévolatilisation, c.-à-d. la décarbonatation, ne déplacera pas l'or mais détruira la partie la plus étendue et visible des halos d'altération qui entourent les gisements d'or orogénique, privant les géologues d'exploration d'un indicateur important. Les divers processus de dévolatilisation sont surtout observés au faciès des amphibolites et cessent lorsque des conditions de plus haut grade sont atteintes.

La fusion partielle des sulfures commence au faciès moyen des amphibolites, mais n'est vraiment importante qu'à plus haut grade (Tomkins, 2007). Ce processus a été le sujet d'études récentes (p.ex. Mavrogenes et al., 2001, Frost et al., 2002, Tomkins et al., 2006, 2007). Un liquide sulfuré est capable de très efficacement collecter l'or et d'autres éléments (Cu, Pb, Ag, As, Sb, etc.) d'une zone minéralisée (Frost et al., 2002) et, puisque les liquides sulfurés ont quasiment la même viscosité que l'eau (Dobson et al., 2000), ils ont le potentiel de déplacer l'or sur de grandes distances et de le collecter dans les zones en dilatation où la cristallisation fractionnée peut permettre de mieux concentrer l'or (Tomkins et al., 2004).

Cependant, dans la plupart des cas, le degré de fusion partielle des sulfures est faible (Stevens et al., 2005), ce qui peut améliorer les grades d'or locaux (Marshall et al., 2000) mais ne modifiera pas fortement les teneurs en or globales. Cependant, si seul un faible volume de fondu est produit, ou si les sulfures sont isolés (minéralisation disséminée), chaque gouttelette de liquide sulfuré migrera vers la zone en dilatation la plus proche et aura peu de chances d'être collectée pour former un fondu capable de migrer sur de grandes distances (p.e.x. *dépôt de Hemlo*; Tomkins et al., 2004). Dans les corps de sulfures massifs, les minéraux fusibles (c.-à-d. les sulfures autres que Py et Po; Tomkins et al., 2007) peuvent aussi être isolés à l'intérieur d'une matrice à Po-Py, et des degrés de fusion partielle élevés de ces assemblages seront nécessaires pour former des fondus capables de migrer. De plus, des régimes de contraintes particuliers peuvent aussi être nécessaires pour déplacer et concentrer ces fondus denses. La fusion partielle des sulfures semble donc souvent avoir une influence mineure sur la redistribution de l'or.

La fusion partielle des silicates, ou anatexie, commence au faciès des amphibolites, comme en témoignent les migmatites reportées pour une partie des dépôts compilés ici. Cependant, ce processus est seulement important au faciès des granulites. L'anatexie joue un rôle important à *Challenger*, et a probablement permis de grandement améliorer les teneurs en or à cet endroit. Cependant, *Challenger* est un cas extrême, puisqu'il est situé dans des roches fusibles (pélites) et a été métamorphisé à très haut grade. Pour d'autres dépôts, l'anatexie sera localisée dans les zones d'altération enrichies en K-H où la plupart des leucosomes sont observés. Notez que l'or ne partitionne que très peu dans les magmas felsiques. Ainsi, les magmas silicatés ne transporteront que très peu d'or, sauf s'ils transportent des liquides sulfurés (riches en or), comme c'est le cas à *Challenger* (Tomkins et Mavrogenes, 2002). Pour l'exploration, une surabondance locale de migmatites peut mériter une attention particulière.

Aussi, pour la plupart des dépôts compilés, l'activité magmatique syn- à post-minéralisation (p.ex. dépôt de *Roberto*) est mise en évidence par la présence de nombreuses pegmatites qui peuvent recouper la minéralisation. Ces pegmatites peuvent avoir un effet de dilution sur la minéralisation, et peuvent incorporer de faibles quantités d'or, mais leur potentiel de fortement modifier les teneurs en or est limité.

Le métamorphisme rétrograde est un autre processus qui peut modifier les teneurs en or. La rétrogression ne déplacera que très peu l'or, puisque la solubilité de l'or dans des fluides de basse température dominés par H est très faible (Tomkins, 2007). Cependant, cela peut entraîner une mauvaise interprétation des dépôts pré-pic, et peut former des minéraux hydratés qui ressemblent aux minéraux des halos d'altération mais qui ne seront pas spatialement corrélés à l'or. Ainsi, afin de déterminer si les minéraux hydratés peuvent être utilisés pour cibler les dépôts, il est important de déterminer, au préalable, si ces dépôts ont été métamorphisés ou s'il s'agit de dépôts post-pic.

Les mécanismes listés ci-dessus peuvent avoir des effets positifs, négatifs ou nuls sur les teneurs en or, selon les contextes. Tout processus qui peut diminuer le volume occupé par des métaux économiques, c.-à-d. diminuer le tonnage et augmenter les teneurs, est un effet positif.

Par exemple, le régime de contraintes, et les déformations résultantes peuvent avoir un effet positif en formant des colonnes minéralisées ore shoots (p.ex. le dépôt de *Challenger*; Tomkins et Mavrogenes, 2002) ou en collectant les métaux dans des zones restreintes comme les charnières de plis (p.ex. dépôt de *Montauban*), mais peut aussi avoir un effet négatif si il étire les sulfures et distribue les métaux sur de vastes étendues (p.ex. dépôt de *Aquilon*; Lapointe, 2006). Pour les fluides et fondus capables de transporter l'or, le problème est le même : de tels médias peuvent transporter l'or et le concentrer dans des zones restreintes, ayant ainsi un effet positif, ou peuvent disperser l'or sur de grandes étendues (p.ex. veines de Qz à *Aquilon*). Ainsi, où des fluides syn-métamorphisme ont circulé ou là où des fondus ont été identifiés, il est important de se questionner sur le régime de contraintes au pic du métamorphisme, afin de localiser les zones en dilatation où les métaux ont pu être collectés. Cependant, un tel exercice ne peut être fait que si les dépôts pré-pic sont reconnus comme tels.

Pour les SMV est les autres dépôts formés dans des conditions de sub-surface, reconnaître leurs natures pré-pic n'est jamais un problème ; le problème est cependant présent pour les dépôts d'or orogénique et autres minéralisations formées en profondeur non étudiées ici. Pour illustrer l'importance d'utiliser le bon modèle dans un contexte d'exploration, considérons un dépôt pré-pic hypothétique situé dans un terrain de haut grade. Si ce dépôt est exploré avec un modèle de type post-pic, alors les erreurs suivantes pourraient être commises :

- 1) Les déformations ductiles seront considérées précoces, pré-minéralisation, et leurs rôles dans la modification de la forme du dépôt ne sera pas considérés. La relation entre la distribution de l'or et les structures peut être mal comprise s'il n'est pas reconnu que l'or a pu être redistribué aux nez des boudins ou vers les zones en dilatation (p.ex. macrolithons du dépôt de *Renco*).
- 2) La circulation post-minéralisation de fluides à H-S, qui peut former davantage de veines enrichies en or ou dépourvues d'or, ne sera pas considérée, et les essaïms de veines pourront être mal interprétés. Cependant, identifier les générations successives des veines, les essaïms qui transportent l'or et ceux qui en sont dépourvus, et comprendre les relations de recoupement sont essentiel pour l'exploration.
- 3) La fusion des sulfures ne sera pas considérée. Ce processus, ainsi que la recristallisation, formera des teneurs en or localement très élevées (augmentation de l'effet pépité). L'effet pépité est souvent un problème pour les dépôts d'or, puisqu'il rend difficile la modélisation de la teneur globale d'une zone. Ce problème est particulièrement important tôt dans le processus d'exploration, lorsque très peu d'échantillons sont disponibles. Ainsi, ne pas prendre en considération les processus qui peuvent augmenter l'effet pépité peut conduire à des estimations précoces erronées du potentiel d'une zone (p.ex. dépôt *Aquilon*, où l'effet pépité était si prononcé que la zone semblait avoir un potentiel économique ; Lapointe 2006).
- 4) L'anatexie sera regardée comme étant pré-minéralisation et son potentiel de dilution (voir leucosomes qui recoupent le dépôt) ne sera pas pris en considération. De plus, la présence d'un fondu perturbe le régime de contraintes et forme des structures qui pourront être mal comprises. Aussi, l'abondance locale de migmatites ne sera pas considérée comme un indicateur de la présence possible de zones enrichies en K-H appartenant à un halo d'altération proximale.

- 5) Les minéraux hydratés seront considérés comme appartenant au halo d'altération, et seront utilisés comme vecteurs vers la minéralisation. Cependant, si ces minéraux ont été formés pendant la rétrogression, ils ne seront pas spatialement corrélés à l'or. Aussi, la position du vrai halo d'altération sera mal interprétée. D'autres processus, comme la désulfuration ou l'anatexie, ne seront pas considérés comme des éléments importants et la mauvaise interprétation de tous ces processus pourrait conduire à mal interpréter les résultats des calculs de bilans de masse, qui correspondent au principal outil utilisé pour documenter les halos d'altération.

Il est donc crucial d'utiliser le bon modèle d'exploration, en particulier pour les dépôts de type or orogénique.

15 CONCLUSIONS

Dans ce rapport, les principaux processus métamorphiques pouvant avoir modifié la forme des dépôts d'or, et ayant une influence sur les teneurs et tonnages, ont été listés. Plusieurs dépôts, identifiés comme des gîtes d'or pré-pic ou qui n'ont pas été reconnus comme tels mais qui ont le potentiel d'être pré-pic, ont été utilisés comme exemples. Les principaux processus en jeu pendant le métamorphisme sont : 1) la mobilisation mécanique ; 2) la circulation des fluides ; 3) la circulation des fondus à Si et S ; et 4) la rétrogression.

Pour l'exploration, il est important de distinguer les dépôts d'or orogéniques pré-pic de ceux qui sont post-pic, alors qu'une déposition syn-pic dans des conditions de température $>600^{\circ}\text{C}$ ne devrait pas être considérée comme une option d'après les avancées récentes en thermodynamique et autres disciplines (voir Phillips et Powell, 2009). En effet, l'utilisation du mauvais modèle peut conduire à prendre des décisions erronées pendant l'exploration, et à la mauvaise estimation du potentiel d'une zone tôt dans le processus d'exploration.

Des tentatives ont aussi été faites pour estimer si le métamorphisme a eu un effet positif, neutre ou négatif sur la valeur économique des dépôts compilés. Ceci, cependant, est un exercice difficile étant donné la connaissance actuelle de ces dépôts. Aussi, beaucoup de travail reste à faire pour quantifier la redistribution de l'or induite par les processus métamorphiques listés ici. La quantification est, dans l'état actuel des choses, impossible, et l'importance relative des divers processus ne peut donc pas être estimée.

16 REFERENCES

- Adams, G. J., et al. (2007). « The Granites gold deposits, Northern Territory, Australia: evidence for an early syn-tectonic ore genesis. » *Mineralium Deposita* 42(1-2): 89-105.
- Ahmat, A. (1986). « Metamorphic patterns in the greenstone belts of the Southern Cross Province, Western Australia. » *Geological Survey of Western Australia Professional Paper* 19: 1-21.
- Aucoin, M., et al. (2012). « Metallogeny of the Marco zone, Corvet Est, disseminated gold deposit, James Bay, Quebec, Canada. » *Canadian Journal of Earth Sciences* 49(10): 1154-1176.
- Barnicoat, A. C., et al. (1991). "Synmetamorphic lode-gold deposits in high-grade Archean settings." *Geology* 19(9): 921-924.
- Bernier, L. et W. MacLean (1993). « Lithogeochemistry of a metamorphosed SMV alteration zone at Montauban, Grenville Province, Quebec. » *Exploration and Mining Geology* 2(4): 367-386.
- Bernier, L. R., et al. (1987). « Geology and metamorphism of the Montauban north gold zone; a metamorphosed polymetallic exhalative deposit, Grenville Province, Quebec. » *Economic Geology* 82(8): 2076-2090.
- Biczok, J., et al. (2012). « Geochronology of the North Caribou greenstone belt, Superior Province Canada: Implications for tectonic history and gold mineralization at the Musselwhite mine. » *Precambrian Research* 192: 209-230.
- Blenkinsop, T. G. et M. G. Doyle (2014). "Structural controls on gold mineralization on the margin of the Yilgarn craton, Albany–Fraser orogen: The Tropicana deposit, Western Australia." *Journal of Structural Geology* 67: 189-204.
- Blenkinsop, T. G. et R. Frei (1996). "Archean and Proterozoic mineralization and tectonics at the Renco Mine (northern marginal zone, Limpopo Belt, Zimbabwe)." *Economic Geology* 91(7): 1225-1238.
- Blenkinsop, T. G., et al. (2004). "Single stage, late Archaean exhumation of granulites in the Northern Marginal Zone, Limpopo Belt, Zimbabwe, and relevance to gold mineralization at Renco mine." *South African Journal of Geology* 107(3): 377-396.
- Burk, R., et al. (1986). The geological setting of the Teck-Corona Au-Mo-Ba deposit, Hemlo, Ontario, Canada. *Proceedings of Gold*.
- Cameron, E. M. et K. Hattori (1985). "The Hemlo gold deposit, Ontario: A geochemical and isotopic study." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 49(10): 2041-2050.
- Corfu, F. et T. Muir (1989). "The Hemlo-Heron Bay greenstone belt and Hemlo Au-Mo deposit, Superior Province, Ontario, Canada 2. Timing of metamorphism, alteration and Au mineralization from titanite, rutile, and monazite U-Pb geochronology." *Chemical Geology: Isotope Geoscience section* 79(3) : 201-223.
- Côté, C. (1989). Distribution de l'or à la mine Montauban / Gold distribution at the Montauban Mine, Université du Québec à Chicoutimi Chicoutimi. MSc: 116.
- Couture, J. et J. Guha (1990). "Relative timing of emplacement of an Archean lode-gold deposit in an amphibolite terrane: the Eastmain River deposit, northern Quebec." *Canadian Journal of Earth Sciences* 27(12): 1621-1636.

- Crawford A.J. et Doyle M.A. (2016) "Granulite-Hosted Gold: Tectonic Setting and Lithogeochemistry of the Tropicana Deposit, Western Australia." *Economic Geology* 111: 395-420.
- Dalstra, H., et al. (1997). "Diapirism synchronous with regional deformation and gold mineralisation, a new concept for granitoid emplacement in the Southern Cross Province, Western Australia." *Geologie en Mijnbouw* 76(4) : 321-338.
- Davis, D. W. et S. Lin (2003). « Unraveling the geologic history of the Hemlo Archean gold deposit, Superior Province, Canada: A U-Pb geochronological study. » *Economic Geology* 98(1): 51-67.
- Desbiens, H. (1998). Géologie de la propriété Aquilon, Rivière La forge (LA-1), Baie-James, Québec (331/1-2) : 40.
- Doyle, M., et al. (2007). « Discovery and characteristics of the Tropicana gold district. » *Geoscience Australia Record* 14: 186-190.
- Dziggel, A., et al. (2000). "Metamorphism in the granite-greenstone terrane south of the Barberton greenstone belt: An insight into its tectonothermal evolution." *Journal of African Earth Sciences* 31(1): 19-19.
- Dziggel, A., et al. (2009). "Processes of high-T fluid–rock interaction during gold mineralization in carbonate-bearing metasediments: the Navachab gold deposit, Namibia." *Mineralium Deposita* 44(6): 665-687.
- Dziggel, A., et al. (2009). "Significance of oscillatory and bell-shaped growth zoning in hydrothermal garnet: Evidence from the Navachab gold deposit, Namibia." *Chemical Geology* 262(3): 262-276.
- Fan, H.-R., et al. (2000). « Contrasting fluid types at the Nevoria gold deposit in the Southern Cross greenstone belt, western Australia: Implications of auriferous fluids depositing ores within an Archean banded iron-formation. » *Economic Geology* 95(7): 1527-1536.
- Ford, R. C. et N. A. Duke (1993). "Concentration of gold during retrograde metamorphism of Archean banded iron formations, Slave Province, Canada." *Canadian Journal of Earth Sciences* 30(8): 1566-1581.
- Frost, B. R., et al. (2002). « Partial melting of sulfide ore deposits during medium-and high-grade metamorphism. » *The Canadian Mineralogist* 40(1): 1-18.
- Galley, A. G., et al. (2007). "Volcanogenic massive sulphide deposits." *Mineral deposits of Canada: a synthesis of major deposit-types, district Metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 5: 141-161.*
- Gauthier, M., et al. (1997). *Cadre géologique, style et répartition des minéralisations métalliques de la basse et de la moyenne-Eastmain, Territoire de la Baie James* : 85.
- Gazley, M., et al. (2011). « P–T evolution in greenstone- belt mafic amphibolites: an example from Plutonic Gold Mine, Marymia Inlier, Western Australia. » *Journal of Metamorphic Geology* 29(6): 685-697.
- Gazley, M. F. (2011). *Metamorphism, geochronology and stratigraphy of an amphibolite-faciès greenstone-hosted gold deposit: Plutonic Gold Mine, Marymia Inlier, Western Australia, Victoria University of Wellington. Ph.D.* : 176.
- Gazley, M. F., et al. (2014). "Objective geological logging using portable XRF geochemical multi-element data at Plutonic Gold Mine, Marymia Inlier, Western Australia." *Journal of Geochemical Exploration* 143: 74-83.

Goldfarb, R. J., et al. (2005). "Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes." *Economic Geology* 100th anniversary volume 40: 407-450.

Goldfarb, R. J. et D. I. Groves (2015). "Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time." *Lithos* 233 : 2-26.

Goodfellow, W. et J. Lydon (2007). *Sedimentary exhalative (SEDEX) deposits. Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods*, Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication: 163-183.

Gourcerol, B., et al. (2015). « Distinguishing primary and mineralization-related signatures of chert from the banded iron-formation–hosted gold deposits at Musselwhite, Ontario and Meadowbank, Nunavut. »

Groves, D. (1993). "The crustal continuum model for late-Archaeon lode-gold deposits of the Yilgarn Block, Western Australia." *Mineralium Deposita* 28(6): 366-374.

Groves, D., et al. (1992). "Sub-greenschist to granulite-hosted Archaean lode-gold deposits of the Yilgarn Craton: a depositional continuum from deep-sourced hydrothermal fluids in crustal-scale plumbing systems." *Geology Department (Key Centre) and University Extension, The University of Western Australia Publication* 22: 325-337.

Gu, L., et al. (2007). « Copper, gold and silver enrichment in ore mylonites within massive sulphide orebodies at Hongtoushan VHMS deposit, NE China. » *Ore Geology Reviews* 30(1): 1-29.

Hickman, A. (1990). *Geology of the Pilbara craton*. 3 rd International Archaean Symposium, Perth.

Ho, S. E., et al. (1985). « Fluid inclusions as indicators of the nature and source of ore fluids and ore depositional conditions for Archaean gold deposits of the Yilgarn Block, Western Australia. » *South African Journal of Geology* 88(1): 149-158.

Hocq, M. (1994). *La province du Supérieur. Géologie du Québec. Q. Les Publications du Québec* : 7-20.

Huston, D. L., et al. (2007). "Lode–gold mineralization in the Tanami region, northern Australia." *Mineralium Deposita* 42(1-2): 175-204.

Jourdain, V. (1993). *Geologie des amas sulfures auriferes de la Province de Grenville, Université du Québec à Chicoutimi Chicoutimi. Ph.D.* : 165.

Jung, S. et K. Mezger (2003). "Petrology of basement-dominated terranes: I. Regional metamorphic T–t path from U–Pb monazite and Sm–Nd garnet geochronology (Central Damara orogen, Namibia)." *Chemical Geology* 198(3): 223-247.

Kisters, A. F. (2005). "Controls of gold-quartz vein formation during regional folding in amphibolite-faciès, marble-dominated metasediments of the Navachab Gold Mine in the Pan-African Damara Belt, Namibia." *South African Journal of Geology* 108(3): 365-380.

Kisters, A. F., et al. (1998). "Gold mineralization in high-grade metamorphic shear zones of the Renco Mine, southern Zimbabwe." *Economic Geology* 93(5): 587-601.

Kolb, J., et al. (2015). "Hypozonal lode gold deposits: A genetic concept based on a review of the New Consort, Renco, Hutti, Hira Buddini, Navachab, Nevoria and The Granites deposits." *Precambrian Research* 262: 20-44.

Kolb, J., et al. (2000). "The origin of fluids and nature of fluid–rock interaction in mid-crustal auriferous mylonites of the Renco mine, southern Zimbabwe." *Mineralium Deposita* 35(2-3): 109-125.

Kuhns, R. (1986). Alteration styles and trace element dispersion associated with the Golden Giant deposit, Hemlo, Ontario, Canada. *Proceedings of Gold*.

Kwong, Y. et J. Crocket (1978). "Background and anomalous gold in rocks of an Archean greenstone assemblage, Kakagi Lake area, northwestern Ontario." *Economic Geology* 73(1): 50-63.

Lapointe, I. (2006). Caractérisation du système aurifère filonien d'Aquilon-Baie James, Québec, Université du Québec à Chicoutimi Chicoutimi. MSc : 245.

Large, R. et R. Both (1980). "The volcanogenic sulfide ores at Mount Chalmers, eastern Queensland." *Economic Geology* 75(7): 992-1009.

Large, R. R., et al. (2011). « A carbonaceous sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits. » *Economic Geology* 106(3) : 331-358.

Legault, M. I. (2003). Environnement métallogénique du couloir de Fancamp avec emphase sur les gisements aurifères de Chevrier, région de Chibougamau, Québec, Université du Québec à Chicoutimi. Ph.D. : 361.

Marshall, B. et L. Gilligan (1993). "Remobilization, syn-tectonic processes and massive sulphide deposits." *Ore Geology Reviews* 8(1): 39-64.

Marshall, B., et al. (2000). Regional metamorphic remobilization: upgrading and formation of ore deposits. *Metamorphosed and metamorphogenic ore deposits*. P. Spry, B. Marshall and F. Vokes, *Review Economic Geology* 16: 19-38.

Mavrogenes, J., et al. (2001). "Partial melting of the Broken Hill galena-sphalerite ore: Experimental studies in the system PbS-FeS-ZnS-(Ag₂S)." *Economic Geology* 96(1): 205-210.

Manque référence Mavrogenes 2002

McNicoll, V., et al. (2015). "The world-class Musselwhite BIF-hosted gold deposit, Superior Province, Canada: new high-precision U-Pb geochronology and implications for the geological setting of the deposit and gold exploration." *Precambrian Research*.

McQueen, K. (1992). "The Great Victoria gold deposit, Marvel Loch, Western Australia: retrograde gold mobilization in a metamorphosed sulphidic iron-formation." *The Archaean: Terrains, Processes and Metallogeny*, Geology Department and University Extension, University of Western Australia, Publication 22: 365-380.

Mueller, A. G. (1988). « Archaean gold-silver deposits with prominent calc-silicate alteration in the Southern Cross Greenstone Belt, Western Australia: analogues of Phanerozoic skarn deposits. » *Advances in Understanding Precambrian Gold Deposits* 2: 141-163.

Mueller, A. G. (1997). « The Nevia gold skarn deposit in Archean iron-formation, Southern Cross greenstone belt, Western Australia; I, Tectonic setting, petrography, and classification. » *Economic Geology* 92(2): 181-209.

Mueller, A. G., et al. (1996). « Constraints on the age of granitoid emplacement, metamorphism, gold mineralization, and subsequent cooling of the Archean greenstone terrane at Big Bell, Western Australia. » *Economic Geology* 91(5): 896-915.

Mueller, A. G., et al. (1991). « The Savage Lode magnesian skarn in the Marvel Loch gold-silver mine, Southern Cross greenstone belt, Western Australia. Part 2 : Pressure-temperature estimates and constraints on fluid sources. » *Canadian Journal of Earth Sciences* 28(5): 686-705.

- Mueller, A. G., et al. (2004). « The Nevoia gold skarn deposit, Southern Cross greenstone belt, Western Australia: II. Pressure-temperature-time path and relationship to postorogenic granites. » *Economic Geology* 99(3): 453-478.
- Muir, T. (2002). "The Hemlo gold deposit, Ontario, Canada: principal deposit characteristics and constraints on mineralization." *Ore Geology Reviews* 21(1): 1-66.
- Myers, J. S. (1995). "The generation and assembly of an Archaean supercontinent: evidence from the Yilgarn craton, Western Australia." *Geological Society, London, Special Publications* 95(1): 143-154.
- Neumary, P., et al. (1993). "Syn-amphibolite faciès archaean lode gold mineralisation in the Mt. York District, Pilbara Block, Western Australia." *Mineralium Deposita* 28(6): 457-468.
- Neumayr, P., et al. (1998). "Timing of gold mineralization in the Mt York district, Pilgangoora greenstone belt, and implications for the tectonic and metamorphic evolution of an area linking the western and eastern Pilbara Craton." *Precambrian Research* 88(1): 249-265.
- Nörtemann, M. F.-J., et al. (2000). "Mineralogy of the Navachab skarn deposit, Namibia: an unusual Au-bearing skarn in high-grade metamorphic rocks." *Commun Geol Surv Namib* 12 : 149-156.
- Oswald, W., et al. (2015). « New insights on the geological and structural settings of the Musselwhite banded iron-formation–hosted gold deposit, North Caribou greenstone belt, Superior Province, Ontario. »
- Otto, A. (2002). Ore forming processes in the BIF-hosted gold deposit Musselwhite Mine, Ontario, Canada. Freiberg Institute of Mining and Technology, Freiberg, Germany. MSc: 86.
- Otto, A., et al. (2007). "The New Consort Gold Mine, Barberton greenstone belt, South Africa: orogenic gold mineralization in a condensed metamorphic profile." *Mineralium Deposita* 42(7): 715-735.
- Pan, Y. et M. E. Fleet (1992). "Calc-silicate alteration in the Hemlo gold deposit, Ontario; mineral assemblages, PTX constraints, and significance. " *Economic Geology* 87(4): 1104-1120.
- Pan, Y. et M. E. Fleet (1995). "The late Archean Hemlo gold deposit, Ontario, Canada: a review and synthesis." *Ore Geology Reviews* 9(6): 455-488.
- Phillips, G. (1985). « Interpretation of Big Bell/Hemlo-type gold deposits; precursors, metamorphism, melting and genetic constraints. » *South African Journal of Geology* 88(1): 159-173.
- Phillips, G., et al. (1984). « An epigenetic origin for Archean banded iron-formation-hosted gold deposits. » *Economic Geology* 79(1): 162-171.
- Phillips, G. et D. D. Nooy (1988). "High- grade metamorphic processes which influence Archaean gold deposits, with particular reference to Big Bell, Australia." *Journal of Metamorphic Geology* 6(1): 95-114.
- Phillips, G. et R. Powell (2010). "Formation of gold deposits: a metamorphic devolatilization model." *Journal of Metamorphic Geology* 28(6): 689-718.
- Phillips, G. N. et R. Powell (2009). "Formation of gold deposits: Review and evaluation of the continuum model." *Earth-Science Reviews* 94(1): 1-21.
- Phillips, G. N. et R. Powell (2015). « A practical classification of gold deposits, with a theoretical basis. » *Ore Geology Reviews* 65: 568-573.

Prabhu, M. et G. Webber (1984). "Origin of quartzofeldspathic gneisses at Montauban-les-Mines, Quebec." *Canadian Journal of Earth Sciences* 21(3): 336-345.

Prabhu, M. K. (1981). *Geology, geochemistry and genesis of Montauban Pb-Zn deposits*, McGill University, Montréal. Ph.D. : 435.

Quirion, D. (2000). *Rapport sur les travaux de décapage, de cartographie et de forage réalisés pendant l'année 2000 sur la propriété Aquilon, Laforge-1, Baie-James* : 38.

Ravenelle, J.-F. (2013). *Amphibolite faciès gold mineralization: an exemple from the Roberto deposit, Eleonore property, James Bay, Quebec*, Université du Québec. Ph.D. : 325.

Ridley, J. (1992). "On the origins and tectonic significance of the charnockite suite of the Archaean Limpopo Belt, Northern Marginal Zone, Zimbabwe." *Precambrian Research* 55(1): 407-427.

Ridley, J. R. et L. W. Diamond (2000). *Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models*. *Gold in.*

Rivers, T., et al. (1989). « New tectonic divisions of the Grenville Province, southeast Canadian Shield. » *Tectonics* 8(1): 63-84.

Ronde, C. E. et M. J. Wit (1994). "Tectonic history of the Barberton greenstone belt, South Africa: 490 million years of Archean crustal evolution." *Tectonics* 13(4): 983-1005.

Sangster, A. (1967). *Metamorphism of the New Calumet sulphide deposit, Québec*, Carleton University. MSc: 100.

Santosh, M. et F. Pirajno (2015). « The Jiaodong-type gold deposits: Introduction. » *Ore Geology Reviews* 65(3): 565-567.

Schnieders, B., et al. (2000). *Report of activities, 1999*. O. G. Survey : 51.

Scrimgeour, I. et M. Sandiford (1993). "Early Proterozoic metamorphism at The Granites gold mine, Northern Territory; implications for the timing of fluid production in high-temperature, low-pressure terranes." *Economic Geology* 88(5): 1099-1113.

Sengör, A., et al. (1993). « Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. » *Nature* 364 : 299-307.

Stefan, L. D. (1997). *The Doornhoek gold deposit in the Limpopo Belt, South Africa: an example of an Archaean shear zone hosted deposit formed at high-grade metamorphic conditions*, Rand Afrikaans University. Ph.D. : 459.

Manque référence Stevens and van Reenen 1992

Stevens, G., et al. (2005). « Partial melting of the assemblage sphalerite+ galena+ pyrrhotite+ chalcopyrite+ sulfur: implications for high-grade metamorphosed massive sulfide deposits. » *Economic Geology* 100(4): 781-786.

Tabeart, C. (1988). *Structural and geochemical setting of gold mineralisation at Renco Mine, Zimbabwe*, Imperial College London (University of London). Ph.D. : 300p.

Teasdale, J. (1997). « Methods for understanding poorly exposed terranes: the interpretive geology and tectonothermal evolution of the western Gawler Craton. »

Thurston, P. (1991). *Archean geology of Ontario: Introduction*. *Geology of Ontario*. O. G. Survey. Special Volume 4, part 1: 73-78.

Tilling, R. I., et al. (1973). "Gold abundance in igneous rocks; bearing on gold mineralization." *Economic Geology* 68(2): 168-186.

- Tomkins, A. G. (2007). « Three mechanisms of ore re-mobilisation during amphibolite facies metamorphism at the Montauban Zn–Pb–Au–Ag deposit. » *Mineralium Deposita* 42(6): 627-637.
- Tomkins, A. G., et al. (2006). « Arsenopyrite melting during metamorphism of sulfide ore deposits. » *The Canadian Mineralogist* 44(5): 1045-1062.
- Tomkins, A. G. et C. Grundy (2009). "Upper temperature limits of orogenic gold deposit formation: constraints from the granulite-hosted Griffin's Find deposit, Yilgarn Craton." *Economic Geology* 104(5): 669-685.
- Tomkins, A. G. et J. A. Mavrogenes (2001). "Redistribution of gold within arsenopyrite and löllingite during pro-and retrograde metamorphism: application to timing of mineralization." *Economic Geology* 96(3): 525-534.
- Tomkins, A. G. et J. A. Mavrogenes (2002). "Mobilization of gold as a polymetallic melt during pelite anatexis at the Challenger deposit, South Australia: a metamorphosed Archean gold deposit." *Economic Geology* 97(6): 1249-1271.
- Tomkins, A. G., et al. (2007). « On the initiation of metamorphic sulfide anatexis. » *Journal of Petrology* 48(3): 511-535.
- Tomkins, A. G., et al. (2004). « The Hemlo gold deposit, Ontario: An example of melting and mobilization of a precious metal-sulfosalt assemblage during amphibolite facies metamorphism and deformation. » *Economic Geology* 99(6): 1063-1084.
- Manque reference Tomkins et al., 2004b ?
- Tomkinson, M. et A. Lombard (1990). Structure, metamorphism, and mineralization in the New Consort Gold Mines, Barberton greenstone belt, South Africa. Third International Archean Symposium, Perth.
- Valenta, R. and V. Wall (1996). "Controls on gold mineralisation at The Granites, Tanami Desert, Northern Territory." *Geol Soc Aust Abs* 41: 451.
- Vanderberg, L. C., et al. (2001). Structural geology of the Tanami Region, Northern Territory Geological Survey.
- Vielreicher, N. M., et al. (2002). "Marymia: an Archean, amphibolite facies-hosted, orogenic lode-gold deposit overprinted by Palaeoproterozoic orogenesis and base metal mineralisation, Western Australia." *Mineralium Deposita* 37(8): 737-764.
- Vollgger, S. A., et al. (2015). "Regional dome evolution and its control on ore-grade distribution: Insights from 3D implicit modelling of the Navachab gold deposit, Namibia." *Ore Geology Reviews* 69: 268-284.
- Wang, L., et al. (1993). "An overview of the relationship between granitoid intrusions and gold mineralisation in the Archaean Murchison Province, Western Australia." *Mineralium Deposita* 28(6): 482-494.
- Whitney, D. L. et B. W. Evans (2010). "Abbreviations for names of rock-forming minerals." *American mineralogist* 95(1): 185.
- Wilkins, C. (1993). "A post-deformational, post-peak metamorphic timing for mineralization at the Archaean Big Bell gold deposit, Western Australia." *Ore Geology Reviews* 7(6): 439-483.
- Williams, P. J. (1990). « Evidence for a late metamorphic origin of disseminated gold mineralization in Grenville gneisses at Calumet, Quebec. » *Economic Geology* 85(1): 164-171.
- Wulff, K., et al. (2010). "Origin of mineralizing fluids of the sediment-hosted Navachab Gold Mine, Namibia: Constraints from stable (O, H, C, S) isotopes." *Economic Geology* 105(2): 285-302.

Yang, Z. et H. Yu (1984). "Poly-deformation of the Archaen greenstone belt in the Hongtoushan area northern Liaoning Province " Journal of Jiling University (Earth Science Edition) 1: 001.

Yeats, C. J. et D. I. Groves (1998). "The Archaean Mount Gibson gold deposits, Yilgarn Craton, Western Australia: Products of combined synvolcanic and syntectonic alteration and mineralisation." Ore Geology Reviews 13(1): 103-129.

Zhang, Y., et al. (2014). « Ore textures and remobilization mechanisms of the Hongtoushan copper–zinc deposit, Liaoning, China. » Ore Geology Reviews 57: 78-86.