



**Commission géologique du Canada**  
**Présentation scientifique 87**

**Les systèmes minéralisateurs à oxydes de fer et altération à éléments alcalins ( $\pm$ calciques),  
et leurs gîtes IOA, IOCG, skarns,  $U\pm Au\pm Co$  (au sein d'albitites) et affiliés :  
une série de cours intensifs**

**Partie 2 :**

**Aperçu général des types de gîtes, distribution, âges, contextes, exemples,  
faciès d'altération et modèles métallogéniques**

**L. Corriveau, E.G. Potter, J.-F. Montreuil<sup>1,2</sup>, O. Blein<sup>3</sup>, K. Ehrig<sup>4</sup> et A.F. De Toni<sup>5,2</sup>**

<sup>1</sup>Red Pine Exploration, <sup>2</sup>Auparavant à INRS (Institut national de la Recherche scientifique); <sup>3</sup>BRGM; <sup>4</sup>BHP; <sup>5</sup>SOQUEM

**2018**

**Cette série de cours intensifs en français et en anglais est une mise à jour de cours donnés à l'échelle nationale et internationale au cours de la dernière décennie. Même si leurs titres sont semblables, les présentations en français et en anglais peuvent différer dans la facture et le livré.**

**Pour obtenir des renseignements sur les droits de reproduction, veuillez communiquer avec Ressources naturelles Canada à l'adresse [rncan.copyrightdroitdauteur.rncan@canada.ca](mailto:rncan.copyrightdroitdauteur.rncan@canada.ca).**

**Lien permanent : <https://doi.org/10.4095/308269>**

**On peut télécharger cette publication gratuitement à partir de GEOSCAN (<http://geoscan.rncan.gc.ca/>).**

**Notation bibliographique conseillée**

Corriveau, L., Potter, E.G., Montreuil, J.-F., Blein, O., Ehrig, K. et De Toni, A.F., 2018. Les systèmes minéralisateurs à oxydes de fer et altération à éléments alcalins ( $\pm$ calciques), et leurs gîtes IOA, IOCG, skarns,  $U\pm Au\pm Co$  (au sein d'albitites) et affiliés : une série de cours intensifs. Partie 2 : Aperçu général des types de gîtes, distribution, âges, contextes, exemples, faciès d'altération et modèles métallogéniques; Commission géologique du Canada, Présentation scientifique 87, 190 p. <https://doi.org/10.4095/308269>

*Les publications de cette série ne sont pas révisées; elles sont publiées telles que soumises par l'auteur.*



## Remerciements

Cette série de cours intensifs résume les recherches de la Commission géologique du Canada sur la géologie des systèmes minéralisateurs à altération à oxydes de fer et éléments alcalins-calciques et leurs gîtes polymétalliques. Ces recherches ont été menées au sein des programmes de l'Initiative géoscientifique ciblée et Géocartographie de l'Énergie et des Minéraux en collaboration avec des commissions géologiques territoriales et provinciales, le milieu académique et le secteur privé.

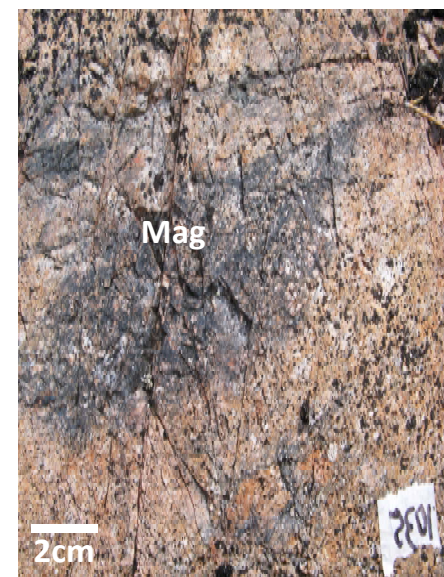
L'auteure remercie M. Alain Plouffe, Ph.D. pour une relecture à l'interne préalable à la publication de cette série.

Des remerciements additionnels se trouvent à la diapo 167.



# La série de cours intensifs

1. Introduction
2. **Aperçu général: Types de gîtes, distribution, âges, contextes, exemples, faciès d'altération et modèles métallogéniques**
3. La zone magmatique du Grand lac de l'Ours et autres districts canadiens
4. Faciès d'altération, métasomatisme prograde et formation de gîtes
5. Faciès Na à Na-Ca-Fe
6. Skarns, faciès Ca-Fe de haute température et gîtes IOA (oxydes de fer-apatite)
7. Faciès K-Fe de haute et basse température, gîtes IOCG (oxydes de fer cuivre-or), variantes à Co-Bi et à skarns, et gîte d'U et d'Au-Co-U au sein d'albitites
8. Relations magmatisme-tectonisme-métasomatisme et impact sur la progradation et les juxtaposition, surimposition, cyclicité et télescopage des faciès d'altération
9. Protocole de cartographie des zones d'altérations à oxydes de fer et éléments alcalins et calciques et terminologie
10. Systèmes métamorphisés à haut grade: Exemple du complexe de Bondy
11. Défis scientifiques et d'exploration, lacunes de connaissances, terrains d'intérêt, travaux en cours, etc.



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# Table des matières

**Systemes minéralisateurs à oxydes de fer et altération alcali-calciue**

**Types de gîtes: Classification et caractéristiques principales**

**Empreintes géologiques du métasomatisme: Faciès d'altération et associations métallifères**

**Évolution structurale des systèmes**

**Empreintes lithogéochimiques du métasomatisme: Outils et exemples**

**Évolution prograde et téléscopée des faciès d'altération et types de gîtes formés**

**Olympic Dam**

**État des connaissances et impacts**

**Références**



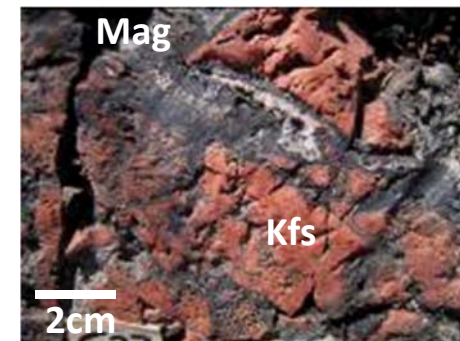
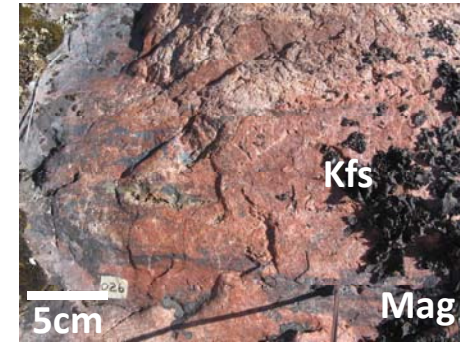
© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Résumé

La partie 2 de cette série de cours intensifs passe en revue les types de gîtes au sein des systèmes minéralisateurs à oxydes de fer et éléments alcalins et calciques, leur classification, leur répartition mondiale et celle des systèmes d'intérêt au Canada, leurs âges, leurs contextes de formation, leurs faciès d'altération et les modèles métallogéniques invoqués. Ces systèmes renferment des gîtes à oxydes de fer cuivre-or (IOCG) et leurs variantes riches en Co et Bi, des gîtes à oxydes de fer-apatite (IOA), y compris leurs variantes riches en terres rares, ainsi que certains gîtes à  $U \pm Co \pm Au$  et  $Au \pm Co \pm Cu$  encaissés dans des albitites, gîtes à Mo-Re et skarns polymétalliques. Un continuum avec des systèmes épithermaux est également commun.

Les références clés pour ce cours incluent Hitzman et al. (1992), Hitzman (2000), Marschik et Fontboté (2001), Williams et al. (2005, 2010), Oliver et al. (2004, 2006), Corriveau (2007), Corriveau et Mumin (2010), Corriveau et al. (2010a, b, 2016, 2017), Mumin et al. (2007, 2010), Porter (2010a, b), Rusk et al. (2010), Skirrow (2010), Williams (2010a, b), Montreuil et al. (2013, 2015, 2016a, b), Ehrig et al. (2012, 2017), Barton (2014), Zhao et al. (2017a, b).

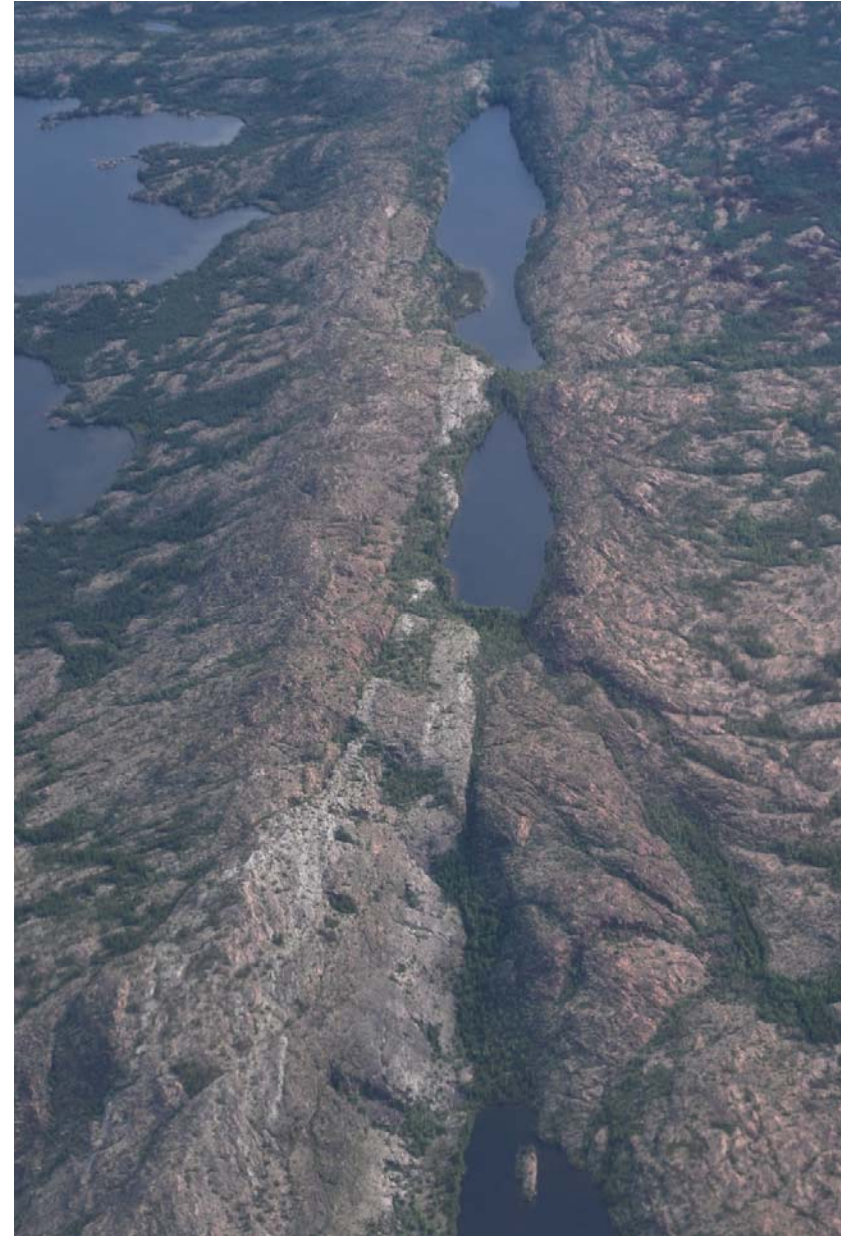




# Notes

**Au sein de ce cours intensif, les figures et photos déjà publiées et non modifiées sont voilées par une légende indiquant où en trouver la source. Ce choix éditorial vise à mieux intégrer les exemples au sein de ce cours avec les descriptions et discussions détaillées au sein des articles scientifiques cités.**

**Pour tout problème de copyright, svp communiquer avec Mme Louise Corriveau à [Louise.Corriveau@canada.ca](mailto:Louise.Corriveau@canada.ca)**



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# Acronymes et abréviations

**IOAA** – systèmes minéralisateurs à oxydes de fer et altération en éléments alcalins et calciques

**IOCG** – gîtes à oxydes de fer cuivre-or; **IOA** – gîtes à oxydes de fer  $\pm$  apatite

**Grp** – groupe; **HT** – haute température; **BT** – (plus) basse température

**ETR** – éléments des terres rares et Y; **EGP** – éléments du groupe du platine

**CGC** – Commission géologique du Canada

**NTGS** – Northwest Territories Geological Survey

**GEM** – Géocartographie de l'Énergie et des Minéraux

**IGC** – Initiative géoscientifique ciblée

**MLYRMB** – Ceinture métallogénique de la basse et moyenne rivière Yangtze

## Minéraux

**Ab**-albite, **Act**-actinote, **Amp**-amphibole, **Ap**-apatite, **Apy**-arsénopyrite,  
**Bn**-bornite, **Brt**-barytine, **Bt**-biotite, **Cb**-carbonate, **Cc**-calcite, **Ccp**-chalcopyrite,  
**Cct**-chalcocite, **Cof**-coffinite, **Cpx**-clinopyroxène, **Cum**-cummingtonite,  
**Ep**-épidote, **Fl**-fluorine, **Gn**-galène, **Grt**-grenat, **Hbl**-hornblende, **Hem**-hématite,  
**Kfs**-feldspath K, **Mag**-magnétite, **Mol**-molybdénite, **Pl**-plagioclase, **Py**-pyrite,  
**Rbk**-riébéckite, **Ru**-rutile, **Scp**-scapolite, **Sd**-sidérite, **Ser**-mica blanc (séricite),  
**Sp**-sphalérite, **Sil**-sillimanite, **Sul**-sulfures, **Ttn**-titanite (Whitney et Evans 2010)

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Systemes mineralisateurs à oxydes de fer et altération alcali-calcique



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



Ressources naturelles  
Canada

Natural Resources  
Canada

Canada



# Sujets d'études

**IOAA** – *Iron oxide and alkali-calcic alteration ore systems*: systèmes minéralisateurs à oxydes de fer et altération alcali-calcique, polymétalliques et issus de réactions fluides-roches en chaîne catalysées par un apport volumineux de fluides salins en milieu tectoniquement actif et sous gradient thermique élevé (250-800°C).

Ces systèmes mènent à une variété extraordinaire de gîtes hydrothermaux polymétalliques:

- **IOCG** – *Iron oxide copper-gold*: gîtes à oxydes de fer cuivre-or d'origine hydrothermale et ayant comme métaux économiques du cuivre avec ou sans or
- **IO±A** – *Iron oxide ± apatite*: gîtes à oxydes de fer ± apatite relativement pauvres en titane (magnétite ou hématite) avec ou sans amphibole; peuvent être minéralisés en ETR
- Uranium±Au±Co au sein d'albitites; certains skarns, mantos et gîtes à oxydes de fer reliés à des intrusions alcalines, certains épithermaux et veines polymétalliques, certains gîtes à Au±Co au sein d'albitites et dits orogéniques

Hitzman et al. 1992; Williams et al. 2005; Mumin et al. 2010; Porter 2010a, b; Skirrow 2010; Williams 2010a, b; Kreiner et Barton 2011; Wilde 2013; Corriveau et al. 2014, 2016, 2017; Somarin et Mumin 2014; Knipping et al. 2015; Montreuil et al. 2015; Rusk et al. 2015; Tornos et al. 2016, 2017

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# Gîtes et prospects discutés dans le cours



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

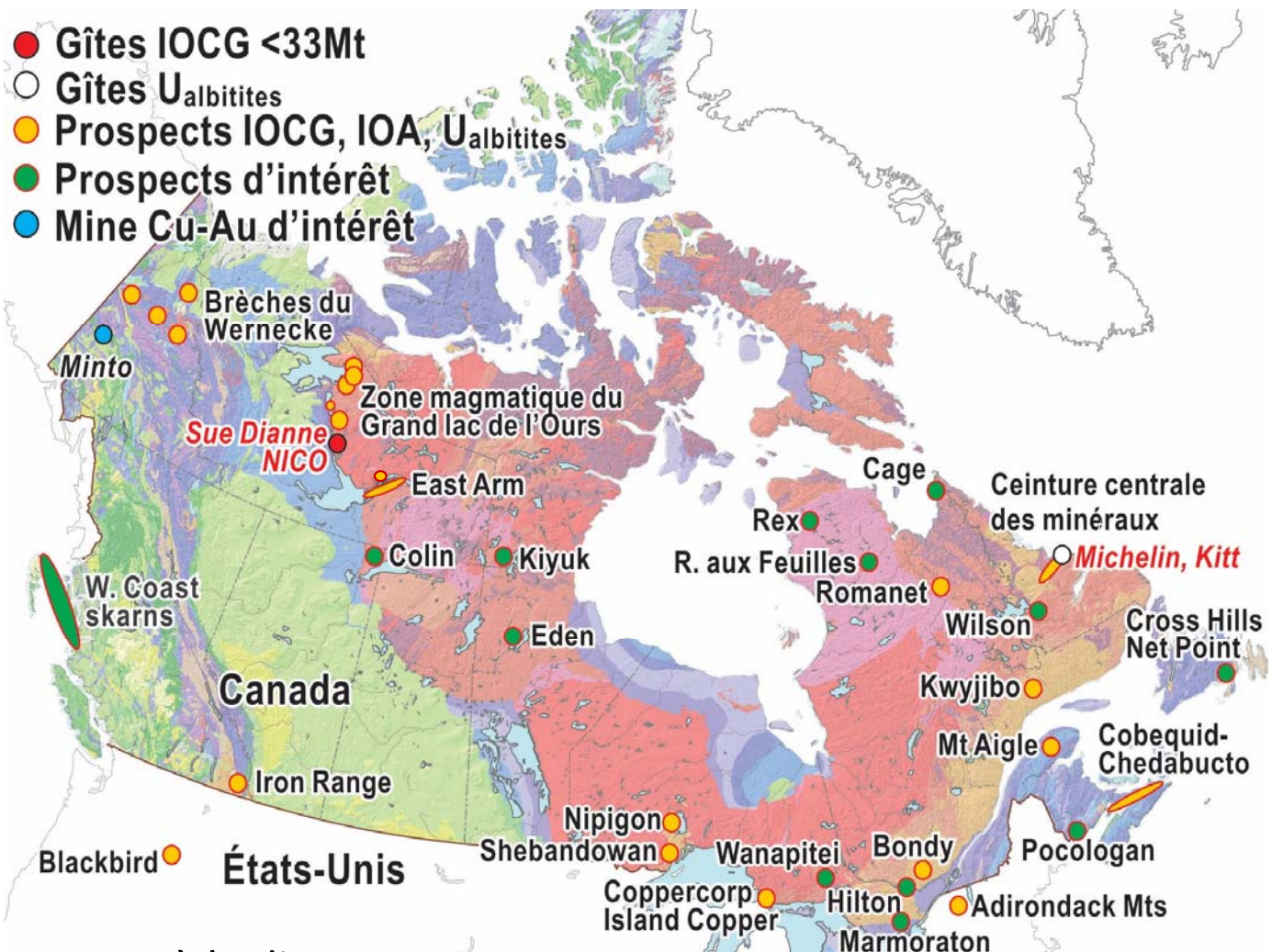
Sources bibliographiques à la diapo 55

Modifié de Corriveau 2007; Porter 2010a

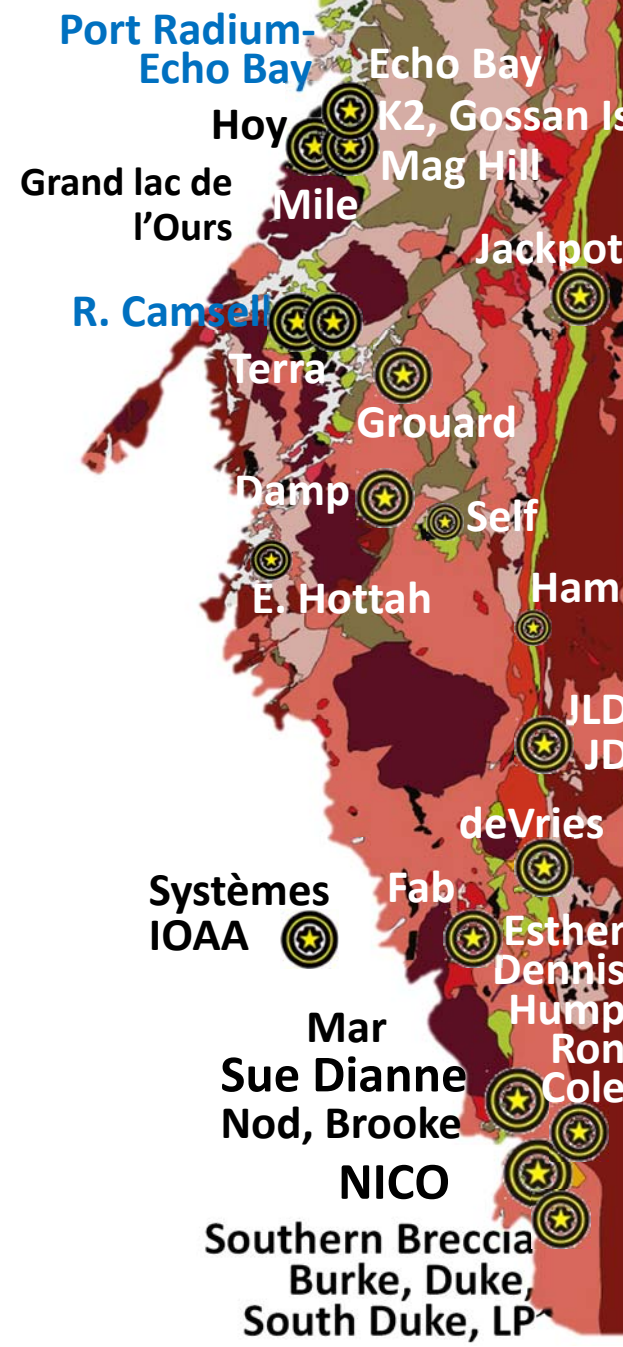


# Gîtes et prospects canadiens

- Gîtes IOCG <33Mt
- Gîtes U<sub>albitites</sub>
- Prospects IOCG, IOA, U<sub>albitites</sub>
- Prospects d'intérêt
- Mine Cu-Au d'intérêt



## Zone magmatique du Grand lac de l'Ours, Province de l'Ours



Sources à la diapo 55

Modifié de Corriveau 2007; Corriveau et al. 2010a, b, 2016

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

# Historique

- 1975: Découverte d'Olympic Dam – un défi aux modèles métallogéniques existants. Les ressources du gîte ne cessent d'augmenter passant de 2000 Mt à 10400 Mt
- Années 80-90: Découverte de Candelaria (Andes centrales, Chili), Ernest Henry (district de Cloncurry, Australie), Sue Dianne et NICO (Province de l'Ours, Canada)
- 1992: Hitzman et al. suggèrent l'existence d'un nouveau type de gîtes à oxydes de fer (Cu-U-Au-REE) en utilisant trois exemples principaux: Olympic Dam, la zone magmatique du Grand lac de l'Ours et le district de Norbotten (Suède)
- 2000, 2002, 2010: Publication des volumes 1 à 4 de "Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits" (Porter 2000, 2002, 2010a, b)
- 2005: Publication de la synthèse des gîtes IOCG et IOA dans le volume du 100<sup>e</sup> anniversaire d'Economic Geology (Williams et al. 2005)
- 2008+: discriminants chimiques (Benavides et al. 2008a, b; Montreuil et al. 2013)
- 2010: Publication du volume " Exploring for iron oxide copper-gold deposits: Canada and global analogues" (Corriveau et Mumin 2010, > 660 exemplaires vendus) et des classifications empiriques des IOA, IOCG et des gîtes affiliés de Williams (2010a, b)
- 2016: Volume 111 d'Economic Geology (SE du Missouri et Province de l'Ours)

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# Ressources au sein des gîtes IOAA

Incluent de nombreux métaux requis par la société d'aujourd'hui et de demain

- Fer et métaux usuels (Cu, Ni, Pb, Zn) et précieux (Ag, Au, éléments du groupe du platine)
- Terres rares, autres métaux spécialisés et critiques (Bi, Co, Mo, V, F, Nb)
- Actinides (U, Th)
- Matériaux industriels (magnétite, vermiculite, apatite, fluorine, albite)
- Concentrations anormales de presque tous les éléments du tableau périodique
- Sources de chaleur pour la géothermie

Valeurs atteignant des dizaines, des centaines voire plus de mille milliards CAD\$  
Olympic Dam (Australie):

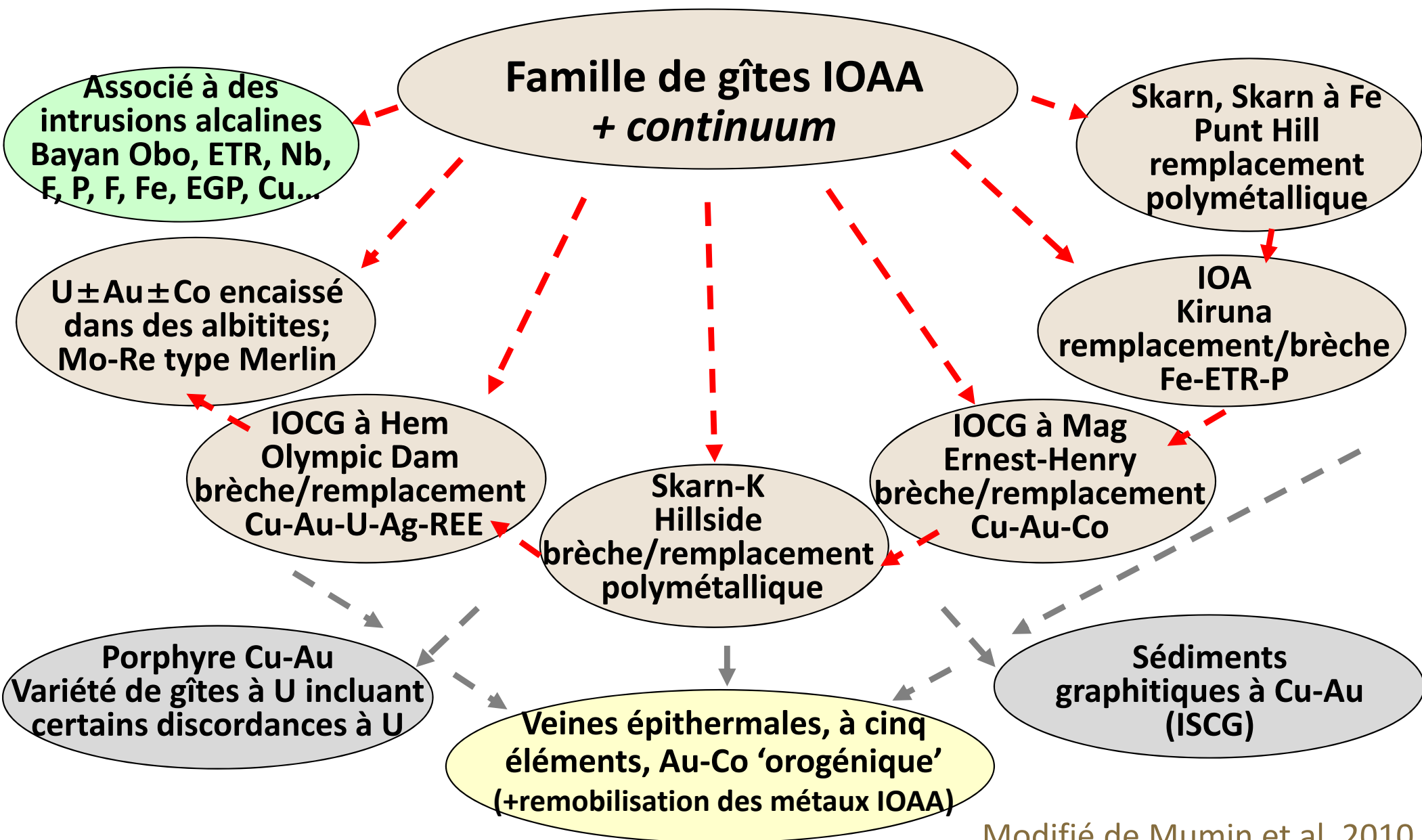
- **700** milliard CAD\$ Cu (ordre de magnitude en 2017)
- **185** milliard CAD\$ U (ordre de magnitude en 2017)
- **160** milliard CAD\$ Au (ordre de magnitude en 2017)
- **7** milliard CAD\$ Ag (ordre de magnitude en 2017)



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Types de gîtes IOAA et leurs continuums



Modifié de Mumin et al. 2010

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



Ressources naturelles  
Canada

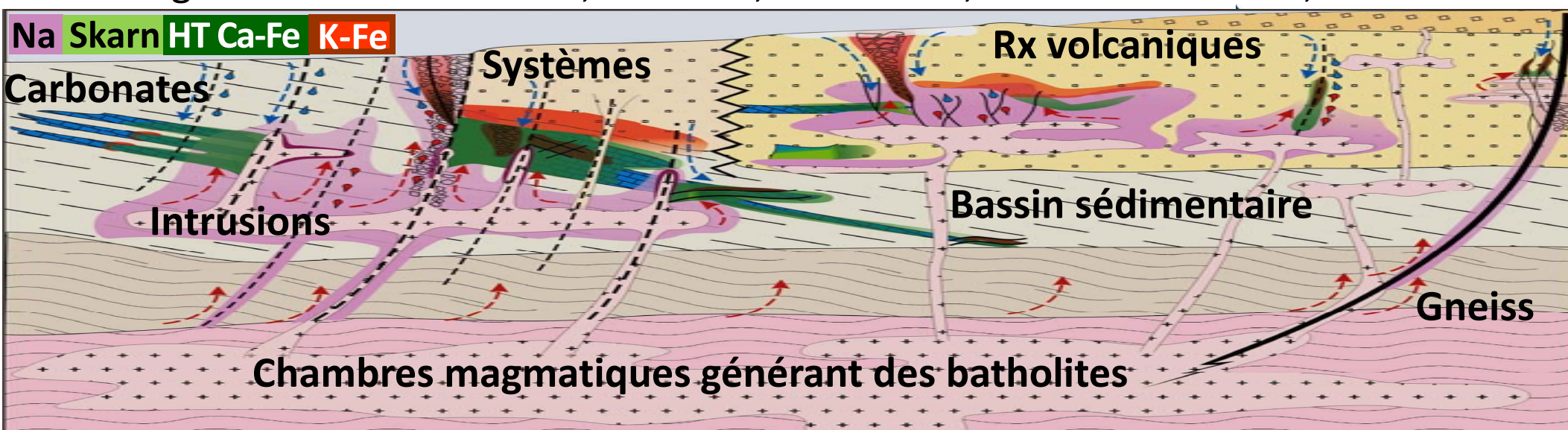
Natural Resources  
Canada

Voir aussi Hitzman 2000; Corriveau et al. 2016; Porter 2010a; Day et al. 2016; Tornos et al. 2016; Zhao et al. 2017a

Canada

# Systemes à oxydes de fer et altération alkali-calcique

- Réactions métasomatiques séquentielles initiées par des fluides hypersalins à travers la croûte supérieure sous gradients géothermiques élevés
- En milieu tectoniquement actif au sein d'une lithosphère produisant des magmas mafiques ou alcalins contemporains ou subséquents aux systèmes minéralisés
- Métasomatisme Na, Ca-Fe de HT, K-Fe de HT à BT, Ca-Mg-Fe de Bt sur  $\leq 35 \times 15 \times 10$  km
- Gîtes IO $\pm$ A ( $\pm$  ETR; magnétite domine); IOCG (+ variantes à Au-Co-Bi et skarns K)
- U ( $\pm$  Au-Co) et Au-U ( $\pm$  Co) 'orogénique' au sein d'albitites; certains skarns et skarns à Fe, mantos, Mo-Re, oxydes de fer liés à des intrusions alcalines et épithermaux
- En marge de cratons archéens, intra-arc, arrière-arc, bassin d'inversion, rifts



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



Ressources naturelles  
Canada

Natural Resources  
Canada

Hitzman et al. 1992; Williams et al. 2005; Corriveau et al. 2010a, b, 2014, 2016; Groves et al. 2010; Mumin et al. 2010; Porter 2010a,b; Skirrow 2010; Williams 2010a,b; Kreiner et Barton 2011; Wilde 2013; Barton 2014; Acosta-Góngora et al. 2015a, b, 2018; Montreuil et al. 2015; Rusk et al. 2015; Tornos et al. 2016

Canada



# Types de gîtes

- Définition, caractéristiques principales
- Classification et continuum
- Répartition mondiale
- Âges



Ernest-Henry  
District de Cloncurry  
Australie

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018







# Gîtes IOCG



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# IOCG

Minéralisation hydrothermale épigénétique  
(brèches, veines, remplacements)

Parmi >15-20% d'oxydes de fer (magnétite, hématite; Ti dans oxydes moindres que dans les gîtes ignés à Fe-Ti-P)

Avec des ressources en cuivre  $\pm$  or

Contrôles structuraux locaux et lithosphériques

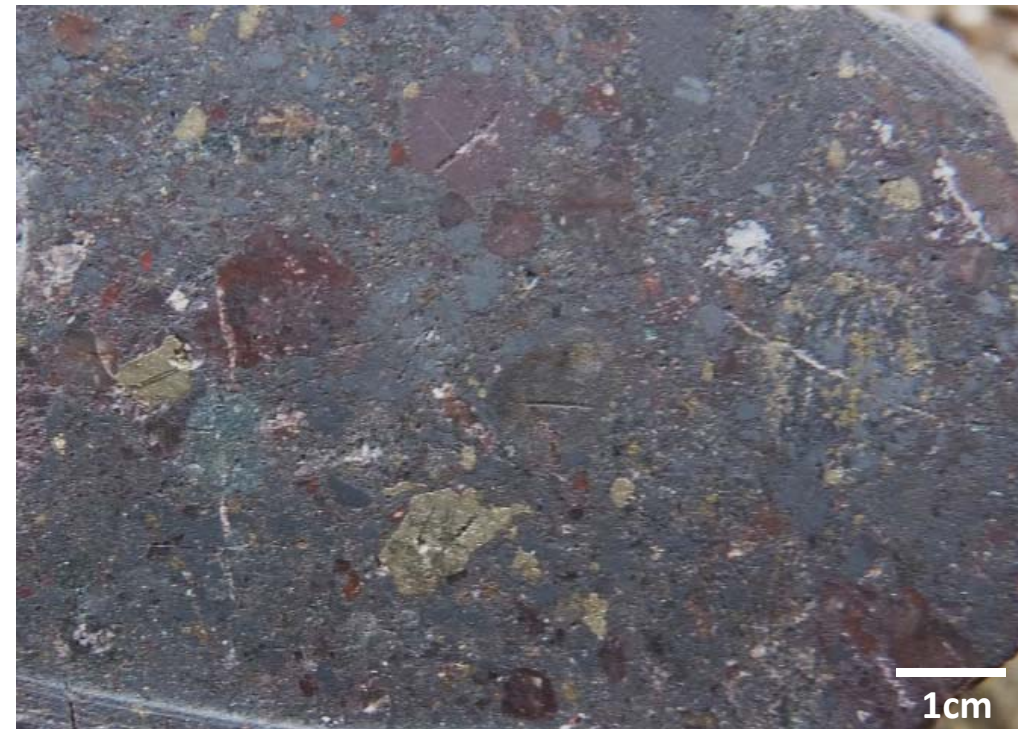
Encaissants immédiats: faciès d'altération variant entre les pôles

- Kfs, Bt et Mag (faciès K-Fe de HT)
- Ser (Ms), Kfs, Hem  $\pm$  Chl, carbonates, barytine, etc. (faciès K-Fe et Ca-Fe-Mg de BT)
- Au sein de systèmes  $\leq 35 \times 15 \times 10$  km (longueur-largeur-profondeur)

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



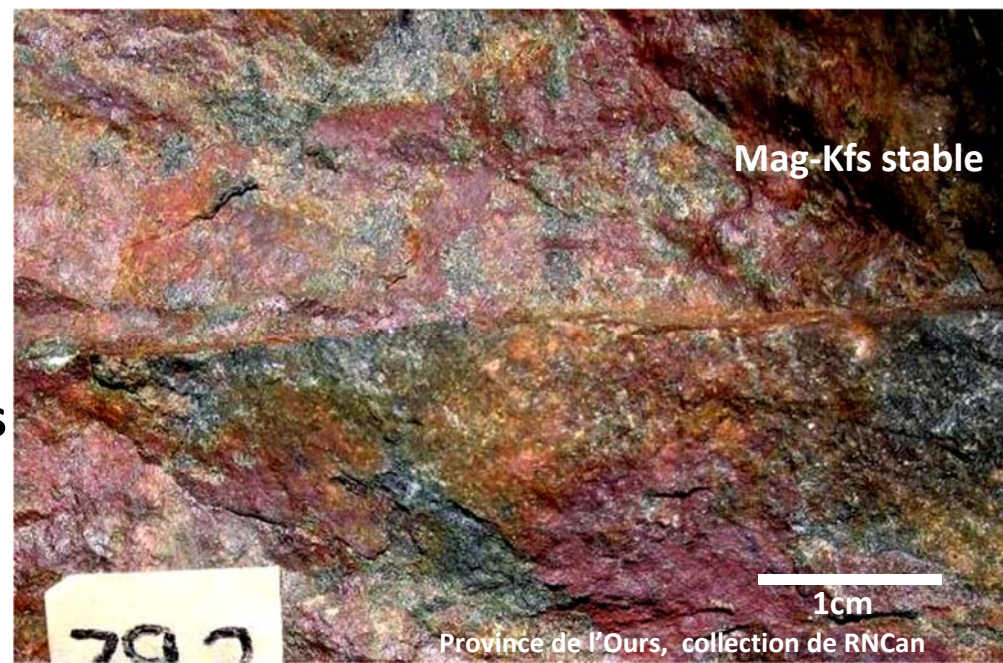
Olympic Dam, collection de P. Williams





# Zones minéralisées

- Polymétalliques, s'étend sur  $\leq 6 \times 1 \times 2$  km) (longueur-largeur-profondeur)
- Contenu en sulfures de Cu (chalcopyrite, bornite, chalcocite) supérieur à celui des sulfures de Fe dans les zones minéralisées
- Contenu en oxydes de Fe (magnétite, hématite,  $\pm$ martite,  $\pm$ mushkétovite) supérieur à celui des sulfures de Fe (pyrrhotite, pyrite)
- Sulfures à Ni, Pb, Zn, arséniures à Ag, Co, Cu, Ni, U, tellures à Ag, Bi, Co, électrum et Ag, Au, Bi et Cu natifs
- Peu de quartz hydrothermal mais carbonates abondant au sein des zones minéralisées; veines de quartz subséquentes communes



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



Ressources naturelles  
Canada

Natural Resources  
Canada

Hitzman et al. 1992; Ray et Lefebure 2000; Williams et al. 2005; Corriveau et Mumin 2010; Ehrig et al. 2012, 2017; Corriveau et al. 2010b, 2016; Porter 2010a; Williams 2010a, b

Canada



# Associations métallifères IOCG

## Vaste gamme de métaux et de minéraux industriels

- Métaux usuels (Cu, Ni, Pb, Zn)
- Fer (sidérurgie)
- Métaux précieux (Ag, Au, EGP)
- Éléments des terres rares (légères à lourdes)
- Métaux spécialisés (stratégiques) (Bi, Co, Mo, V, F, Nb)
- Actinides (U à faible teneur, Th)
- U-Th-K: source potentielle de chaleur pour l'énergie géothermique
- Minéraux industriels: fluorine, apatite
- + P, Se, Te, Zr, As, B, Ba, Mn, W, ...

## Associations métallifères atypiques (ex., Cu-Au-U-ETR)

## Fractionnement et découplage d'éléments normalement couplés

## Tonnage potentiellement très large, teneur intermédiaire à faible

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

## Olympic Dam (Australie)

10,100 Mt at

0.78% Cu,  
0.25kg/t  $U_3O_8$ ,  
0.33 g/t Au,  
1.0 g/t Ag

(+ ~0.3% ETR légères et  
0.01% ETR lourdes)

BHP 2017; ETR, BHP  
communication personnelle



Hitzman et al. 1992; Hitzman 2000; Williams et al. 2005; Corriveau et Mumin 2010; Groves et al. 2010; Williams 2010a, b; Schofield 2012



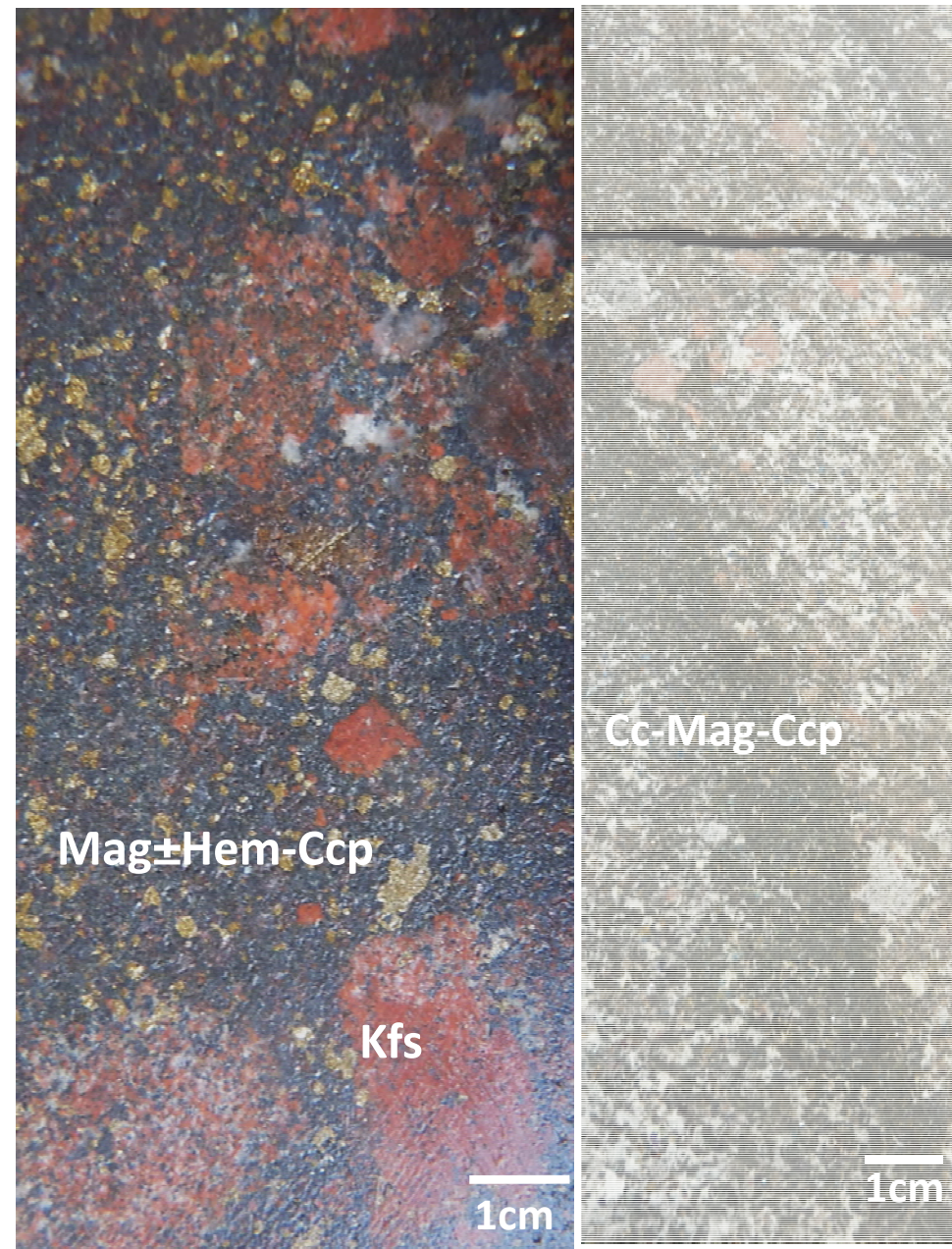
# Styles de minéralisation et types d'encaissants

- Brèches, stockworks, veines
- Disséminations, remplacements
- Mantos, skarns
- Concordant ou discordant
- Au sein de n'importe quel type de roches
- À n'importe quel niveau stratigraphique
- Parmi des roches de n'importe quel âge
- Au sein d'un même système, les encaissants peuvent être volcaniques, sédimentaires, intrusifs ou métamorphiques
- Encaissants immédiats: paragenèses allant de Mag-Kfs-Bt à Hem-Ser-Chl-Cb (c.-à-d. faciès K-Fe de HT et BT)

## Une conséquence de l'évolution métasomatique des systèmes

Hitzman et al. 1992; Oliver et Bons 2001; Williams et al. 2005; Oliver et al. 2006; Corriveau et Mumin 2010; Corriveau et al. 2010b, 2016; Porter 2010a; Williams 2010a, b

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# Attributs des districts IOCG

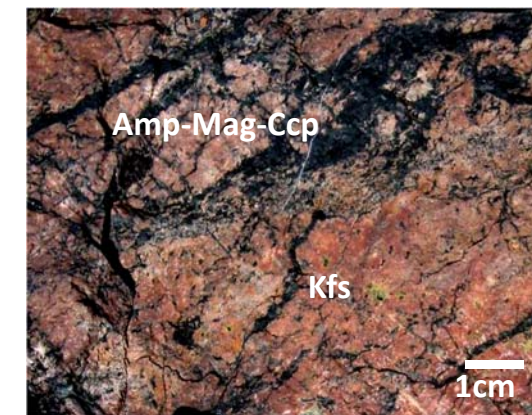
- Gîtes IOCG génétiquement liés à un large éventail de types de gîtes hydrothermaux au sein de mêmes systèmes minéralisateurs mais dominés par des faciès d'altération distincts
- **Les grappes de gîtes** (IOCG, IOA, skarn, U et Au-U ou Co-Cu-U 'orogéniques' au sein d'albitites, Re-Mo, ETR, etc.) **forment des districts à l'échelle des systèmes hôtes. Les districts se suivent le long de provinces métallogéniques allant de 200 à 1500 km de long**
- Contextes géodynamiques avérés ou inférés variés mais toujours continentaux (arc continental, bassin d'arrière arc continental et rift intraplaque continental)
- Cartographie de l'empreinte métasomatique communément circonscrite aux gîtes; en général peu de couverture régionale continue
- Remobilisations multiples si orogénèse ou magmatisme subséquents



Assemblage Mag-Kfs-Qz (K-Fe de HT)



Assemblage Mag-Kfs-Ccp (K-Fe de HT)



Matrice à Amp-Mag-Ccp et halo à Kfs

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Gîtes IOCG de référence

## Groupe à hématite (Hem>>Mag; classification de Williams 2010a)

- Olympic Dam, Carrapateena, Prominent Hill (Olympic Cu-Au, Australie)
- Mina Justa (Andes centrales, Pérou)

## Groupe à magnétite-hématite (+ variantes faibles en Cu)

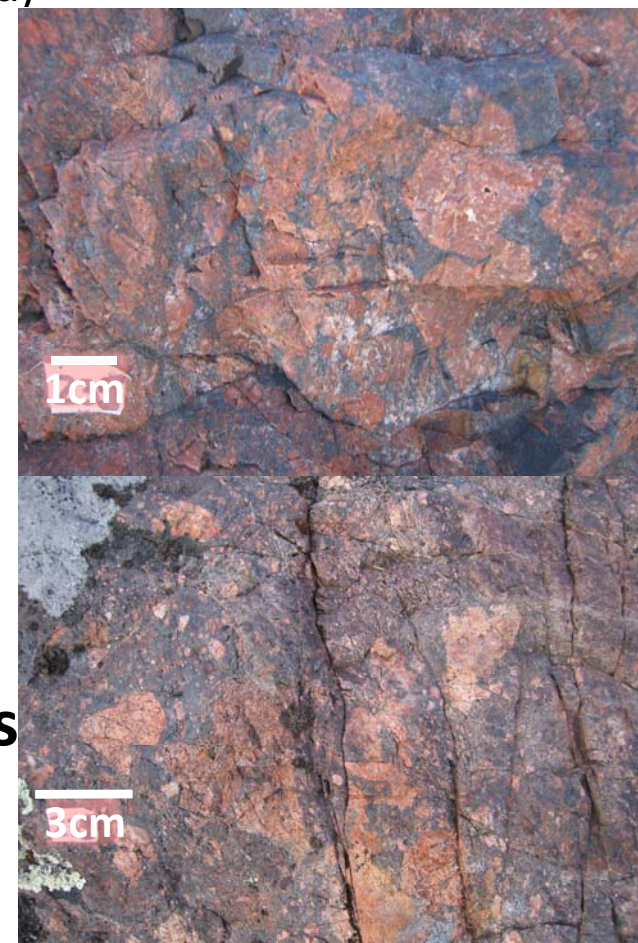
- Sue Dianne (Ours, Canada)
- Raul-Condestable (Andes centrales, Pérou)
- Mantoverde (Andes centrales, Chili)

## Groupe à magnétite

- Ernest Henry (Cloncurry, Australie)
- Candelaria (Andes centrales, Chili)
- Sossego, Salobo (Carajás, Brésil)
- Guelb Moghrein (Mauritanie)
- Boss (SE Missouri, US)

## Variantes à skarn K ou encaissées dans des skarns

- Hillside (Olympic Cu-Au, Australie)
- Hannukainen (Finlande), Kaunisvaara (Suède)



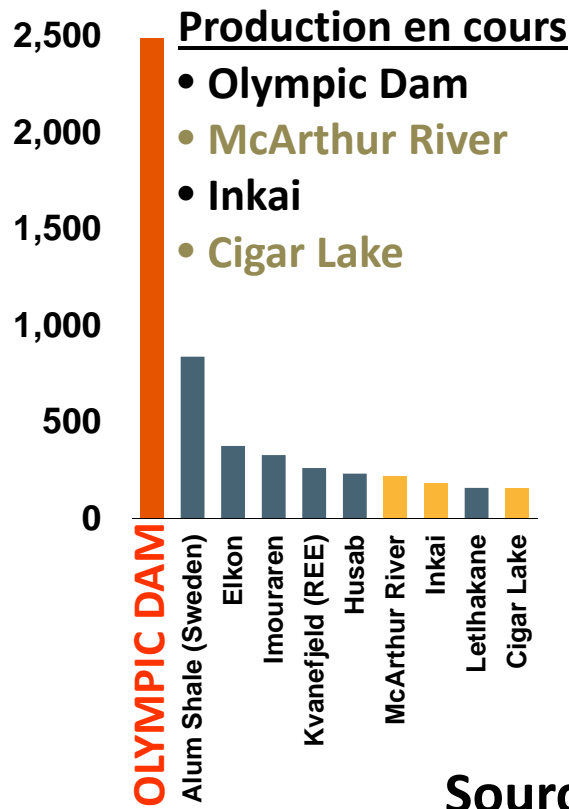
© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



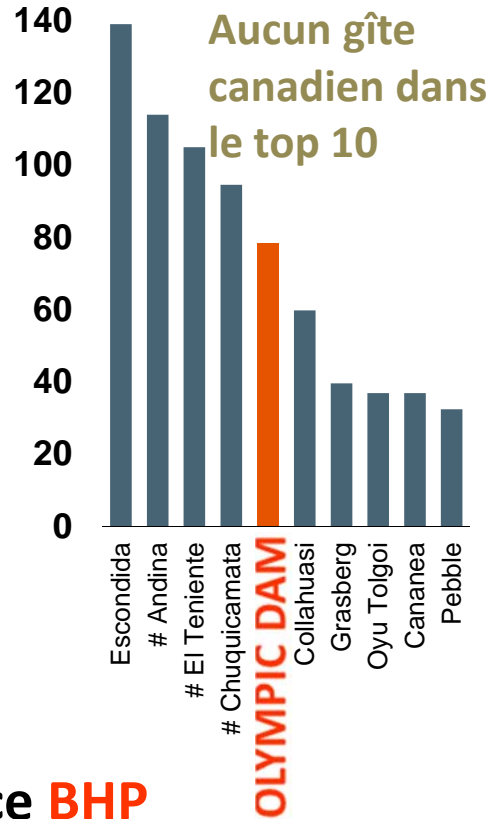


# Olympic Dam

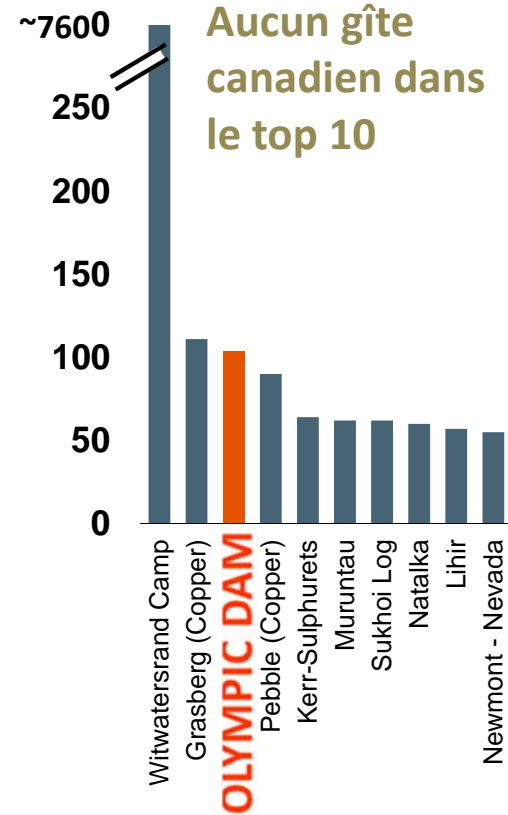
Milles tonnes U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>



Million de tonnes Cuivre



Million d'onces Or



OD: ressources totales  
30 Juin 2017

10,100 Mt @  
0.78 % Cu,  
250 ppm U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>,  
0.33 ppm Au,  
1 ppm Ag

OD: contenu en métaux

~80 Mt Cu  
~2600 kt U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>  
~110 Moz Au,  
~320 Moz Ag

Source BHP

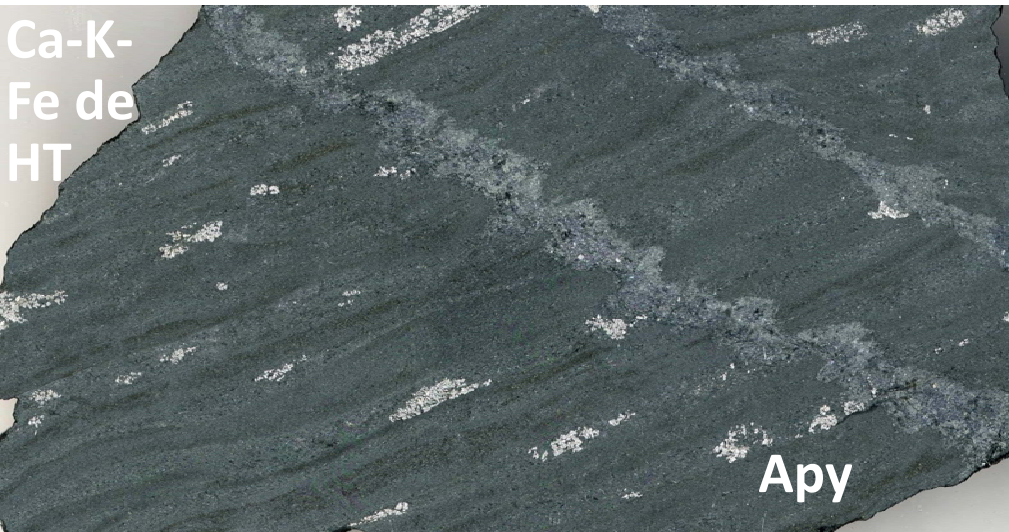
Chart depicts contained metal. Sources: Company Annual Reports, press releases and International Atomic Energy Agency (BHPB figures as at 30 June 2015, all other figures as at Sep 2014). Witwatersrand figure is BHP Billiton estimate and is approximate only. # Based on Codelco reported figures at 0.2% Cu cut-off grade. BHP Billiton Mineral Resources for Olympic Dam and Escondida district (includes Pampa, Pinta Verde and Chimborazo) are on a 100% basis. The FY2015 Mineral Resource information for Olympic Dam and Escondida district on this slide is extracted from the report entitled BHP Billiton Annual Report 2015. The report can be viewed at [www.bhpbilliton.com](http://www.bhpbilliton.com). The company confirms that it is not aware of any new information or data that materially affects the information included in the original market announcement and, in the case of estimates of Mineral Resources, that all material assumptions and technical parameters underpinning the estimates in the relevant market announcement continue to apply and have not materially changed. The company confirms that the form and context in which the Competent Person's findings are presented have not been materially modified from the original market announcement.

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

BHP Billiton 2015; BHP 2017

# Variantes à Co des IOCG

- Ceinture de Co de l'Idaho (É-U)
- Mt Cobalt ? (Cloncurry, Australie)
- NICO (Ours, Canada)



Gîtes à Au-Co-Bi-Cu au sein de séquences sédimentaires communément albitisées et développant des faciès d'altération à amphibole-magnétite-biotite (Ca-K-Fe de HT) et à biotite-magnétite-feldspath K (K-Fe de HT) à arsénopyrite, Au, Co, Bi

Goad et al. 2000; Corriveau et al. 2010, 2016; Mumin et al. 2010; Slack 2013; Acosta-Góngora et al. 2015a, b, 2018; Montreuil et al. 2015, 2016b





# Minéralisation uranifère au sein des IOCG



**Principalement associée aux faciès K-Fe de BT (à hématite) dans la province à Cu-Au d'Olympic en Australie**

**Associée aux faciès K-Fe de HT (à magnétite) et de BT (à hématite) dans la Province de l'Ours (les minéralisations uranifères les mieux développées y sont au sein d'albitites tels qu'à Cole et Southern Breccia (Montreuil et al. 2015, 2016a, b))**

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Ce que n'est pas un gîte IOCG au sens strict

- **Gîtes polymétalliques avec peu d'oxydes de fer** (les brèches et veines à carbonates de fer, communes comme faciès tardifs ou remobilisés au sein d'IOA et IOCG, peuvent être des métallotectes importants)
- **Gîtes polymétalliques à oxydes de fer sans teneur économique en Cu**
- **Gîtes à oxydes de fer-apatite (type "Kiruna" / IOA)**
- **Gîtes polymétalliques métasomatiques à oxydes de fer, Nb, ETR et autres métaux mais sans teneur économique en Cu**
- **Gîtes à U ou Au-Co-U et pauvres en oxydes de fer au sein d'albitites**

## Termes utilisés pour les gîtes IOCG

- **IOCG: Iron-Oxide Copper-Gold**
- **Oxydes de fer Cu-Au±U**
- **Types Olympic Dam et Cloncurry**
- **FeOx**

Voir aussi Williams et al. 2005; Williams 2010a, b; Groves et al. 2010; Porter 2010a.

Hitzman et al. (1992), Corriveau (2007), Porter (2010a) et Corriveau et al. (2010a, b, 2016) discutent de l'importance d'une approche holistique par système pour l'exploration des territoires sous explorés

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# Gîtes affiliés et exemples

## Oxydes de fer $\pm$ apatite (IOA)

- Kiirunavaara, Malmberget, Grangesberg (Suède)
- El Laco (Chili)
- El Romeral, Marcona, Los Colorados (Andes centrales)
- Oak Dam, Lightning Creek, Acropolis (Australie)
- Cerro del Mercado (Durango, Mexique)
- Pea Ridge, Pilot Knob (Missouri, É-U)
- Kwyjibo (Grenville, Canada)
- Esfordi (Bafq, Iran)

## IOAA associé à des intrusions alcalines (caractéristiques dominantes apparentées aux IOA ou aux IOCG)

- Bayan Obo (Chine): faciès d'altération typiques des IOA
- Phalaborwa, Vergeneog (Afrique): affinités avec des gîtes IOCG

## U au sein d'albitites

- Valhalla (Mt Isa, Australie)
- Lagoa Real (Brésil)
- Michelin (Canada)
- Southern Breccia (prospect; Ours, Canada)

## Au $\pm$ Co $\pm$ U au sein d'albitites

- Kuusamo (Finlande)
- Larafella, Loraboué (Burkina Faso)
- Turamdih (Inde)
- Horst de Romanet (prospects; Canada)

## Mo-Re

- Merlin (Cloncurry, Australie)



Brèche à oxydes de fer,  
intrusion alcaline du  
Tamazer, Maroc

Sources  
bibliographiques  
à la diapo 55

# Gîtes à oxydes de fer ± Apatite (IOA)



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



Ressources naturelles  
Canada

Natural Resources  
Canada

Canada 



# Ressources de gîtes à oxydes de fer ± apatite (IOA)

Fer, avec ou sans minéralisation en terres rares; ETR légères >> ou > lourdes  
 Fractionnement des terres rares avec enrichissement des terres rares lourdes  
 Aussi nommés 'type Kiruna'; en Chine: Fe de type 'porphyrique' ou 'au sein de volcanites'



El Laco



Bayan Obo

- **Kiirunavaara** (682 Mt, 47.5% Fe) (district IOA-IOCG de Norbotten, Suède)
- **Oak Dam** (~560 Mt, 41–56% Fe) (+ Cu, U, Au) (Province à Cu-Au d'Olympic, Australie)
- **Marcona** (~1940 Mt, 55.4% Fe) (+ Cu) (district des Andes centrales à IOA et IOCG)
- **El Laco** (734 Mt, 49% Fe) (Andes alpines)
- **Pea Ridge** (161 Mt, ~ 54% Fe; 0.2Mt, **12% ETR**) district IOA-IOCG du Missouri, US
- **Bayan Obo** (Chine) un IOA(?) au sein d'un système avec magmatisme alcalin (carbonatites)
  - **1500 Mt à 35% Fe**
  - **57 Mt à 6% ETR<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**
  - **2 Mt à 0.13% Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>**

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

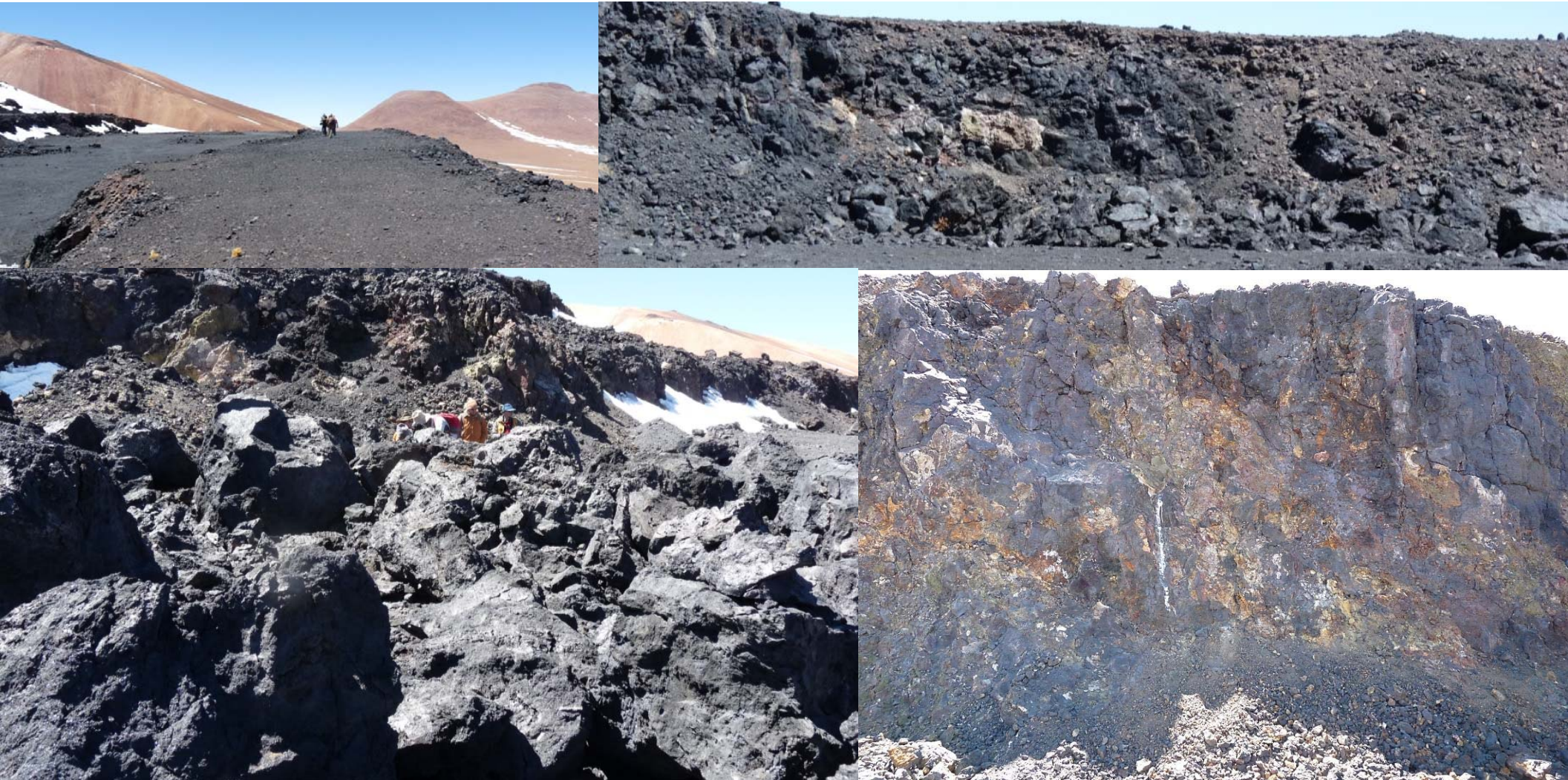




# El Laco (Chili): IOA de référence

Brèche andésitique hôte remplacée par de la magnétite en plusieurs étapes:

- 1) remplacement faible à intense de la matrice puis des fragments de la brèche;
- 2) recristallisation des textures;
- 3) veines grossières et à textures spectaculaires





# Faciès d'altération et de minéralisation

- **Faciès d'altération du système hôte similaires à ceux des gîtes IOCG mais dans des proportions différentes** (c.-a-d., Na, Na-Ca-Fe de HT et Ca-Fe de HT dominants; K-Fe de HT et BT moindres; Ca-Fe-Mg-CO<sub>2</sub> et épithermal communs)
- **Encaissants immédiats à faciès à Amp, Mag, Ap (Ca-Fe de HT)**
- **Variantes riches en ETR remplacées ou spatialement associées à des faciès à Ca-K-Fe de HT ou K-Fe (HT à BT)**
- **Skarn (clinopyroxène, grenat) commun au sein ou à proximité des zones minéralisées**
- **Assemblages minéralogiques du faciès Ca-Fe de HT (Act, Amp-Mag) distincts de ceux des skarns; ne pas décrire comme skarns**
- **Pauvres en sulfures et U** (sauf si remplacés par altération fertile à Ca-K-Fe de HT ou K-Fe)



Badham et Morton, 1976; Hildebrand 1986; Hitzman et al. 1992; Williams et al. 2005; Corriveau et al. 2010a, b, 2016, données inédites; Naranjo et al. 2010; Porter 2010a, b; Williams 2010a, b; Knipping et al. 2015; Bilenker et al. 2016; Tornos et al. 2016; Zeng et al. 2016; Zhao et al. 2016, 2017a

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# Attributs clés

- Communément à grain fin avec apparence massive ou bréchifiée
- Enveloppe commune de brèches à magnétite±amphibole
- Altération préserve ou détruit les textures des précurseurs
- Des évidences de terrain concluantes d'une origine métasomatique (remplacement, matrice de brèches, brèches avec fluidisation) sont communes
- La présence régulière de zones d'altération à Na, Na-Ca-Fe et Ca-Fe sous les gîtes IOA (ex. El Laco), au toit des intrusions sub-volcaniques et enclavant les gîtes IOA et skarns associés ou le long de failles doit être pris en compte dans tous modèles génétiques



Altération Mag progressive des brèches andésitiques

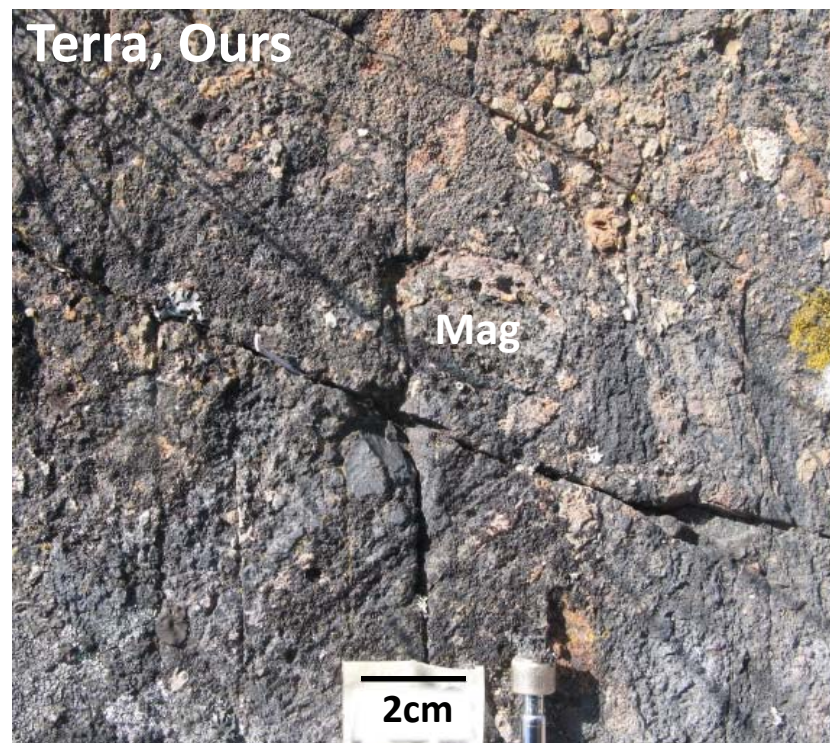




# Genèse

- Communément associé à du magmatisme andésitique (calc-alcalin, shoshonitique) d'arcs continentaux (Andes centrales, Middle-Lower Yangtze River, province de l'Ours)
- Gîtes formés en quelques millions d'années au sein d'une même province métallogénique
- Formé en profondeur au sein de systèmes qui évoluent vers des IOCG (Province de l'Ours) ou mis en place proche de la surface (El Laco)
- Sous de très hautes températures (600-800°C)
- En association avec des fluides hypersalins d'origine magmatique ayant interagis avec leurs encaissants
- Inclusions magmatiques d'oxydes de fer au sein des andésites
- Processus de formation invoqués: précipitation d'oxydes de fer par processus métasomatiques (magmatiques-hydrothermaux), fluidisation de précipités hydrothermaux, flottaison de magnétite ignée ou hydrothermale et mise en place de magmas à oxydes de fer avec métasomatisme associé

Remplacement d'une brèche volcanique par de la magnétite



Voir: Hildebrand 1986; Hitzman et al. 1992; Williams et al. 2005; Corriveau et al. 2010a, b, 2016, inédit; Porter 2010a, b; Williams 2010a, b; Davis et al. 2011; Knipping et al. 2015; Bilenker et al. 2016; Tornos et al. 2016, 2017; Sun et al. 2017; Zhao et al. 2016, 2017a

# Gîtes d'uranium ou d'or au sein d'albitites



## U au sein d'albitites

- Valhalla (Mount Isa, Australie) 34.7 Mt à 830 ppm  $U_3O_8$
- Lagoa Real (Brésil)
- Michelin (Canada) 37.5 Mt à 0.10 %  $U_3O_8$
- Southern Breccia (prospects; zone magmatique du Grand lac de l'Ours, Canada)

## Au±Co±U au sein d'albitites

- Kuusamo (Finlande) 3.8 Mt à 4.1 g/t Au, 9.1 Mt à 0.12% Co
- Larafella, Loraboué (Burkina Faso)
- Turamdih (Indes)
- Horst de Romanet (prospects; Canada)

Voir liste de références à la diapo 55



# U, Au ± U ± Co au sein d'albitites

## Aussi appelés

- U métasomatiques sodiques
- U métamorphiques-métasomatiques sodiques
- Veines à Au ± U ± Co ou Au-Co-U 'orogéniques' encaissées dans des albitites (ex., Kuusamo en Finlande; Laraboué, Larafella au Burkina Faso)

## Multiple stages de métasomatisme

- Na (Ab ± Rbk, Cpx sodique)
- Ca-Fe de HT (Amp, Cpx, Mag)
- K (Kfs)
- K-Fe de HT
- Souvent syn-déformation + superposition Ca-Fe-Mg de BT (Chl, Cb, Hem)



Gandhi 1978; Porto da Silveira et al. 1991; Béziat et al. 2008; Cuney et Kyser 2008; Kerr et Sparkes 2009; Skirrow et al. 2009; Williams 2010a; Corriveau et al. 2011; Cuney et al. 2012; Wilde 2013; Dragon Mining 2014; Kontonikas-Charos et al. 2014; Montreuil et al. 2015, 2016b; Sparkes 2017

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# U, Au ± U ± Co au sein d'albitites

- Au sein de districts comportant des gîtes IOCG tels que les indices de Southern Breccia et Cole (Province de l'Ours) et le gîte de Valhalla au sein du système de corridors d'albitites du Mt Isa qui encaisse aussi les gîtes IOCG du district de Cloncurry en Australie
- Au sein de districts cuprifères mais à affinité IOAA non ou peu établie: Turamdih et autres gîtes U–Cu–(Fe), zone de cisaillement de Singhbhum, Indes
- Veines à Au±U±Co encaissées dans des corridors d'albitites associés potentiellement à des systèmes IOAA (Kuusamo, Finlande; Laraboué et Larafella, Burkina Faso)



Gandhi 1978; Béziat et al. 2008; Cuney et Kyser 2008; Wilde 2013; Dragon Mining 2014; Kontonikas-Charos et al. 2014; Montreuil et al. 2015; Sparkes 2017



# U, Au ± U ± Co au sein d'albitites

- Association spatiale et temporelle entre
  - albitites et minéralisation
  - albitite et IOCG (ex., Cloncurry)
- U précipite APRÈS l'albitisation mais il peut y avoir couplage géochimique apparent entre Na et U potentiellement un reflet de l'accroissement de la porosité avec l'albitisation donc de la possibilité de nichage de l'U au sein des albitites
- Albitites: des corridors de roches poreuses facilement fracturées canalisant les fluides uranifères et servant de trappes mécaniques et potentiellement chimiques pour l'U



Gandhi 1978; Porto da Silveira et al. 1991; Béziat et al. 2008; Cuney et Kyser 2008; Kerr et Sparkes 2009; Skirrow et al. 2009; Williams 2010a; Corriveau et al. 2011; Cuney et al. 2012; Wilde 2013; Dragon Mining 2014; Kontonikas-Charos et al. 2014; Montreuil et al. 2015, 2016b; Sparkes 2017

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

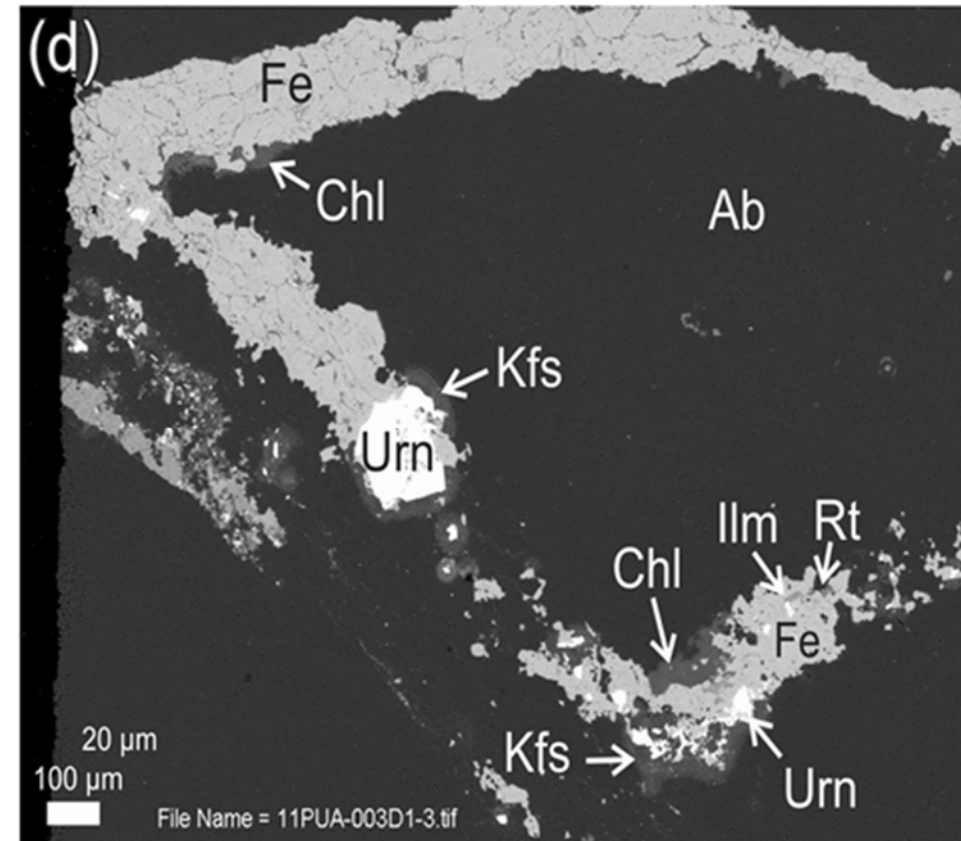
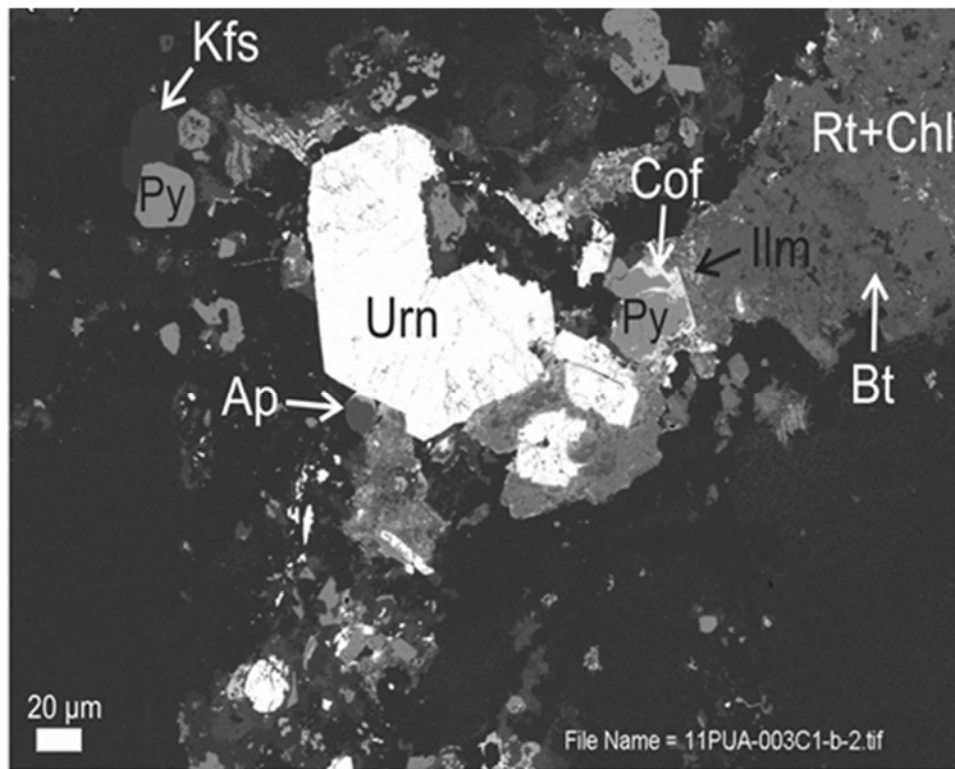


# U, Au ± U ± Co au sein d'albitites

Minéraux uranifères dominants:

- Uraninite, brannérite, davidite, coffinite
- Communément accompagnés de minéraux secondaires à U

Contenu élevé en Zr, Nb, Ta, Sn au sein des albitites



Cette étude; Kontonikas-Charos et al. 2014; Macmillan et al. 2016

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

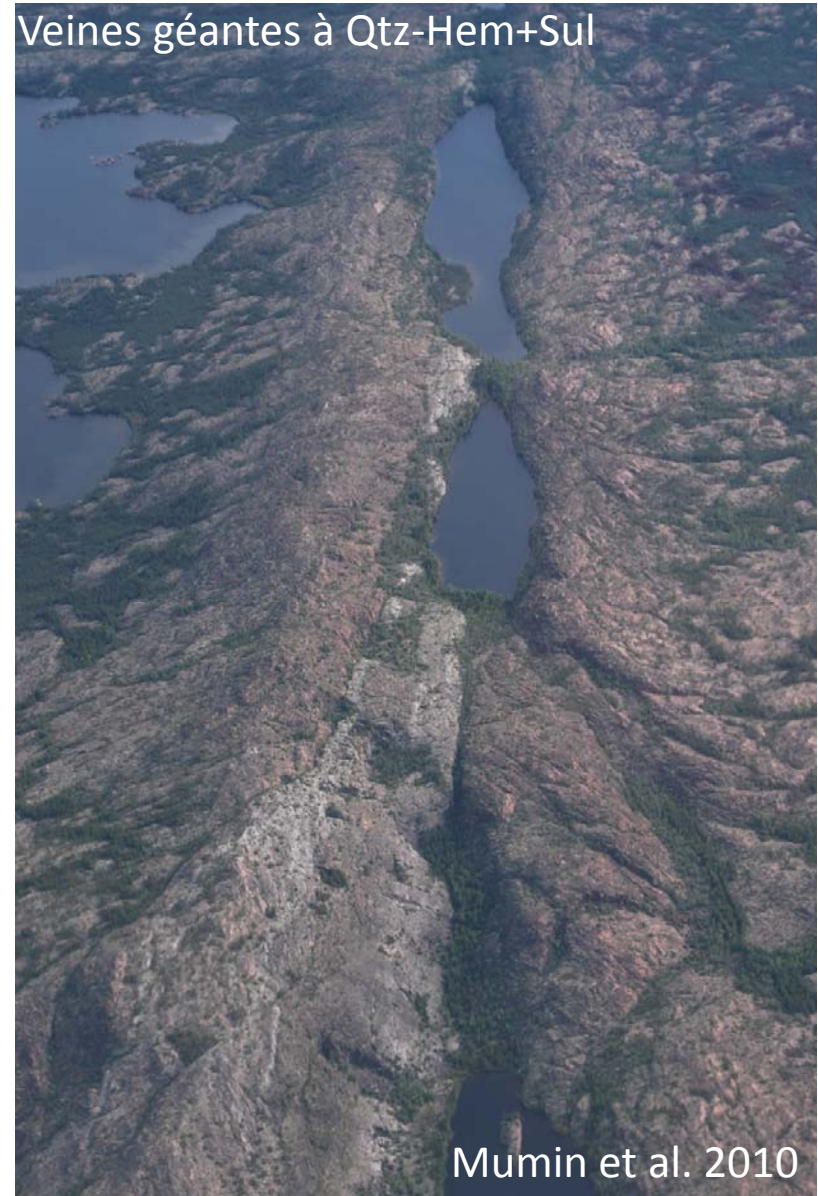




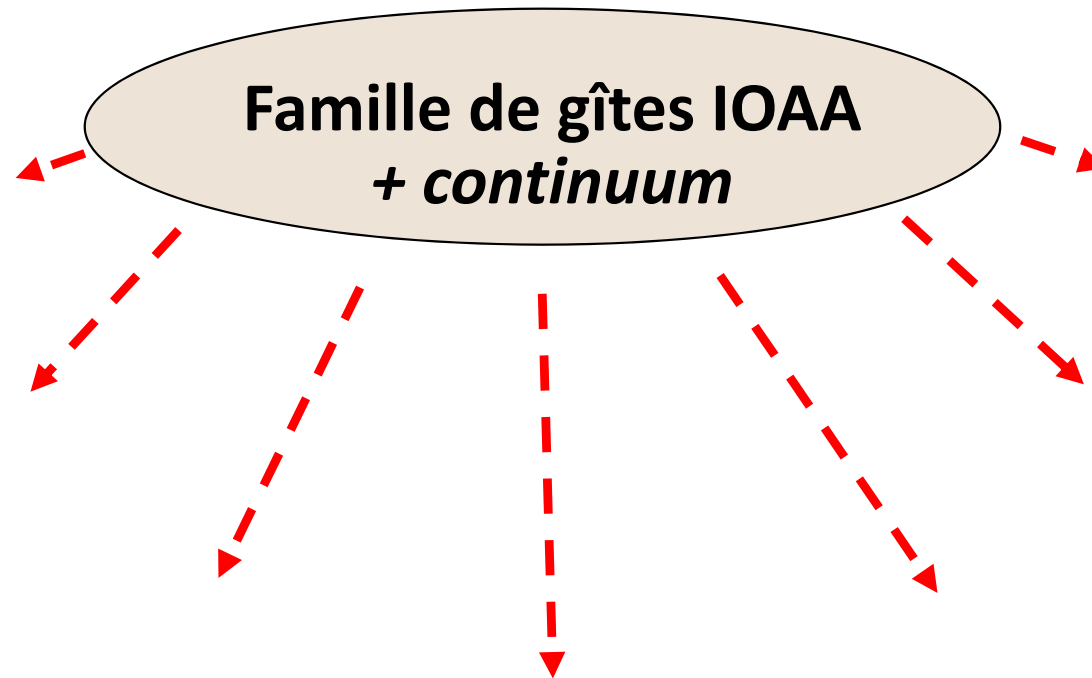
# Toit épithermal, veines à U, Ag, etc. et aux 5 éléments

- Altération épithermale prograde et retrograde, veines et minéralisation
- Remobilisation à basse température – veines de quartz (Ray Rock, Southern Breccia) + veinules à hématite, etc.

Mine historique d'U de Ray Rock, Province de l'Ours



# Types de gîtes IOAA et leurs continuums



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



Ressources naturelles  
Canada

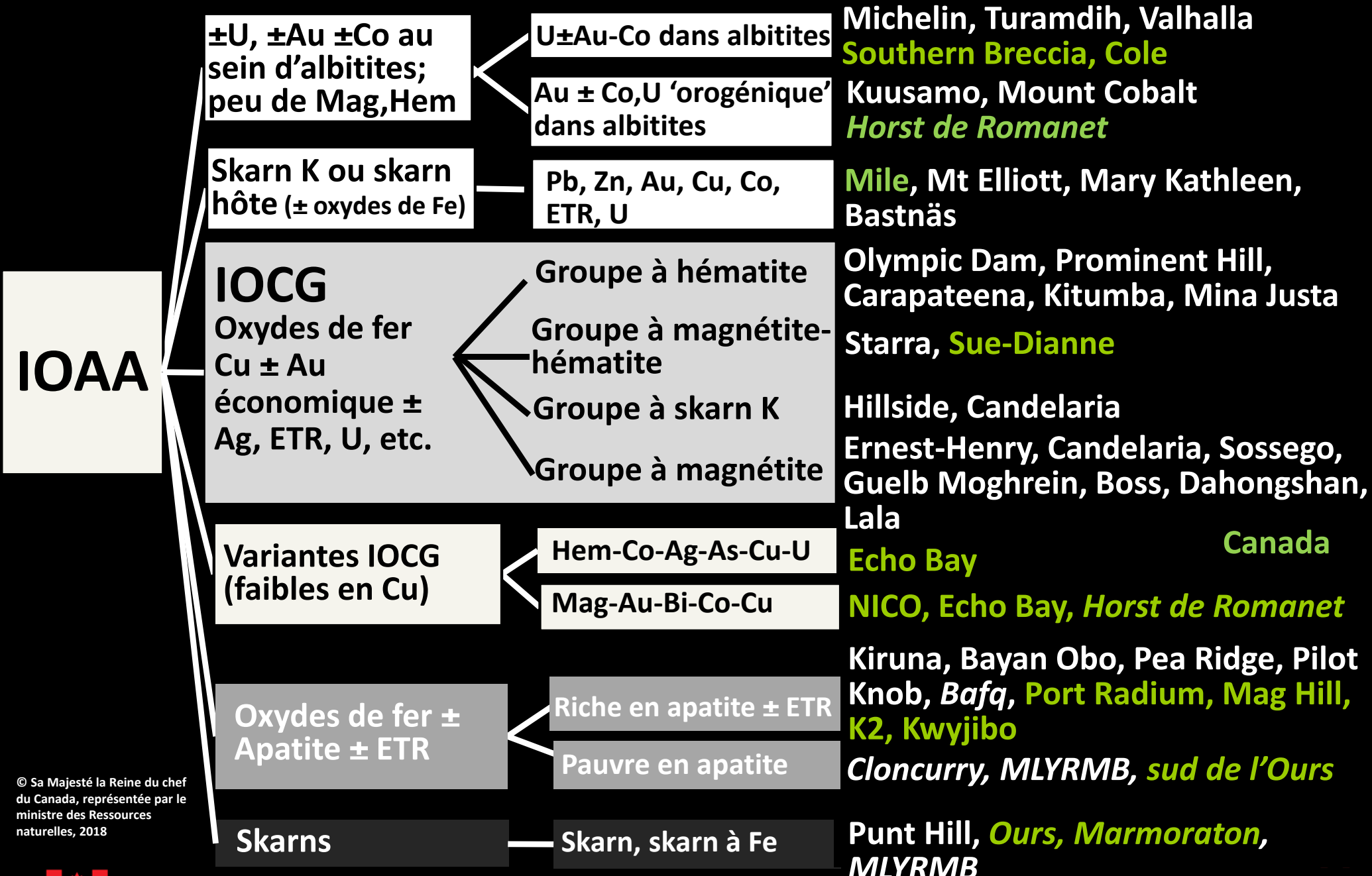
Natural Resources  
Canada

Canada

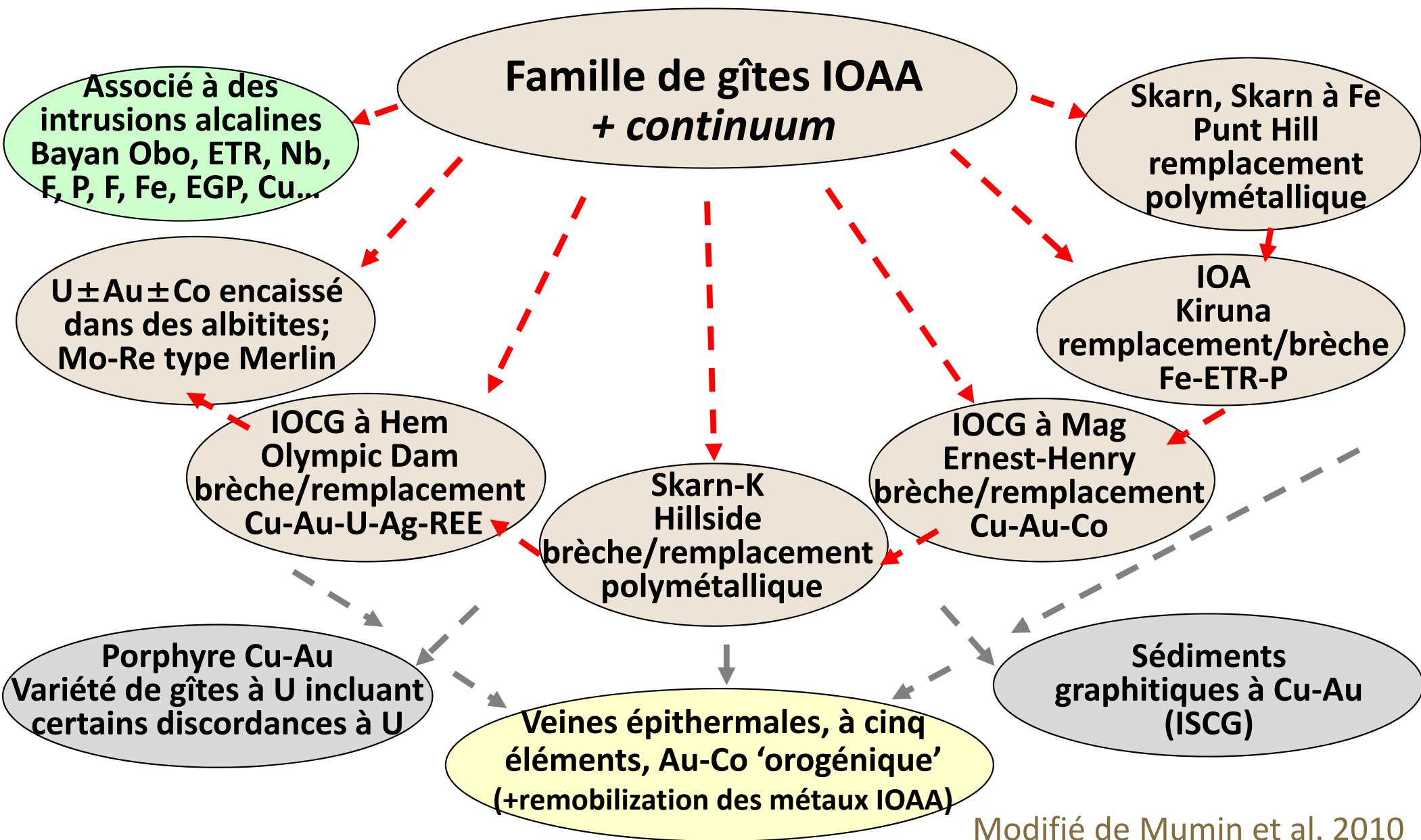


# Classification des gîtes IOCG et affiliés au sein de systèmes IOAA

Modifié de Williams 2010a; Porter 2010a



# Types de gîtes IOAA et leurs continuums



Modifié de Mumin et al. 2010

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



Ressources naturelles  
Canada

Natural Resources  
Canada

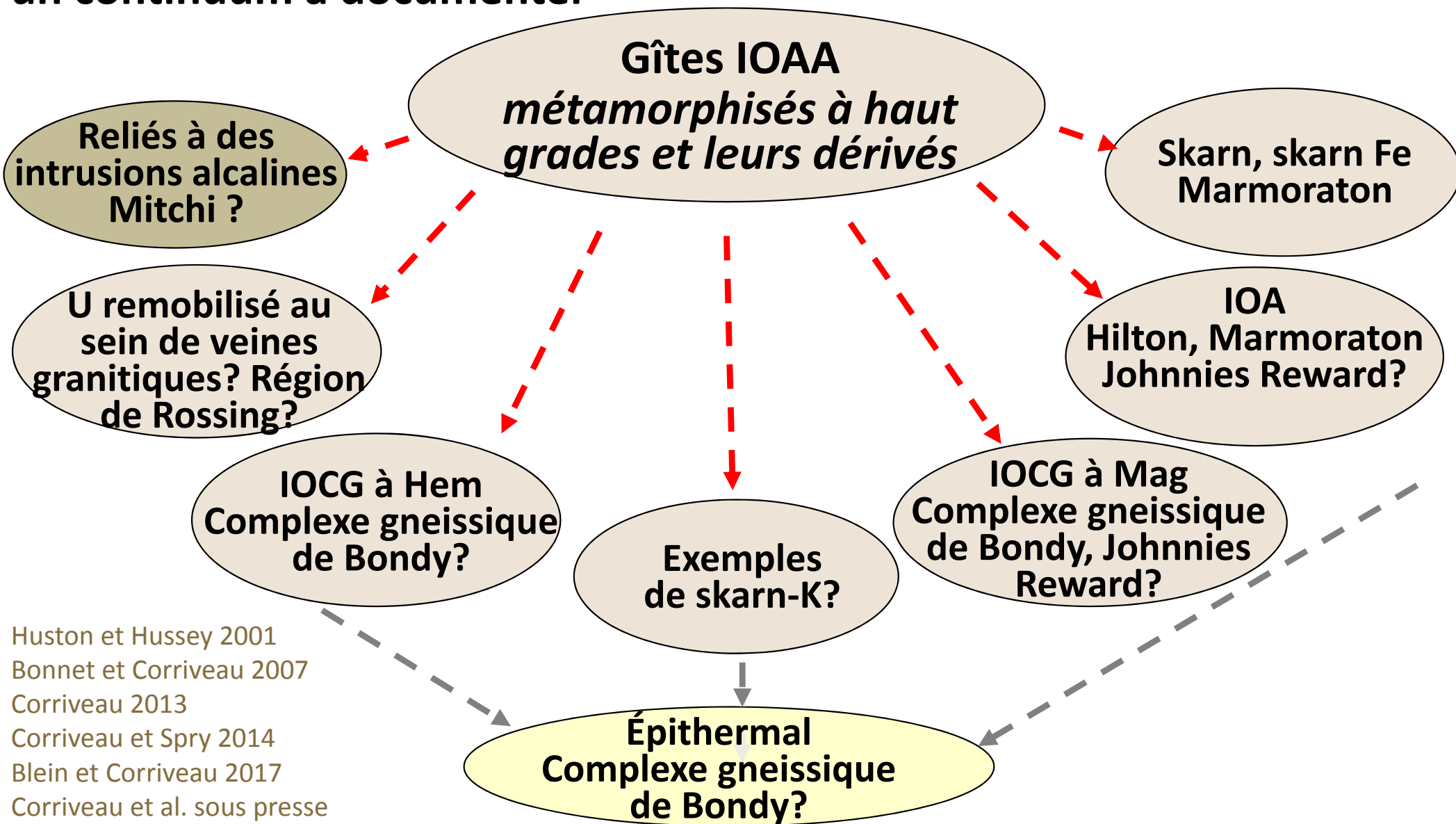
Voir aussi Hitzman 2000; Corriveau et al. 2016; Porter  
2010a; Day et al. 2016; Tornos et al. 2016; Zhao et al. 2017a

Canada



# Gîtes IOAA métamorphisés:

## un continuum à documenter



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Ressources

## au sein des districts plus explorés

- **Australie:** Province à Cu-Au d'Olympic, districts de Cloncurry, Mt Isa, Mt Painter, Tennant Creek
  - **Brésil:** district de Carajás
  - **Chili et Pérou:** Andes centrales et El Laco
  - **Afrique**
  - **Asie**
  - **Scandinavie**
  - **Canada, État-Unis, Mexique**
- \* Ressources totales listées dans les tableaux sauf indications contraires**





<b>Australie</b> (année de découverte, district)	<b>Ernest Henry (1990, Cloncurry)</b> 167 Mt à 1.1% Cu, 0.5g/t Au (+ Co)
<b>Olympic Dam (1975, Olympic Cu-Au)</b> 10,100 Mt à 0.78% Cu, 250ppm U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> , 0.33g/t Au, 1.0g/t Ag (+ ~0.3% ETR <sub>lé</sub> , 0.01% ETR <sub>lo</sub> )	<b>Mt Dore (Cloncurry)</b> 111 Mt à 0.53% Cu, 0.09g/t Au, 0.06% Pb 0.31% Zn
<b>Prominent Hill (2001, Olympic Cu-Au)</b> 178 Mt à 1.1% Cu, 0.7g/t Au, 2.7g/t Ag, 103ppm U	<b>Mt Elliot-Swan (1880-2013, Cloncurry)</b> 353.7 Mt à 0.6%Cu, 0.35g/t Au
<b>Carrapateena (2005, Olympic Cu-Au)</b> 134 Mt à 1.5% Cu, 0.6g/t Au, 6.3g/t Ag (+U)	<b>Merlin (2008, Cloncurry)</b> 6.4 Mt à 1.5% Mo, 26 g/t Re (réserves)
<b>Hillside (2009, Olympic Cu-Au)</b> 337 Mt à 0.6% Cu, 0.14g/t Au, 15.7% Fe	<b>Rocklands (2006, Cloncurry)</b> 55.4 Mt à 0.64% Cu, 290ppm Co, 0.15ppm Au, 5.1% Mag + 227 Mt à 16% Mag
<b>Khamsin (2012, Olympic Cu-Au)</b> 202 Mt à 0.6% Cu, 0.1 g/t Au, 1.7 g/t Ag, 86ppm U	<b>Osborne (Cloncurry)</b> 12 Mt à 1.4% Cu, 0.88g/t Au
<b>Oak Dam (1976, Olympic Cu-Au)</b> ~560 Mt à 41–56% Fe, 0.2%Cu, 690ppm U	<b>Monakoff (Cloncurry)</b> 2.4 Mt à 0.95% Cu, 0.3g/t Au (112ppm U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )
<b>Rover 1 (Tennant Creek)</b> 6.8 Mt à 1.73g/t Au, 1.20% Cu, 0.14% Bi, 0.06% Co	<b>E1 (Cloncurry)</b> 10 Mt à 0.7% Cu, 0.22g/t Au
<b>Peko (Tennant Creek) production</b> 3 Mt à 4.1% Cu, 0.3% Bi, 3.5g/t Au, 14g/t Ag	<b>Valhalla (Mt Isa)</b> 34.7 Mt à 830ppm U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
<b>Mt Gee (Mt Painter)</b> 51 Mt à 0.11% Cu, 525ppm U	<b>Mary Kathleen, Elaine 1, Elaine-Dorothy</b> 9.5 Mt à 1300ppm U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> 0.83 Mt à 280ppm U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> , 3200ppm ETR 26.1Mt à 0.56% Cu, 0.09g/t Au

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



## Brésil (district de Carajás)

### Salobo

**789 Mt** à 0.96% Cu, 0.52g/t Au,  
55g/t Ag (+ 16-26ppm U)

### Cristalino

**500 Mt** à 1.0% Cu, 0.3g/t Au

### Igarapé Bahia/Alemão

**219 Mt** à 1.4% Cu, 0.86g/t Au + U, ETR

### Sossego

**245 Mt** à 1.1% Cu and 0.28g/t Au

### Alemão

**161 Mt** à 1.3% Cu, 0.86g/t Au + U, ETR

### Gameleira

**100 Mt** à 0.7% Cu

### Pedra Branca

**2.4 Mt** à 0.94% Cu, 0.27g/t Au

### Alvo 118

**170 Mt** à 1.0% Cu, 0.3g/t Au Voir diapo 55

## Andes, Chili et Pérou

### Candelaria et Ojos des Salado

**501 Mt** à 0.54% Cu, 0.13g/t Au, 2.06g/t Ag

### Cerro Negro Norte

**377 Mt** à 32.8% Fe

### El Laco

**734 Mt** à 49.2% Fe

### Los Colorados

**943 Mt** à 34.7% Fe

### Mantoverde

**400 Mt** à 0.52% Cu, 0.11g/t Au

### Marcona

**~1940 Mt** à 55.4% Fe, 0.12% Cu

### Mina Justa

**347 Mt** à 0.71% Cu, 0.03g/t Au, 3.83g/t Ag

### Romeral

**454 Mt** à 28.3% Fe

### Santo Domingo et Iris

**514 Mt** à 0.31% Cu, 0.04g/t Au, 25.8% Fe

### El Espino

**123 Mt** à 0.66% Cu, 0.24g/t Au





# Afrique

## Phalaborwa, Afrique du Sud

~ 1200 Mt à 0.59 wt.% Cu

## Kitumba, Zambie

38.8 Mt à 2.2% Cu, 222 ppm Co, 0.03g/t Au, 0.9g/t Ag, 27 ppm U

## Guelb Moghrein (Akjoujt),

### Mauritanie

31.3 Mt à 0.92% Cu, 0.69g/t Au (réserves)

## Vergenoed, Afrique du Sud

122 Mt fluorine, 42% Fe (+ETR)

# Asie

## Bayan Obo, Chine (réserves)

57.4 Mt à 6% ETR<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ; 2.2 Mt à 0.13% Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

1500 Mt à 35% Fe

## Dahongshan, Chine

458 Mt à 41% Fe; 1.3 Mt à 0.78% Cu + (16t Au, 141t Ag, 18,156t Co, 2.1t Pd+Pt)

## Lala, Chine

163 Mt à 14% Fe, 1.02% Cu, 0.02% Mo, 0.17 g/t Au

## Luodang, Chine, 73.5 Mt à 15% Fe, 0.8%Cu, 0.16g/t

Au, 1.87g/t Ag, 0.02% Co, 0.02% Mo, 0.14% ETR

## Yinachang, Chine, 20 Mt à 41.9-44.5% Fe;

15 Mt à 0.85-0.97% Cu + ETR (~1127ppm)

## Washan, MLYRMB, Chine, ~214 Mt à 50% Fe

## Khetri, Indes, 140 Mt à 1.1-1.7% Cu, 0.5g/t Au

## Sin Quyen, Vietnam, ~50 Mt à 0.9% Cu, 0.4g/t Au

## Chador-Malu, Iran, 400 Mt à 55% Fe

## Divriği, Turquie, 133.8 Mt à 56% Fe, 0.5% Cu



Voir diapo 55

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



Ressources naturelles  
Canada

Natural Resources  
Canada

Canada

## Scandinavie

**Kiirunavaara (district de Kiruna, Norrbotten)**

**682 Mt à 47.5% Fe**

**Malmberget (district de Kiruna, Norrbotten)**

**271 Mt à 41.8% Fe**

**Kaunisvaara (Norrbotten)**

**164.9 Mt at 32.7%**

**Grangesberg (district de Bergslagen)**

**115.2 Mt at 40.2% Fe, 0.78% P (indicated)**

**Hangaslampi (gîte de Kuusamo)**

**0.4 Mt à 0.06% Co, 5.1g/t Au, ≤260 ppm U**

**Juomasuo (gîte de Kuusamo)**

**2.3 Mt à 0.13% Co, 4.6g/t Au, ≤260 ppm U**

**Hannukainen (district de Pajala)**

**187 Mt à 30.0% Fe, 0.18% Cu, 0.11g/t Au**

**Kaunisvaara (réserves) (district de Pajala)**

**164.9 Mt à 32.7% Fe**

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



## États-Unis

**Blackbird (ceinture de Co de l'Idaho)**

**16.8 Mt à 1.04 g/t Au, 0.73% Co, 0.14% Cu**

**Boss (SE du Missouri)**

**40 Mt à 0.83% Cu, 0.035% Co (historique)**

**Pea Ridge (SE du Missouri)**

**160.6 Mt à ~ 53-55% Fe + 0.2Mt à 12% ETR**

**Coles Hill (Virginie; ressources indiquées)**

**119 Mt à 0.056% U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>**



## Mexique

**Peña Colorada**

**300 Mt à 50-60% Fe**

Voir diapo 55



# Canada

## Zone magmatique du Grand lac de l'Ours (Province de l'Ours, TNO)

### NICO (réserves; Ours)

**33 Mt** à 1.02g/t Au, 0.12% Co, 0.14% Bi,  
0.04% Cu

### Sue Dianne (Ours)

**8.4 Mt** à 0.80% Cu, 0.07 g/t Au, 3.2g/t Ag

## Province de Grenville

### Marmoraton (Ontario)

**28 Mt** à 42% Fe

### Kwyjibo (Québec)

ETR lourdes

## Central Mineral Belt, Labrador

### Michelin

**37.5 Mt** à 0.10 %  $U_3O_8$

### Upper C, lac Moran

**6.92 Mt** at 0.29 % U (indiquée) +  
**2.84 Mt** at 0.20% U (inférée)



NICO



Great Bear

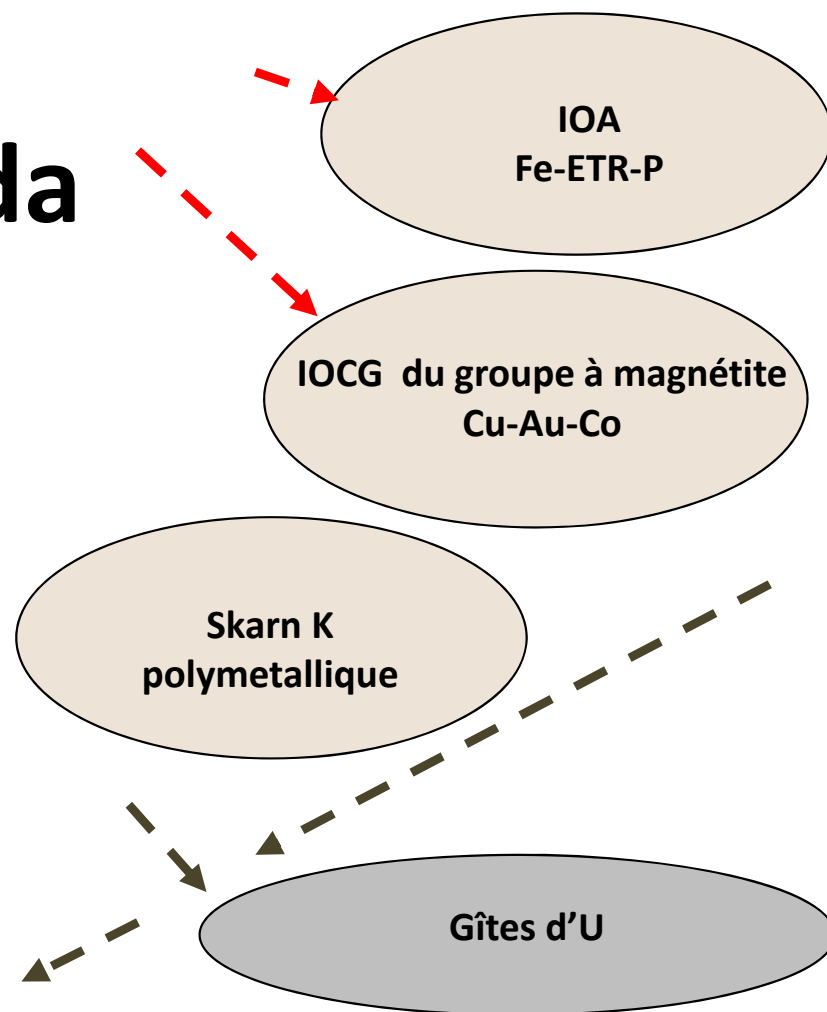


Kwyjibo (photo S. Perreault)

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Répartition mondiale État des lieux au Canada Âges



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# Distribution des gîtes et prospectes IOAA



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

Sources bibliographiques à la diapo 55

Modifié de Corriveau 2007; Porter 2010a



# Ressources canadiennes et régions d'intérêt

- Gîtes IOCG <33Mt
- Gîtes et prospects U<sub>albitites</sub>
- Prospects IOCG, IOA
- Prospects d'intérêt
- Mine Cu-Au d'intérêt

## NICO (réserves)

**33 Mt** à 1.02g/t Au, 0.12% Co, 0.14% Bi, 0.04% Cu

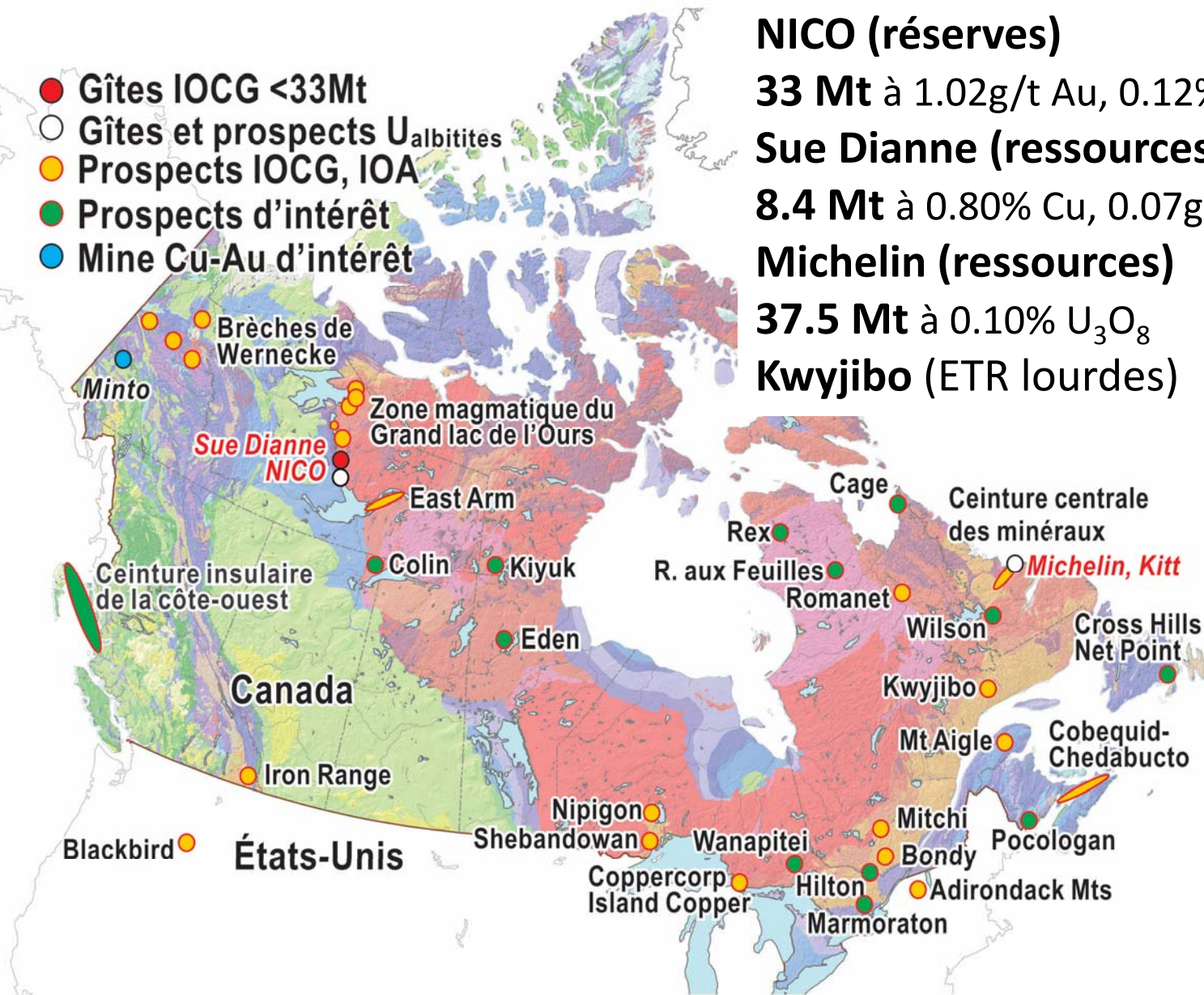
## Sue Dianne (ressources)

**8.4 Mt** à 0.80% Cu, 0.07g/t Au, 3.2g/t Ag

## Michelin (ressources)

**37.5 Mt** à 0.10% U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>

## Kwyjibo (ETR lourdes)



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

Sources à la diapo 55

Modifié de Corriveau 2007  
Corriveau et al. 2010a





# Références (incluant localisation, ressources et réserves des gîtes)

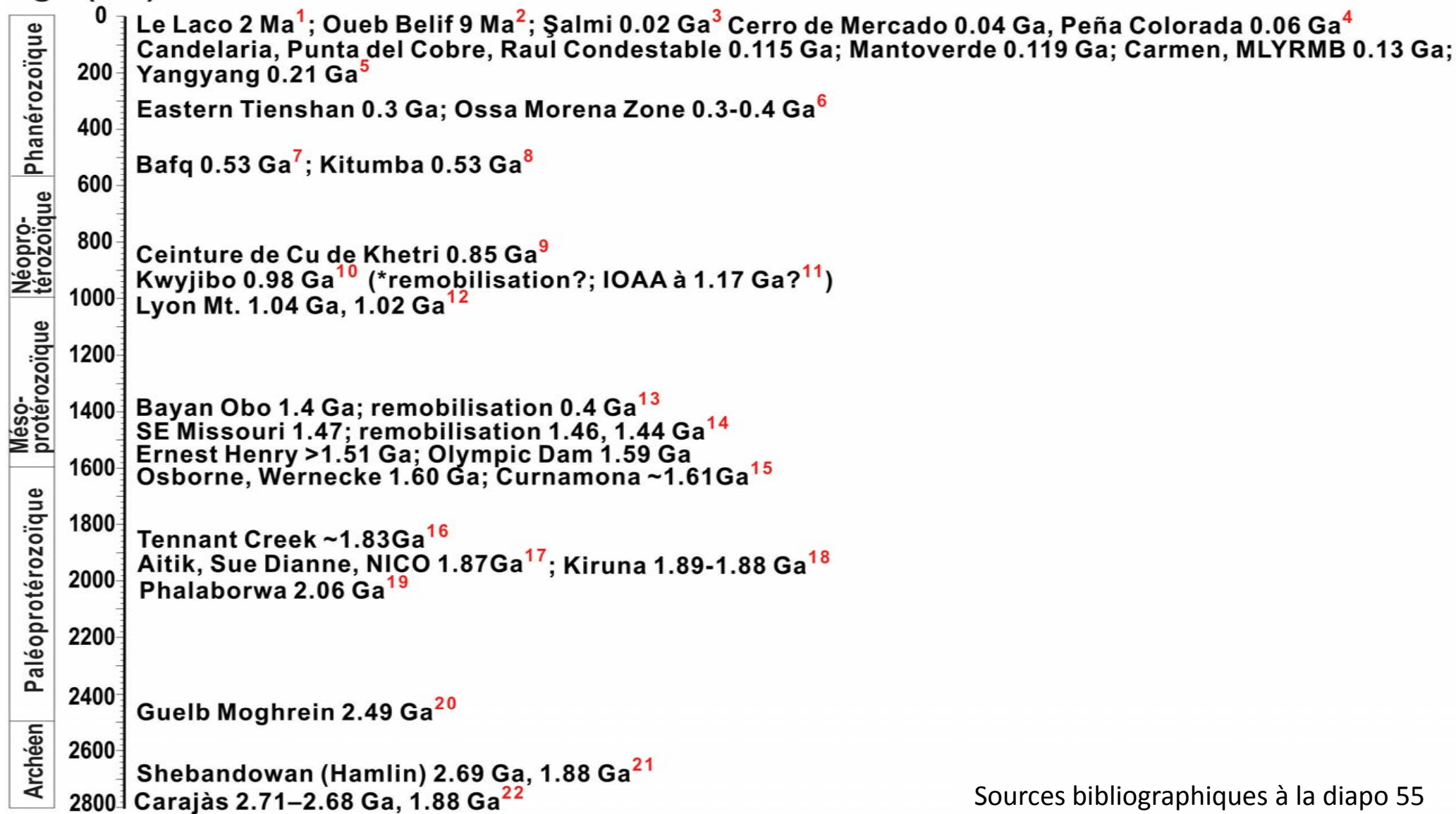
Jones 1974; N9GBYBGMR 1983 (en chinois, cité par Zhao et al. 2017b); Lyons 1988; Porto da Silveira et al. 1991; Skirrow 2000, 2010; Vanhanen 2001; Wang et Williams 2001; Knight et al. 2002; Oyarzun et al. 2003; Hitzman et Valenta 2005; Williams et al. 2005; Belperio et al. 2007; Benavides et al. 2007; Davidson et al. 2007; Doebrich et al. 2007; Béziat et al. 2008; Hennessey et Puritch 2008; Wu 2008; Polito et al. 2009; Chen et al. 2010; Chinalco 2010, 2012a, b; Clark et al. 2010; Daliran et al. 2010; Groves et al. 2010; Kuşcu et al. 2010; Lobo-Guerrero 2010; Porter 2010a, b; Rieger et al. 2010; Williams 2010a, b; Baker et al. 2011, 2014; Zulinski et Osmani 2011; Corona-Esquivel et al. 2011; Chen et Zhou 2012; Dragon Mining 2012, 2014; Puritch et al. 2012a, b; Sangster et al. 2012; Turner 2012; CAP 2013; Chen 2013; Décrée et al. 2013; First Quantum Minerals 2013; LKAB 2013; Nold et al. 2013, 2014; Oz Minerals 2013, 2014a, b, 2017; Potter et al. 2013; Slack 2013; Barton 2014; Burgess et al. 2014; Capstone Mining Corp 2014; Chinova Resources 2014, 2017; Corriveau et al. 2014; Couture et al. 2014; Desrochers 2014; Duncan et al. 2014; Evans 2014; Intrepid Mines 2014; Ismail et al. 2014; Lopez et al. 2014; Waller et al. 2014; Yilmazer et al. 2014; BHP Billiton 2015; Fan et al. 2015; Graupner et al. 2015; GTK 2015; Li (X.) et al. 2015; Montreuil et al. 2015, 2016a, b, c; Paladin Energy 2015a, b; Perreault et Lafrance 2015; Rex Minerals 2015; Seo et al. 2015; Woolrych et al. 2015; Day et al. 2016; Martinsson et al. 2016; Metal X 2016; Veríssimo et al. 2016; Babo et al. 2017; BHP 2017; Camprubí et González-Partida 2017; Cudeco 2017; Zhao et al. 2017a, b; Zhu et al. 2017; Corriveau et al. sous presse

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Âges des gîtes et districts

Âge (Ma)



Sources bibliographiques à la diapo 55

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# Âges des gîtes et districts

- 1 - Nyström et Henriquez 1994
- 2 - Decrée et al. 2013
- 3 - Yilmazer et al. 2014
- 4 - Corona-Esquivel et al. 2011
- 5 - Mathur et al. 2002; Sillitoe 2003; Gelcich et al. 2005; Mao et al. 2011; Zhou et al. 2013; Seo et al. 2015
- 6 - Carriedo et Tornos 2010; Huang et al. 2013
- 7 - Torab et Lehmann 2007; Stosch et al. 2011
- 8 - Porter 2010a
- 9 - Knight et al. 2002
- 10 - Gauthier et al. 2004; Clark et al. 2005, 2010
- 11 - Corriveau et al. 2007
- 12 - Selleck et al. 2004; Valley et al. 2009, 2011
- 13 - Fan et al. 2014, 2015
- 14 - Aleinikoff et al. 2016; Neymark et al. 2016; Day et al. 2017
- 15 - Mark et al. 2000; Williams et Skirrow 2000; Gauthier et al. 2001; Thorkelson et al. 2001
- 16 - Skirrow 2000
- 17 - Gandhi et al. 2001; Wanhainen et al. 2003; Montreuil et al. 2016a, c
- 18 - Romer et al. 1994
- 19 - Reischmann 1995
- 20 - Kolb et al. 2010
- 21 - Tallarico et al. 2004; Moreto et al. 2015
- 22 - Forslund 2012

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Contextes géodynamiques

## Architecture lithosphérique

## Relations magmatisme-métasomatisme



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



Ressources naturelles  
Canada

Natural Resources  
Canada

Canada



# Contextes géodynamiques: continentaux!

- Intra-arcs et bassins d'arrière arc continentaux, bassins d'inversion et d'effondrement orogénique, rifts intracratoniques et autres contextes continentaux qui peuvent acquérir des gradients géothermiques anormalement élevés tel que par la mise en place de magmas mafiques à la base de la croûte ou par du fluage ductile dans la croûte profonde (channel flow)
- Arcs à la marge de cratons archéens communément fertiles
- Au-dessus de discontinuités trans-crustales majeures
- Structures régionales en extension à proximité ou éloigné mais actives lors du magmatisme et du métasomatisme; l'extension peut se faire au sein d'un environnement largement en compression
- Au sein d'environnements volcaniques ou plutoniques oxidés, de formation de fer préexistantes d'origine sédimentaire ou métasomatique



Hitzman et al. 1992; Hitzman 2000; Williams et al. 2005; Skirrow 2008, 2010; Groves et al. 2010; Porter 2010a, b; Chen et al. 2013; Richards et al. 2017; T. Rivers inédit

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Architecture lithosphérique

Voies crustales canalisant fluides et magmas à travers la lithosphère

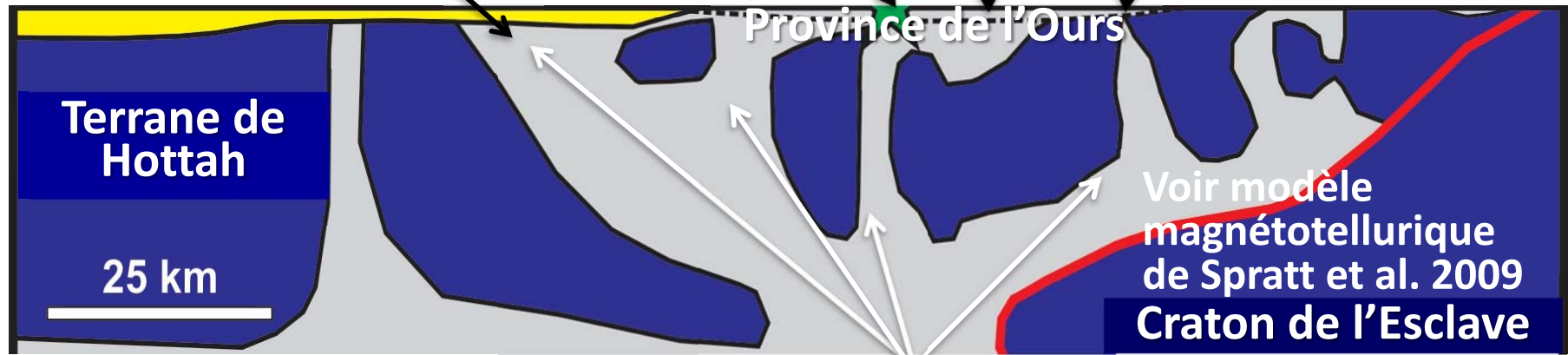
Exemples de la zone magmatique du Grand lac de l'Ours

Peu ou pas de métasomatisme et de minéralisation

Zones à IOCG (NICO, Sue Dianne)  
Corridors d'albitite  
Lamprophyre (Echo Bay)  
Métasomatisme étendu et intense  
Systèmes volumineux

Faïlle majeure (de Wopmay)  
verticale et butant contre  
lithosphère archéenne:  
présence de corridors  
d'albitites + IOA locaux

Sous couverture sédimentaire et non exploré  
(voir anomalies dans Hayward et al. 2013)



Discontinuités géophysiques surface-manteau focalisant l'ascension des magmas, des fluides et des flux de chaleur à travers la croûte

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



Ressources naturelles  
Canada

Natural Resources  
Canada

Canada



# Contextes précambriens

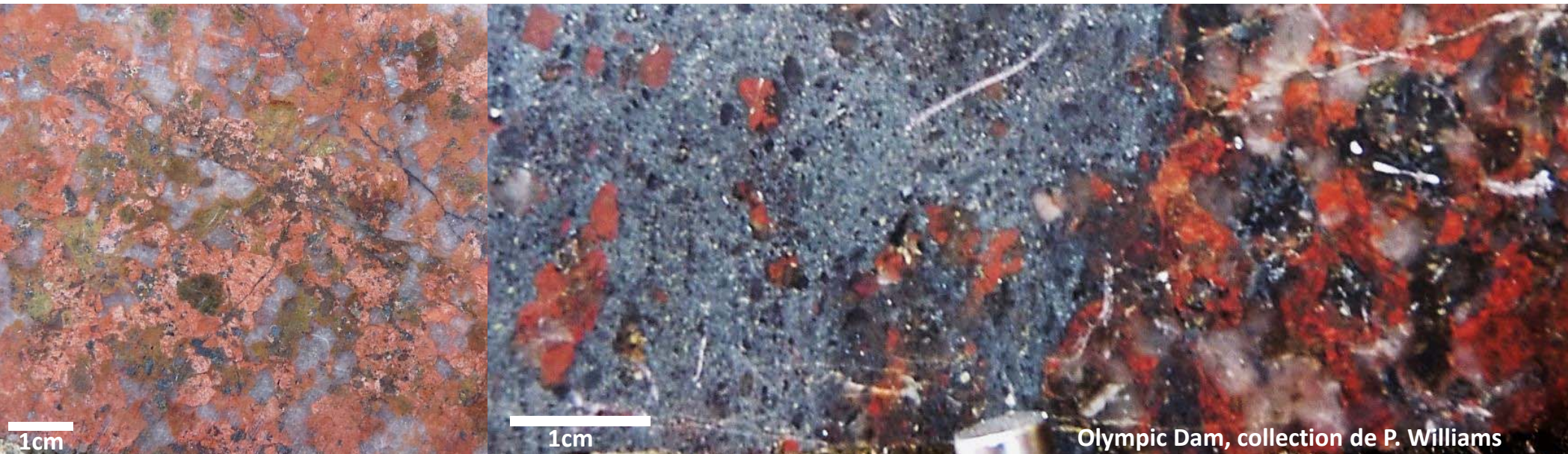
**Au Précambrien, la nature des contextes géodynamiques continentaux générant les divers districts IOCG et affiliés demeurent communément incertains**

## **Plusieurs modèles conflictuels proposés pour Olympic Dam**

- **Rift anorogénique** (Allen et McPhie 2002)
- **Bassin d'arrière arc continental** (Betts et Giles 2006; Wade et al. 2006; Kositcin 2010)
- **Subduction évoluant vers un panache mantellique** (Betts et al. 2009)
- **Délamination lithosphérique** (Creaser 1996; Skirrow 2010)
- **Panache mantellique + fusion d'un manteau lithosphérique sub-continental** (Groves et al. 2010; Thiel et Heinson 2013)
- **Contexte intracratonique post-collisionnel** (Verbaas et al. 2018)

# Métasomatisme versus magmatisme

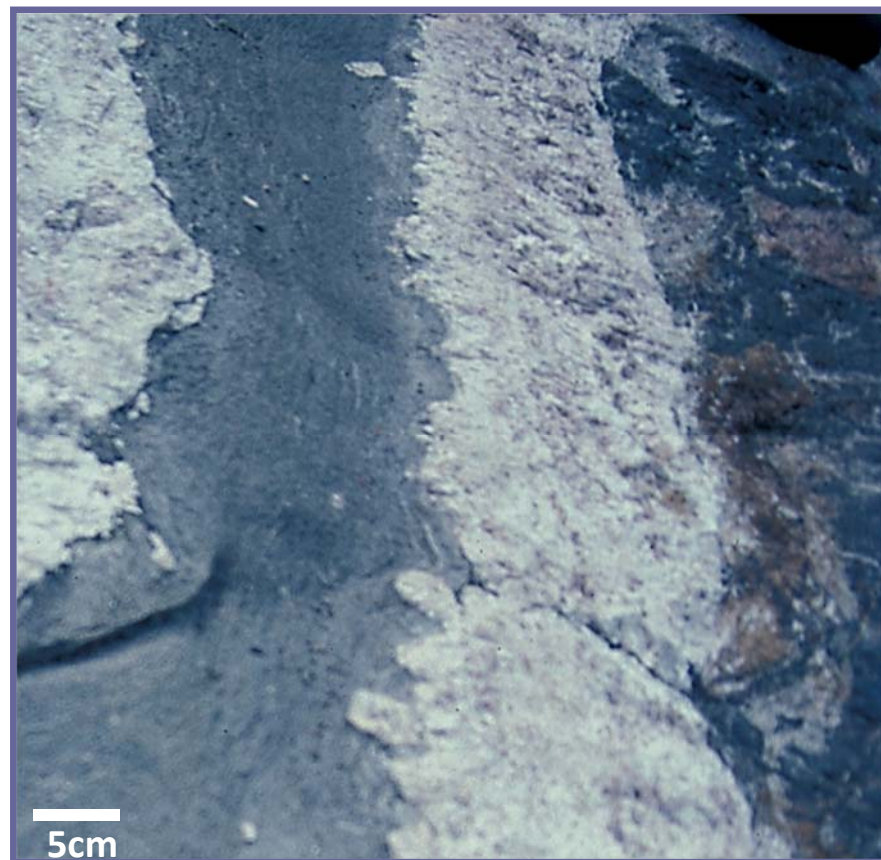
- Liens étroits à l'échelle régionale avec du magmatisme de haute température menant à la formation de magmas de type I, calco-alcalins, shoshonitiques et de type A.
- Pas de lien avec le dégazage d'une intrusion en particulier (cf. gîtes porphyriques) mais des intrusions communément porphyriques et sub-volcaniques peuvent servir de nucléus pour le développement des systèmes régionaux et être proximales à la minéralisation, un contexte distinct de celui des systèmes porphyriques où les cellules hydrothermales sont génétiquement et spatialement liées à une intrusion mère





# Magmatisme

- Magmatisme mafique tholéiitique à la base de la croûte et remontant peu vers la surface (intrusions, dykes, zones de mélange de magmas)
- Andésites communément associées aux gîtes IOA mais souvent masquées par de l'altération K et cartographiées comme des rhyolites à proximité des gîtes IOCG
- Magmatisme acide et oxydé (type I à A) évolue vers des batholithes granitiques pré à post systèmes minéralisés
- Répartition et extension des systèmes s'apparentent à celles des intrusions contemporaines au métasomatisme



Zones de mélange de magmas au sein d'un dyke recoupant une brèche à magnétite sur la propriété de Kwjibo

Hildebrand 1986; Creaser 1996; Corriveau et al. 2007; Clark et al. 2005, 2010; Williams et al. 2005; Corriveau 2007; Mumin et al. 2007, 2010; Lafrance 2009; Skirrow 2010; Montreuil et al. 2016a, c; Ootes et al. 2016; Sun et al. 2017

Voir modèle magmatique des vastes provinces de magmatisme felsique de Bryan et al. 2010

# Magmas mafiques ou alcalins contemporains au métasomatisme

- Un indice pour une interconnectivité manteau-surface et pour des sources externes de chaleur et de métaux
- Carbonatites peuvent être associées aux gîtes IOA (Bayan Obo; HT)
- Intrusions alcalines au sein des albitites minéralisées en U et Au-U-Co (ex. Horst de Romanet; BT)



Fénites et apatite



Carbonatites

Fénites,  
Eden Lake  
(Manitoba)



Mumin et Corriveau 2004; Corriveau 2007

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

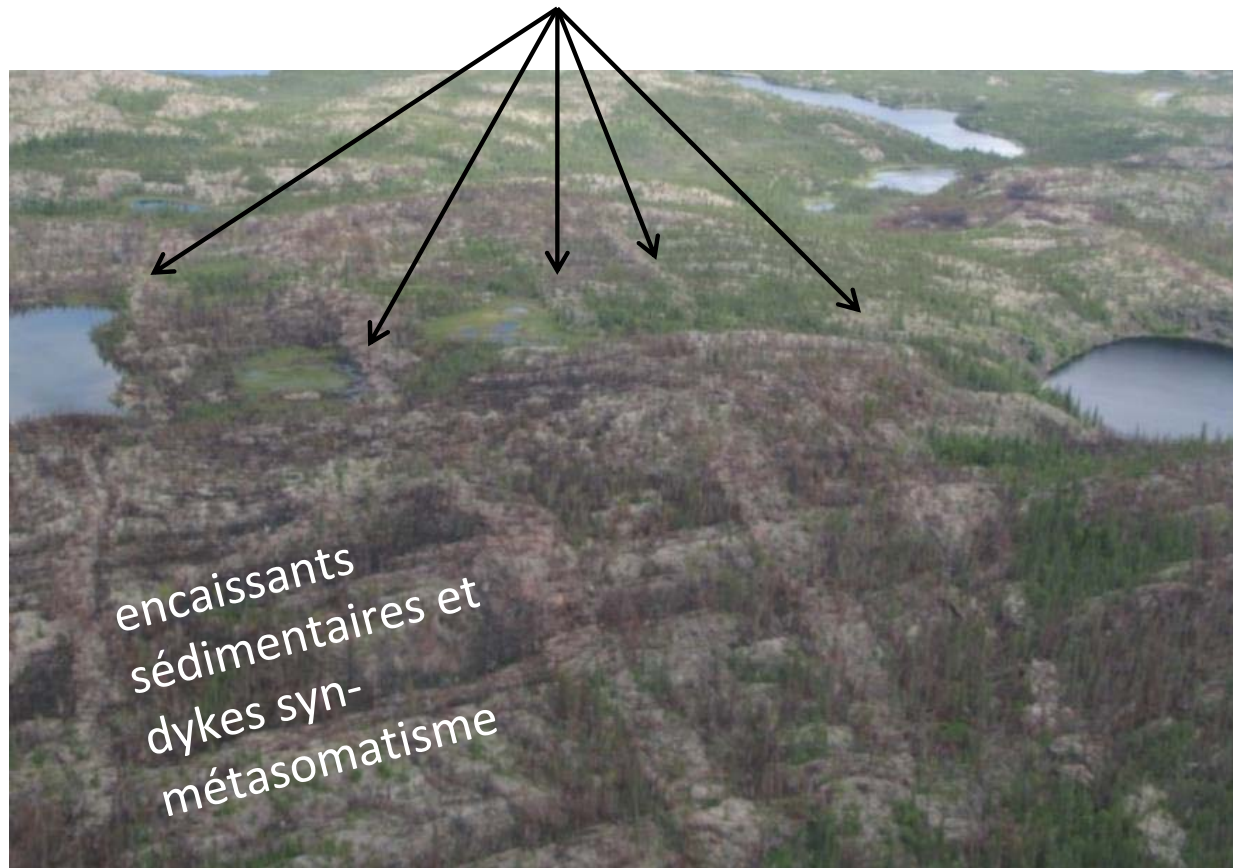




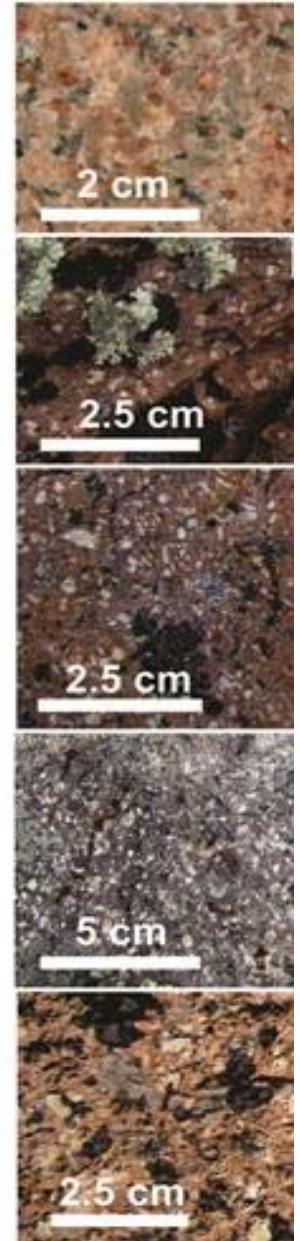
# Intrusions sub-volcaniques et essaims de dykes

## Sources externes et répétées de chaleur, de fluide et de métaux

Essaim de dykes post-minéralisation orthogonaux à des dykes syn-tectoniques parallèles aux zones de brèches d'albitites et encaissants sédimentaires, sud de la zone magmatique du Grand lac de l'Ours

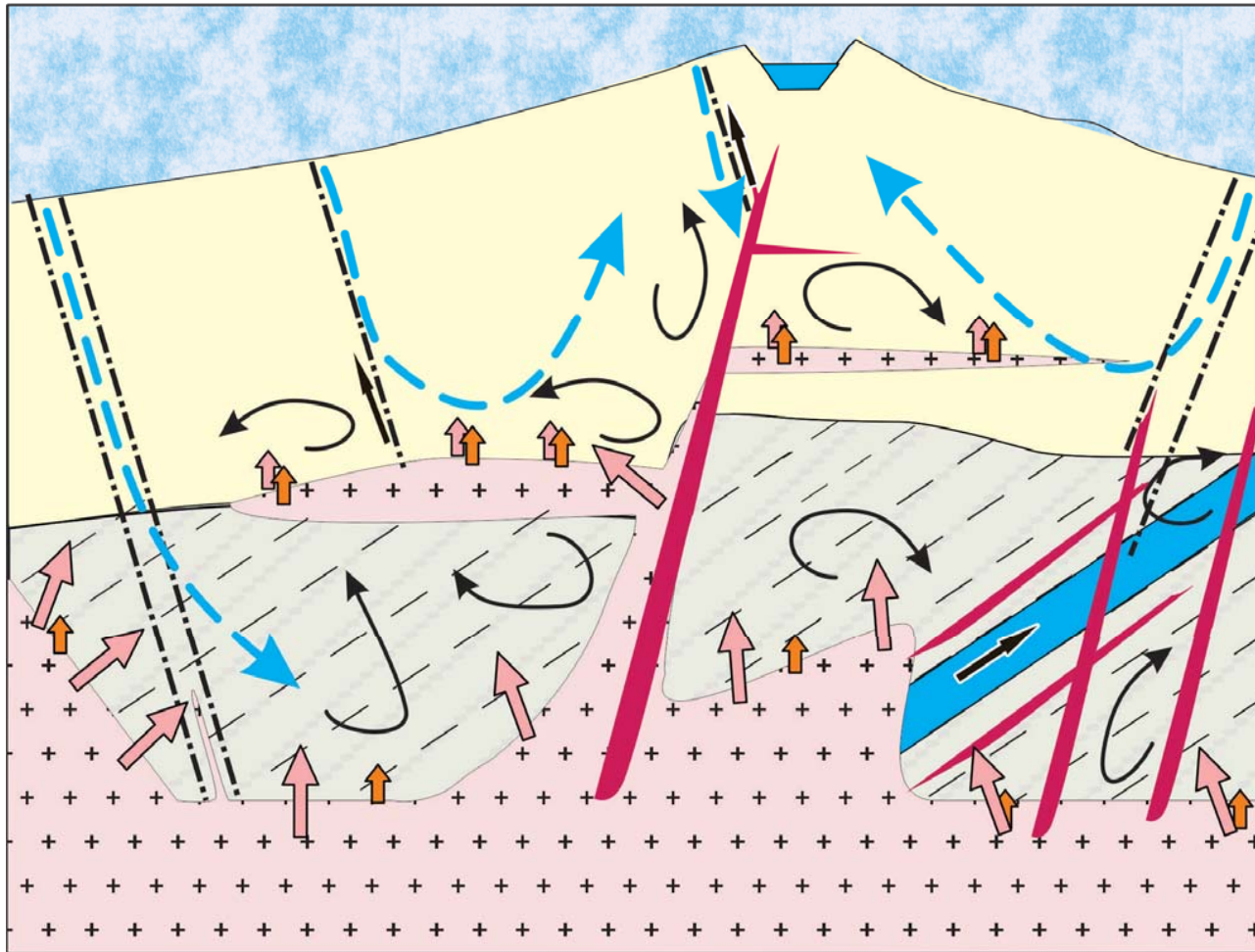


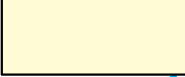


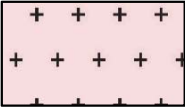

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





Intrusions syn à post- altération (ex., zone magmatique du Grand lac de l'Ours; Montreuil et al. 2016a, c)

# Sources, conduits et circulation des fluides



- Volcans 
- Lacs de caldeira, dépôts marins (exhalites, stromatolites) 
- Bassin sédimentaire et socle varié 
- Intrusions sub-volcaniques au sein de séquences volcaniques et volcanoclastiques 
- Essaims de dykes 
- Effondrement de caldeira, soulèvement différentiel et exhumation pré- et syn-métasomatisme

Exsolution de fluides fortement salins  et ultérieurement K   
 Grandes chambres magmatiques dans la croûte moyenne

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



Ressources naturelles  
Canada

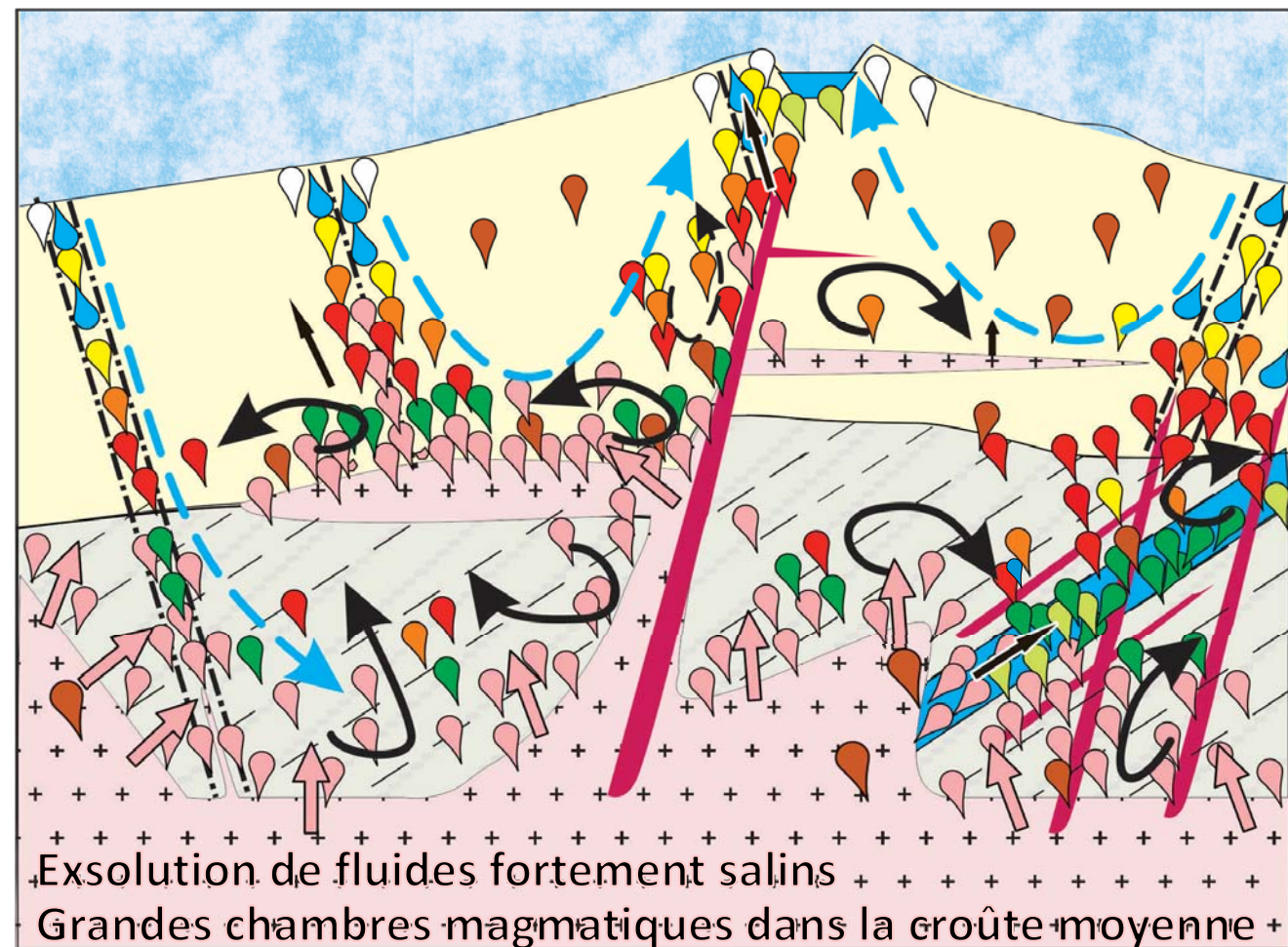
Natural Resources  
Canada

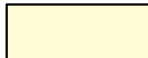










1km  
5km

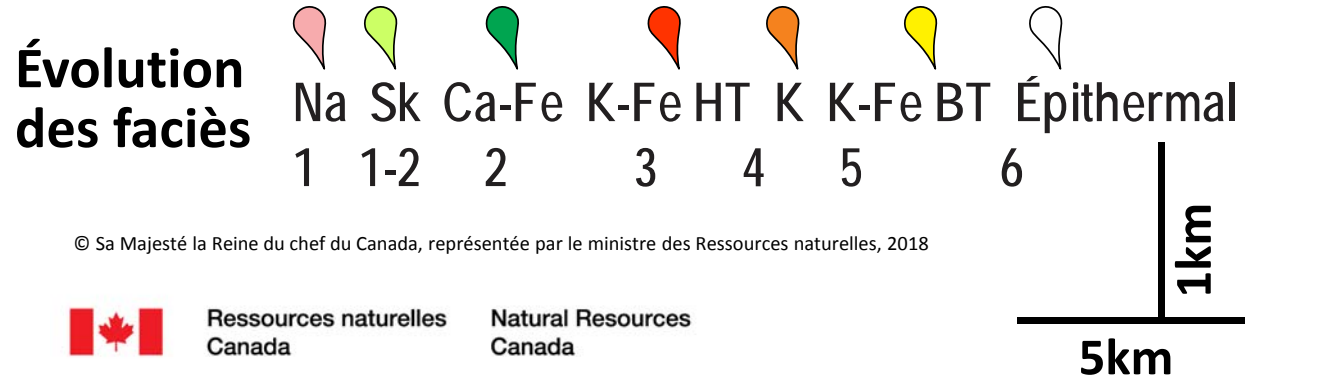
Canada 



# Sources, conduits, circulation et évolution des fluides



- Séquences volcaniques 
- Carbonates, évaporites 
- Socle 
- Intrusions, dykes  
- Fluides météoriques et de bassins  
- Fluide orthomagmatique K 
- Remontée de fluides hyper-salins = accroît le gradient thermique  
- Circulation des fluides 



**Les colonnes de fluides salins prennent leur origine au toit de larges chambres magmatiques**

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

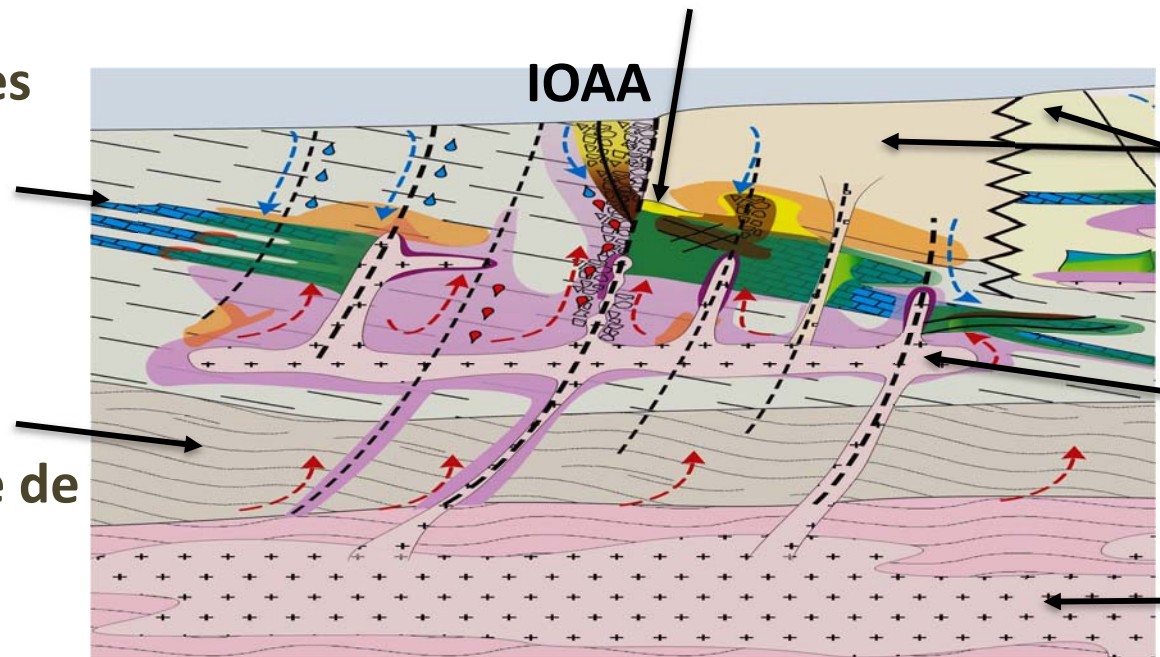
# Composantes des systèmes

Étendue des systèmes IOAA faible à modérée en surface ( $\leq 1$  km) mais les toits épithermaux peuvent être très étendus ( $\leq 1 - 5$  km)

Extension significative des systèmes en profondeur ( $\leq 35 \times 15$  km) et le long des corridors de failles

**Séquences carbonatées très réactives et fortement altérées**

**Bassin sédimentaire antérieur non ou peu métamorphisé: source de fluides et de métaux souvent distincts des fluides magmatiques**



**Séquences volcaniques**

**Intrusions hypabyssales et essaims de dykes**

**Chambres magmatiques**

**Sources essentielles de chaleur pour la circulation des fluides; sources de fluides salins; sources de métaux complémentaires à ceux des séquences sédimentaires**

Williams et al. 2005; Mumin et al. 2010; Porter 2010a, b; Skirrow 2010; Reid et Fabris 2015

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



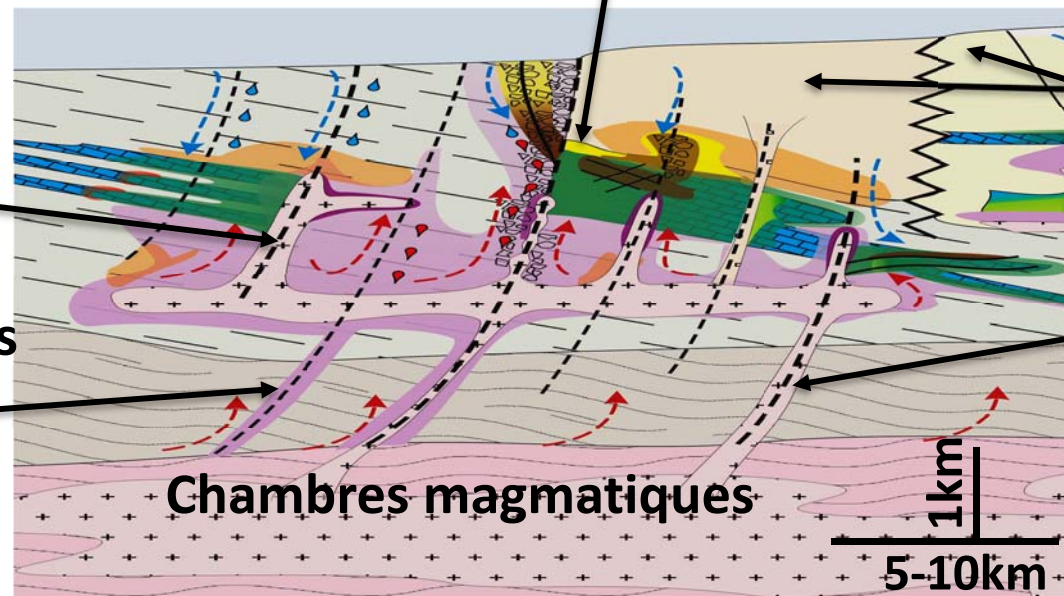


# Magmatisme: sources de fluides et de chaleur

Intrusions syn-tectoniques au sein de corridors d'albitites bréchifiées



Zonation au sein d'un système se développant préférentiellement dans une séquence sédimentaire avec carbonates



Séquences volcaniques

Failles comme conduits pour les fluides salins issus des chambres magmatiques

Failles comme conduits pour les magmas

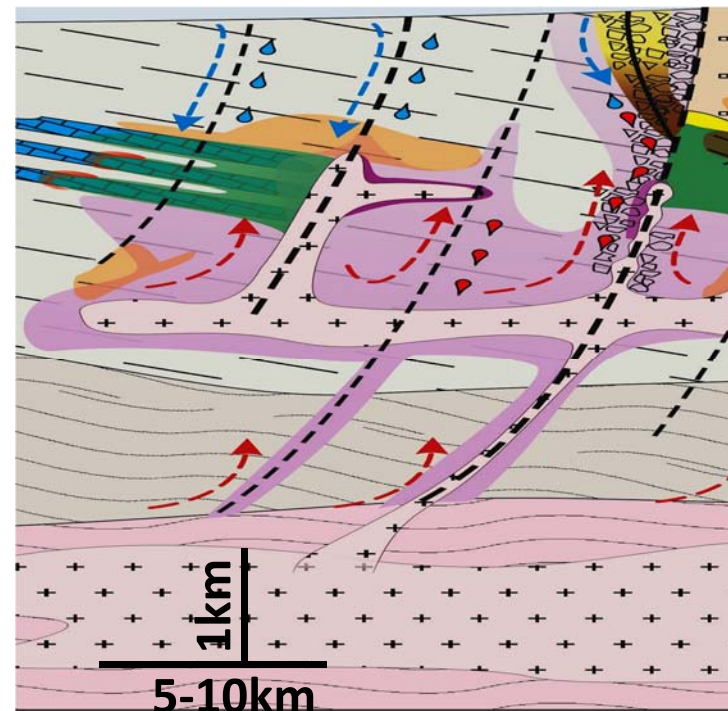
Cycles d'intrusions subvolcaniques, dykes porphyriques, effondrements volcaniques, soulèvement, exhumation = réalimentations soutenues magmas-fluides-métaux + mélange de fluides de sources variées s'incorporant à la colonne de fluides + développement systémique altération-brèche-minéralisation

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Processus clés

- Ascension de volumes importants de fluides salins avec coalescence des cellules hydrothermales prenant globalement naissance au dessus de vastes chambres magmatiques
- Transport efficace chaleur-fluides-métaux trans-lithosphère menant à des gradients géothermiques élevés (150-800°C)
- Évolution physico-chimiques des fluides par réactions fluides-encaissants et par apport soutenu et mélanges de fluides de compositions, degrés d'oxydation et températures divers
- Développement de gradients physico-chimiques extrêmes à travers la croûte supérieure
- Dissolution ('lessivage')-reprécipitation couplée, bréchification et minéralisation
- Éléments facilitateurs: porosité, perméabilité, réactivité





# Empreintes géologiques du métasomatisme: Faciès d'altération et associations métallifères

Ex., Marschik et Fontboté 2001; Benavides et al. 2007; Mumin et al. 2010; Rieger et al. 2010; Skirrow 2010; Williams 2010a, b

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Attributs des systèmes IOAA

- Origine métasomatique
- Roches précurseurs: volcaniques, sédimentaires, intrusives
- Métasomatisme intense, généralisé, d'évolution régulière et diagnostique et, lorsqu'intense, ultimement indépendant du type et de la composition de l'encaissant (sauf pour les carbonates)
- Changement de composition des précurseurs aux échelles régionales et des gîtes; volumes de roches transformées estimés allant jusqu'à 35 x 15 x 10 km (longueur x largeur x profondeur)
- Faciès d'altération: distinctifs, prévisibles, diagnostiques
- Altération: extensive, intense, sélective à généralisée, source de métaux, préparation du substrat et pièges métallifères
- Textures des protolites préservées à détruites; protolites communément difficilement identifiables

## Fluides modifiés (-Na)



Montée de  
fluides hypersalins

Canada



# Attributs métasomatiques IOAA

- Évolution spatiale et chronologique altération-bréchification-minéralisation régionale associée à la progradation, la surimposition, la juxtaposition, le télescopage, la permutation et la cyclicité des faciès d'altération
- Développement de trappes chimiques et structurales diverses
- Au sein d'un système, la minéralisation peut se retrouver à n'importe quel niveau stratigraphique, au sein d'encaissants de nature et d'âges différents
- Minéralisation au sein ou à proximité des faciès d'altération fertiles (K-Fe de HT et BT, Ca-Fe-Mg de BT)







# Altération sélective: textures préservées des précurseurs parfois difficile de remarquer la nature épigénétique de certaines unités



Andésite porphyrique hôte



Albitisation faible



Altération à magnétite

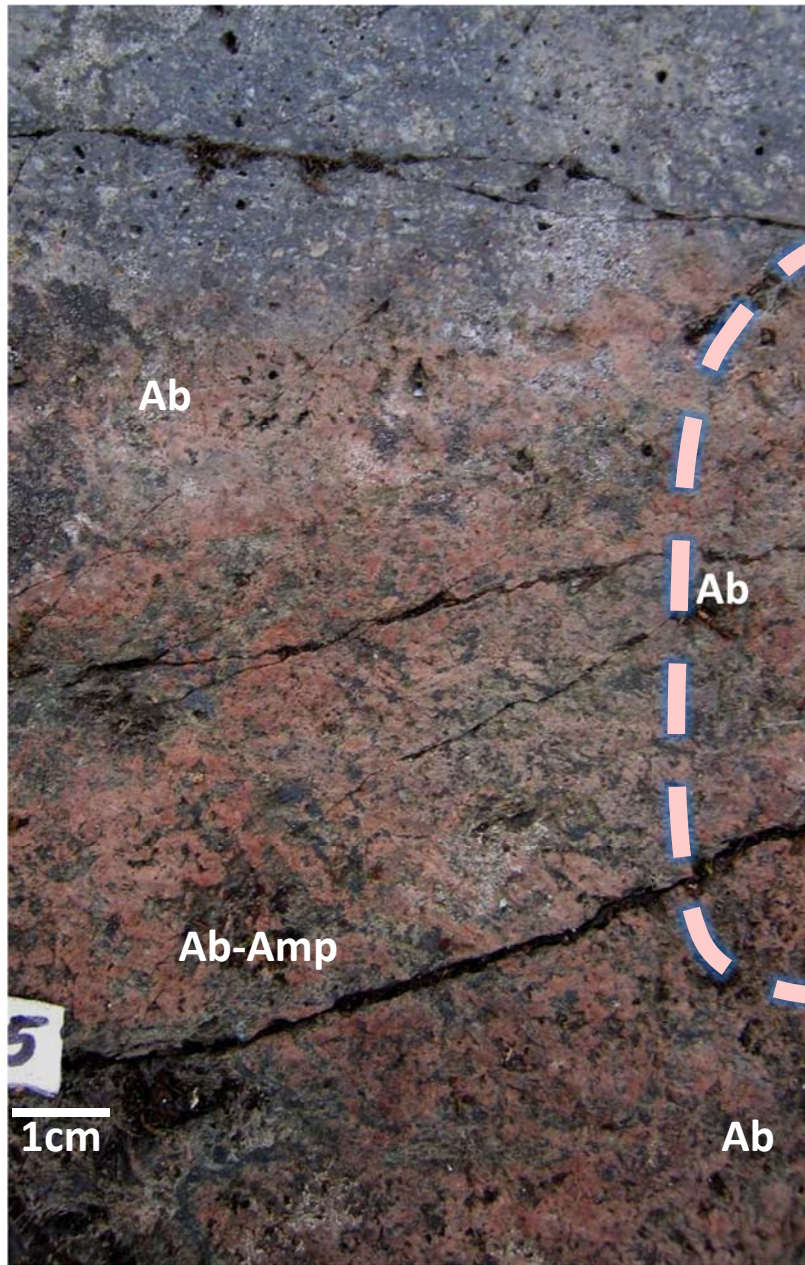


Altération à hématite

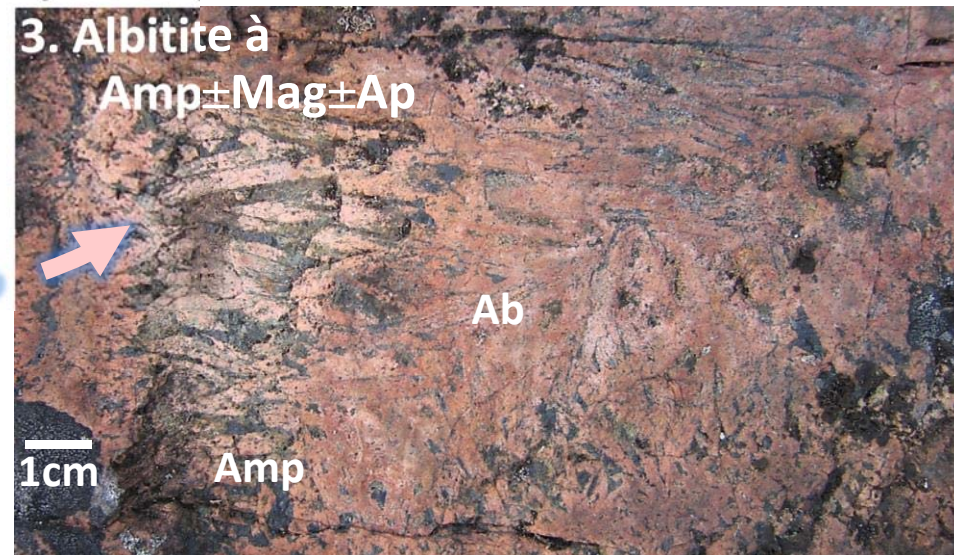
© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Métasomatisme généralisé



1. Précurseur volcanique
2. Albitisation avec îlots cm à grain fin à Ab-Amp (Na-Ca de HT) et îlots du précurseur (cm à m)
3. L'intensification de l'altération donne lieu à des pseudo-pegmatites Na-Ca-Fe à Ab-Amp-Ap-Mag

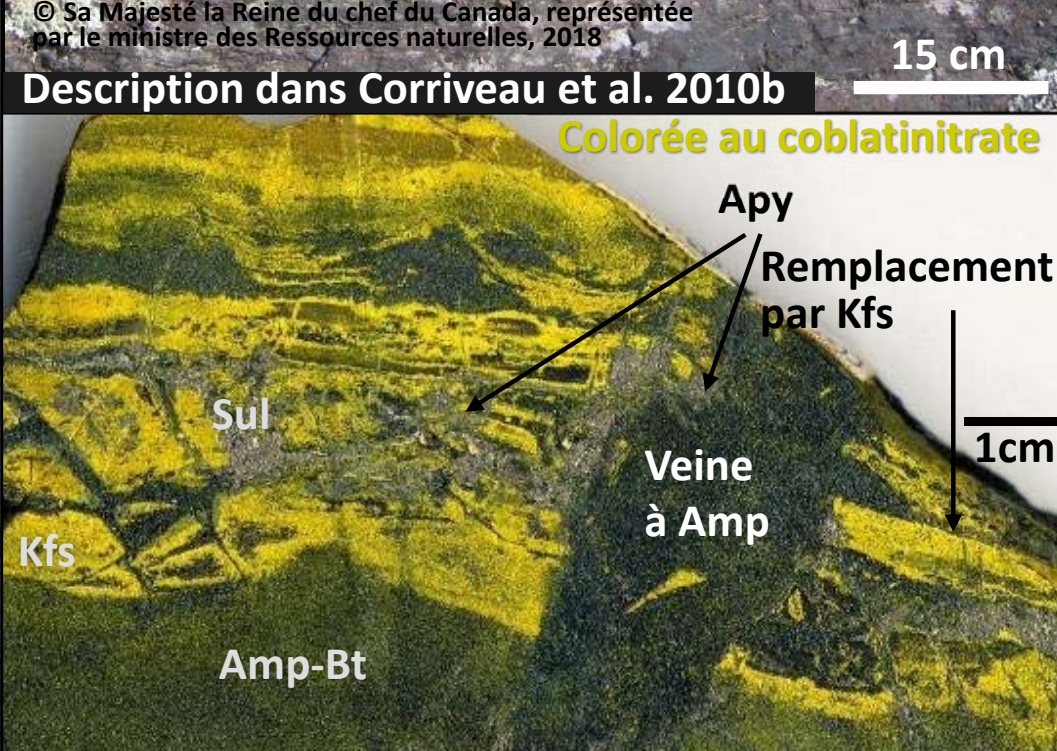
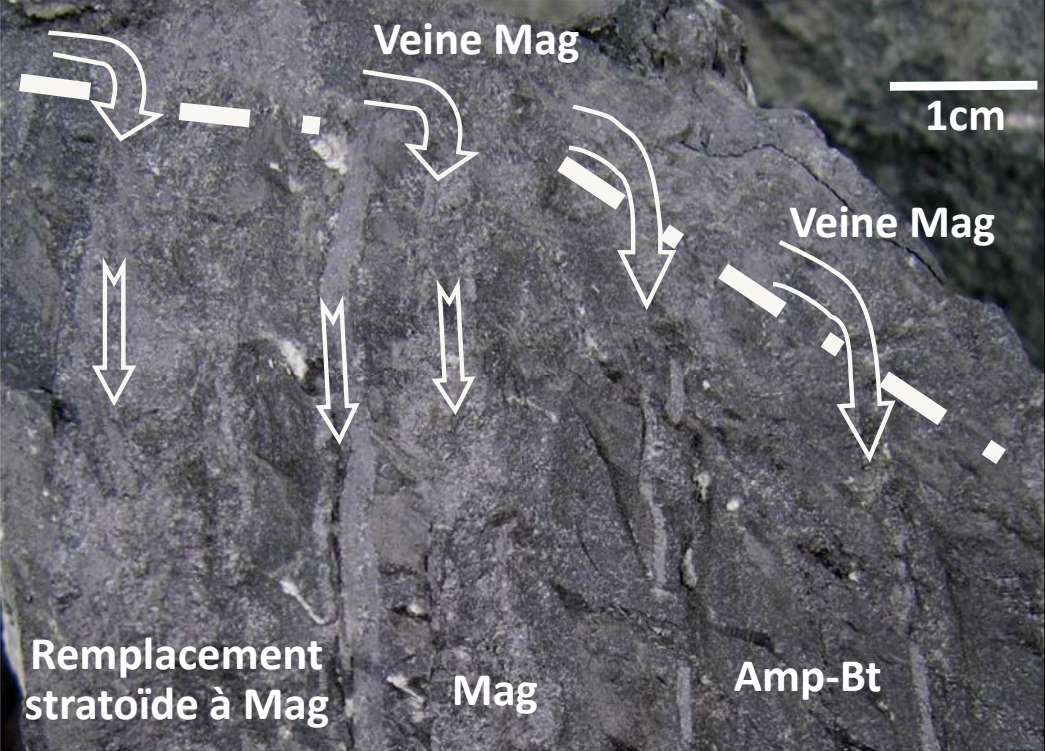
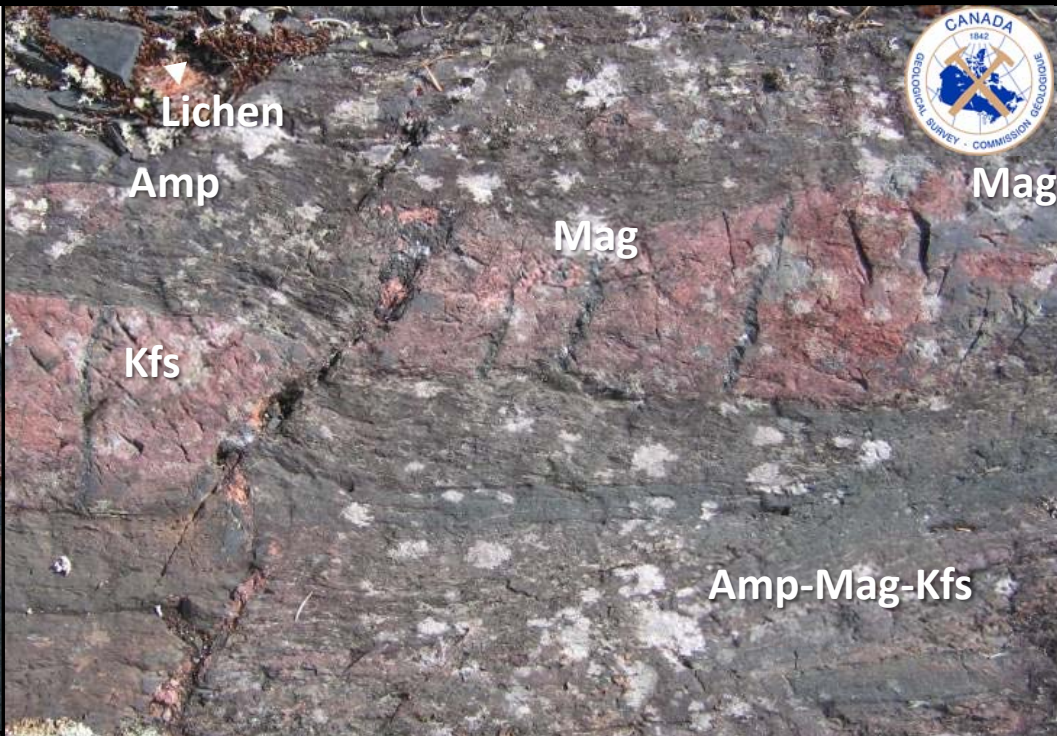
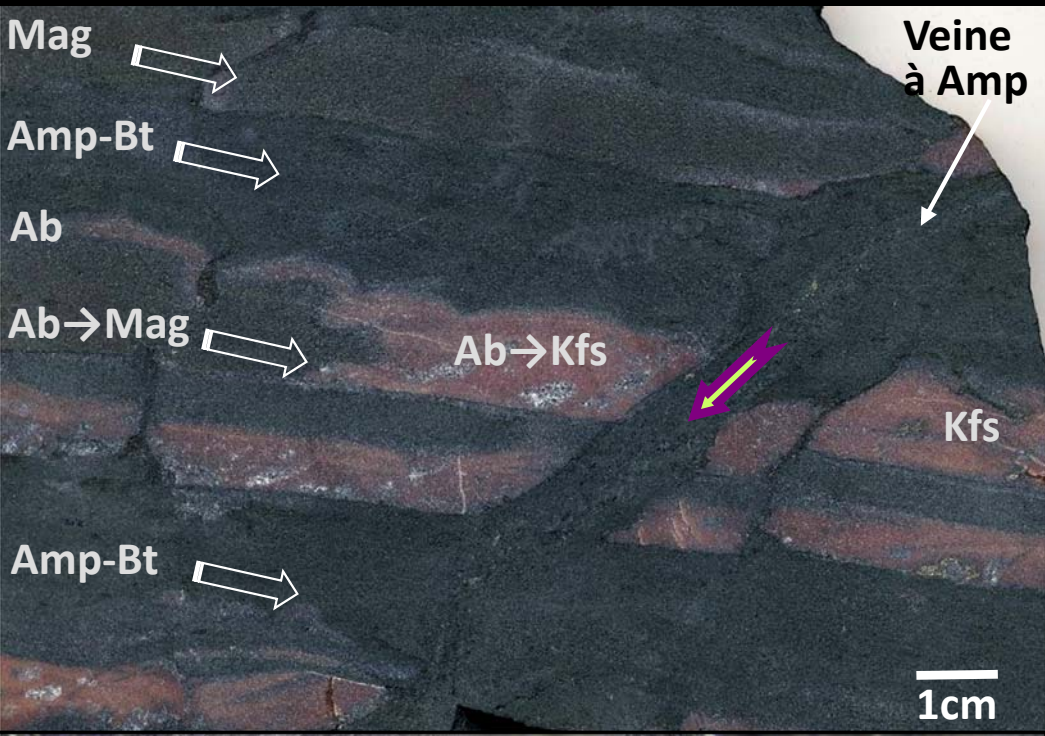


© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# Remplacement stratoïde, veines, brèches (NICO)

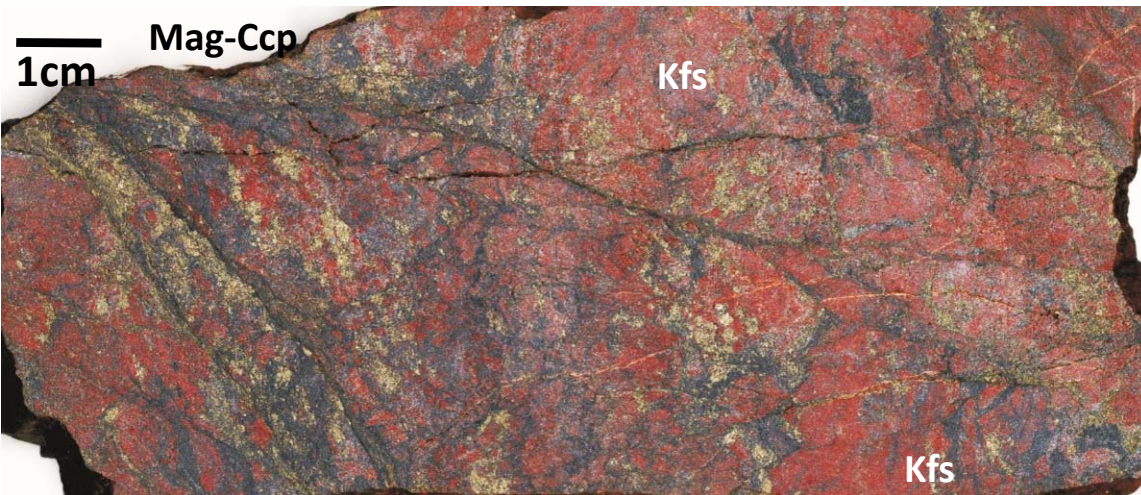




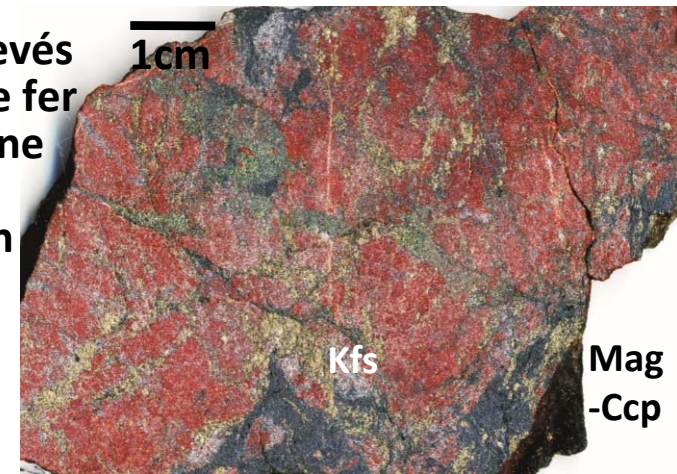
# Brèches à oxydes de fer et Kfs



**Métasomatisme K-Fe mène à la formation de brèches avec zones de remplacement**



**Contenus élevés en oxydes de fer et non pas une simple hématisation**



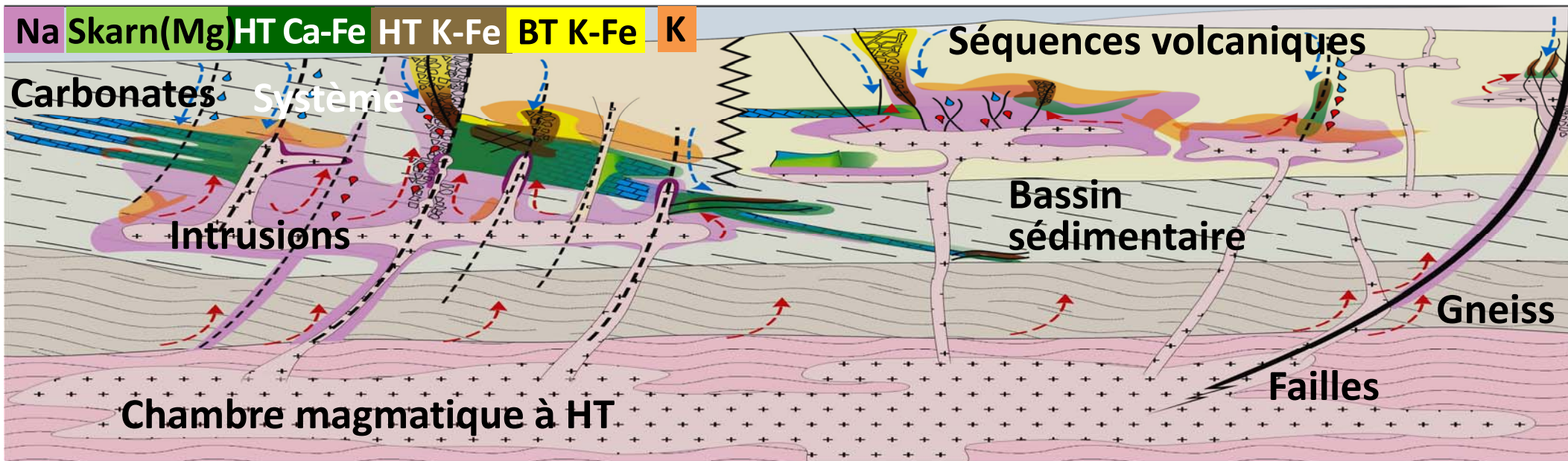
© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# Empreintes régionales

- Altération Na, skarn, Ca-Fe de HT, K-Fe de HT à BT, K, skarn K et Ca-Mg-Fe de BT diagnostique
- Suivis d'altération carbonatée, propylitique, phyllique et argillique de basse température et de silicification
- D'extension régionale  $\leq 35 \times 15 \times 10$  km (longueur-largeur-profondeur)
- Gîtes groupés en districts espacés de 30 à 50 km le long de provinces métallogéniques de 200 à 1500 km de long



Magmas mafiques (source de chaleur)

5-10km

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



Ressources naturelles  
Canada

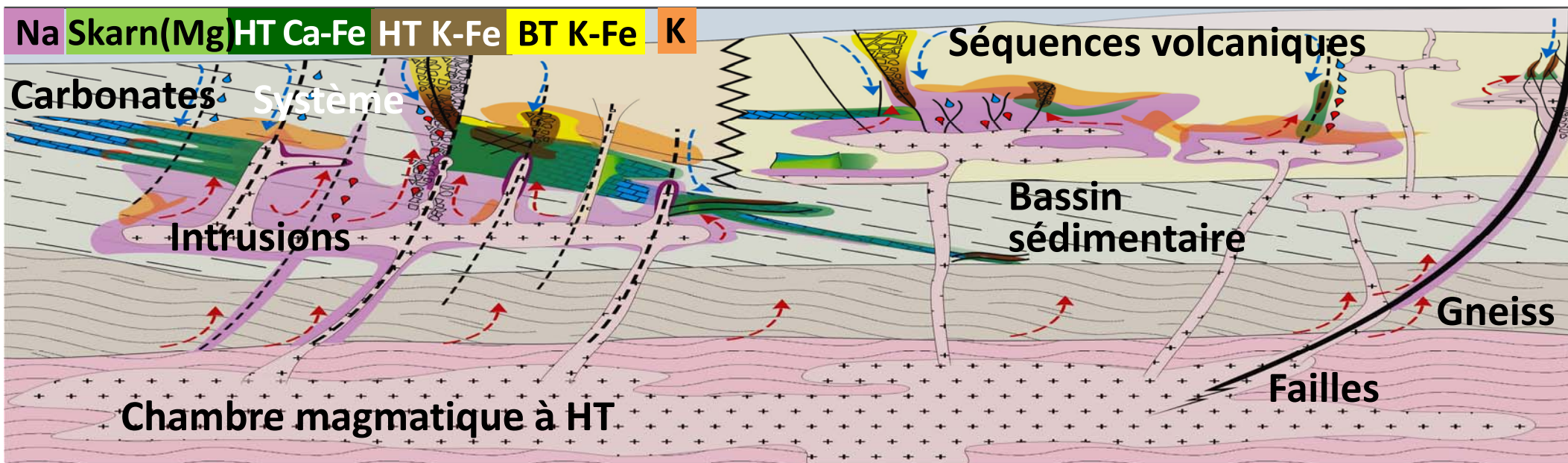
Natural Resources  
Canada

Canada



# Empreintes régionales

- Corridors d'albitites régionalement interconnectés le long de zones de failles ou au toit de séries d'intrusions sub-volcaniques; plusieurs sections sont bréchifiées, certaines sont remplacées par des faciès d'altération fertiles et minéralisés
- Faciès d'altération Ca-Fe et Ca-K-Fe de HT d'échelle régionale à celle des gîtes
- Faciès K-Fe de HT et BT, K, skarn-K et Ca-Mg de BT à l'échelle des gîtes



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



Ressources naturelles  
Canada

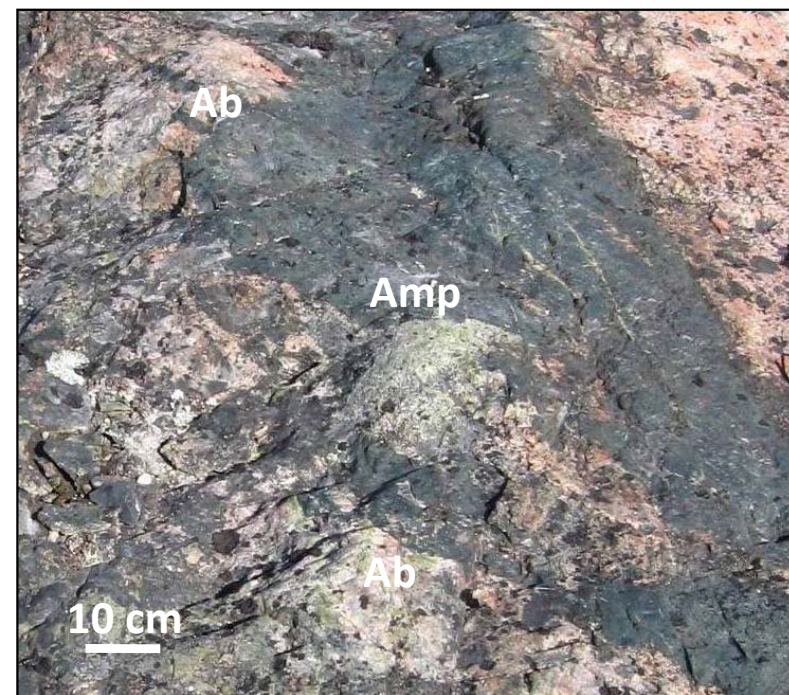
Natural Resources  
Canada

5-10km

Canada

# Zones d'altération

- Forte variabilité des assemblages minéralogiques, de la granulométrie, des textures, de l'intensité de l'altération, de la densité des réseaux de veines et des types de brèches
- Cartographie des systèmes minéralisateurs complexe sans outils appropriés



Kfs -Mag

Ab -Amp-Mag -Ap

Kfs -Bt -Mag

Amp -Mag -Bt

Chl-Hem-Kfs-Cb-Ser

Chl-Cb-Hem

Chlorite

Qtz vein

Cpx -Kfs

Silicification

Ab -Amp

Kfs

Propylitic

Cpx-Grt-Kfs

Hem

Ab -Amp-Ap

Chl -Hem

Amp-Mag -Bt -Kfs

Ep -Mag

Tourmaline

Ser-Hem

Kfs -Hem

Ab -Amp-Mag

Bt

Ab

Ep -Hem -  
Qtz -Cb

Amp -Mag

Cpx

Amp

Jasper

Mag

Acid

Cpx -  
Amp-Mag

Ser

Ep-Qtz -Cb

Phyllic /  
sericitic

Ep

Amp -Mag -Kfs

Ep -Hem -Qtz

Amp-Mag -Ap

Bt -Mag

Ep -Hem

Carbonate

Hem-Kfs-Ser

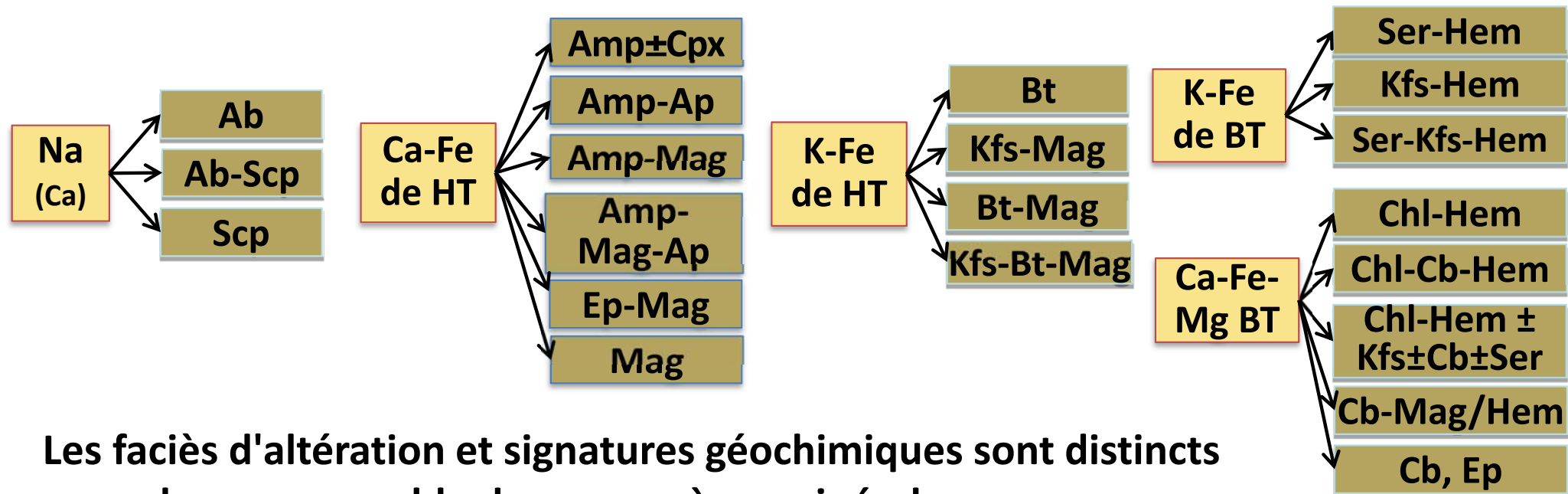
© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# Faciès métasomatiques

La cartographie devient fortement simplifiée une fois les assemblages regroupés en faciès métasomatiques tel que pratiqué en pétrologie métamorphique



Les faciès d'altération et signatures géochimiques sont distincts pour chaque ensemble de paragenèses minérales

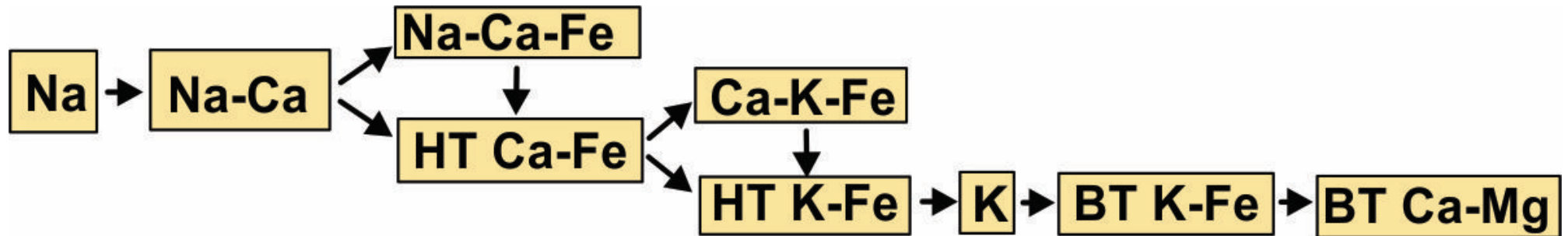
Les oxydes de fer sont couplés aux autres minéraux pour la définition des paragenèses

Corriveau et al. 2010b, 2016, 2017, 2018  
 Montreuil et al. 2013, 2016a, b, c  
 De Toni 2016

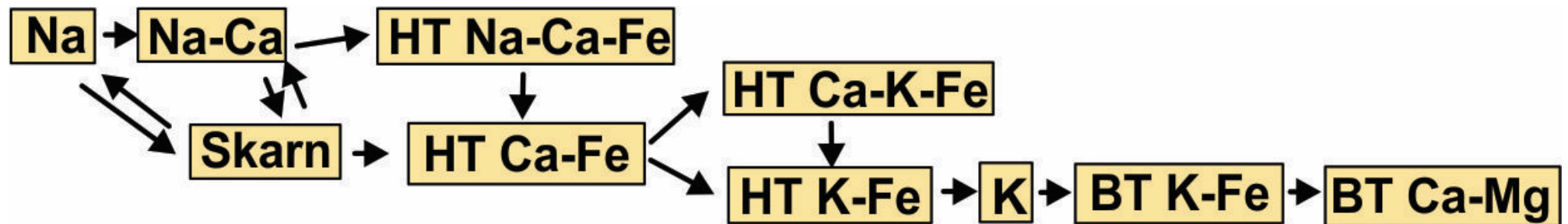
# Assemblages métasomatiques des systèmes IOAA

Exemples de la Province de l'Ours

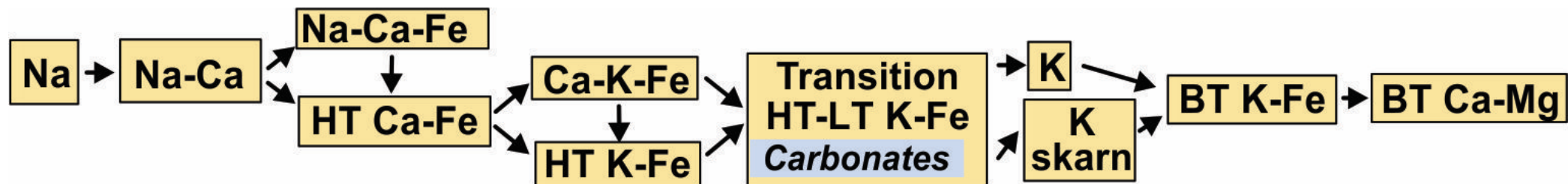
## Précurseurs silicatés (incluant skarns)



## Précurseurs carbonatés



## Précurseurs avec altération carbonatée

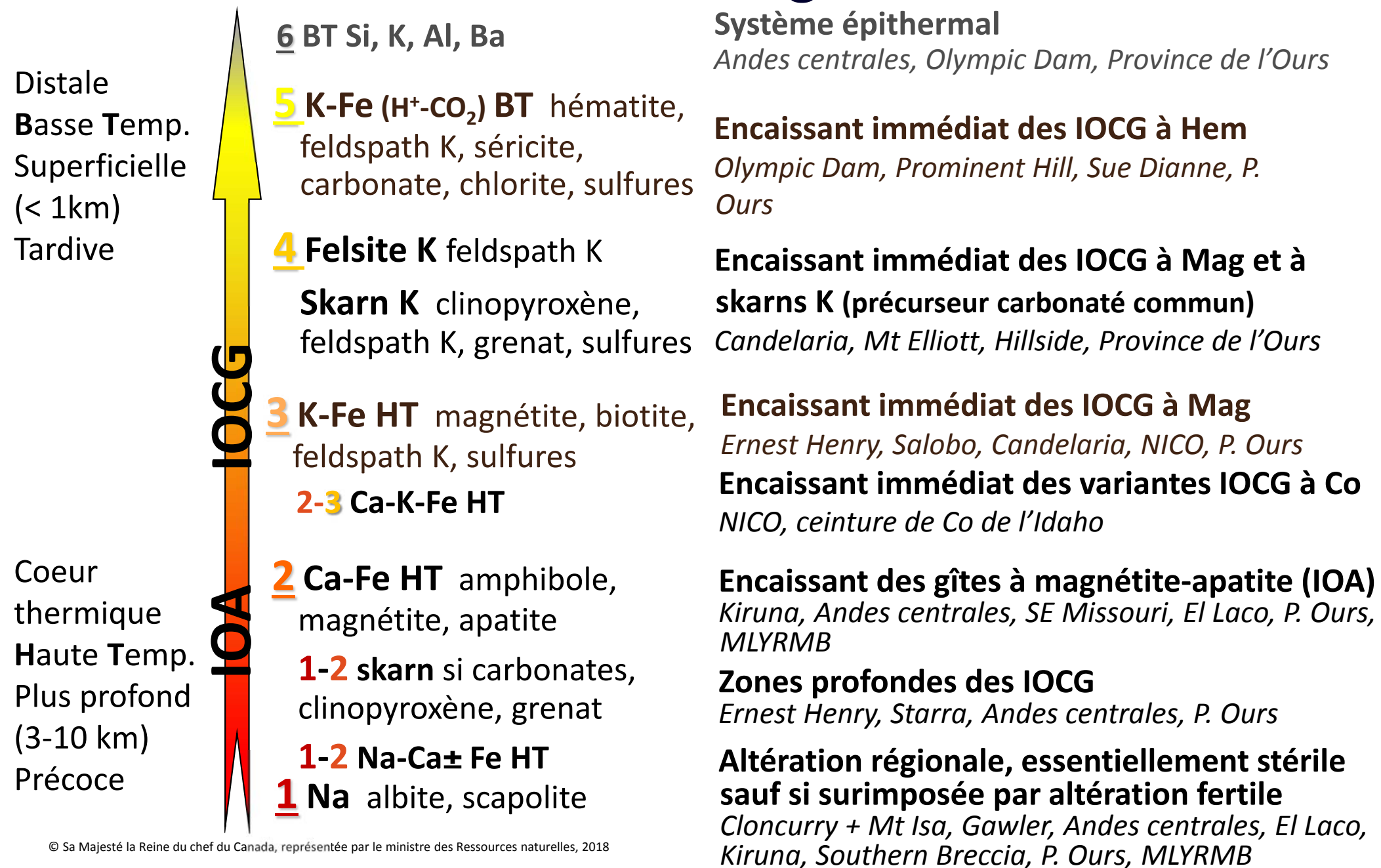


© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# Faciès d'altération au sein des gîtes IOA et IOCG



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Intervalle de températures

enregistré par les inclusions fluides et paragenèses des différents faciès d'altération

- **Albitites (300–600°C)**
- **Ca-Fe de HT et gîtes IOA (500–800°C)**
- **K-Fe de HT et gîtes IOCG à magnétite (350–470°C)**
- **K-Fe de BT et gîtes IOCG à hématite (~250-350°C)**

## Hypothèse:

- L'ascension de fluides hypersalins réchauffe la croûte à l'échelle régionale
- Les fluides initiaux se refroidissent lors de l'albitisation
- La mise en place répétée de magmas accroît la température des fluides résiduels, leur salinité décroît et le faciès Ca-Fe se forme à très hautes températures
- La colonne de fluide poursuit son ascension, se refroidit au fur et à mesure que les réactions métasomatiques se poursuivent ou que la colonne se mélange avec des fluides de basses températures menant aux faciès K-Fe de HT (350–470°C) et K-Fe de BT (250-350°C)

Kish et Cuney 1981; Bardina et Popov 1992; Sidder et al. 1993; Mark et al. 2000, 2006; Harlov et al. 2002; Marschik et al. 2003; Requia et al. 2003; Bastrakov et Skirrow 2007; Monteiro et al. 2008; Polito et al. 2009; Xavier et al. 2010; Chen et al. 2011; Somarin et Mumin 2014; Acosta-Góngora et al. 2015a; Li (W.) et al. 2015; Bilenker et al. 2016

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# Cartographie GEM des faciès d'altération

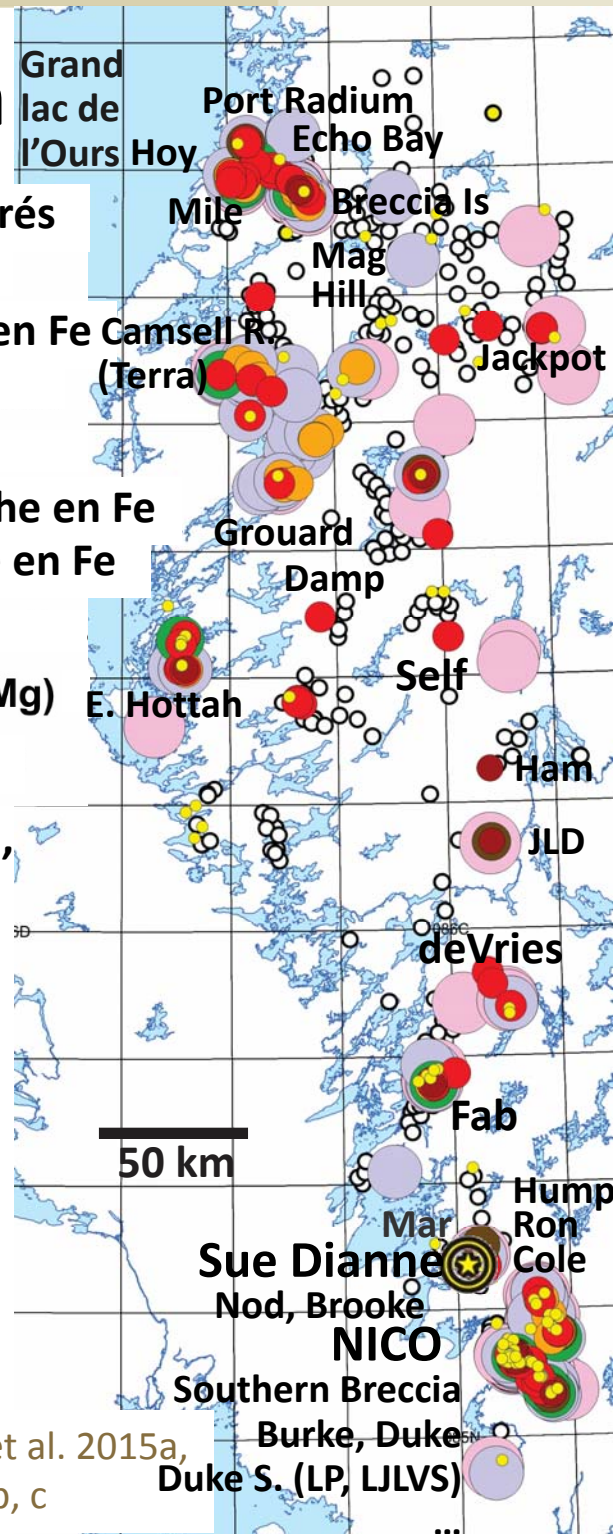
Zone magmatique du Grand lac de l'Ours



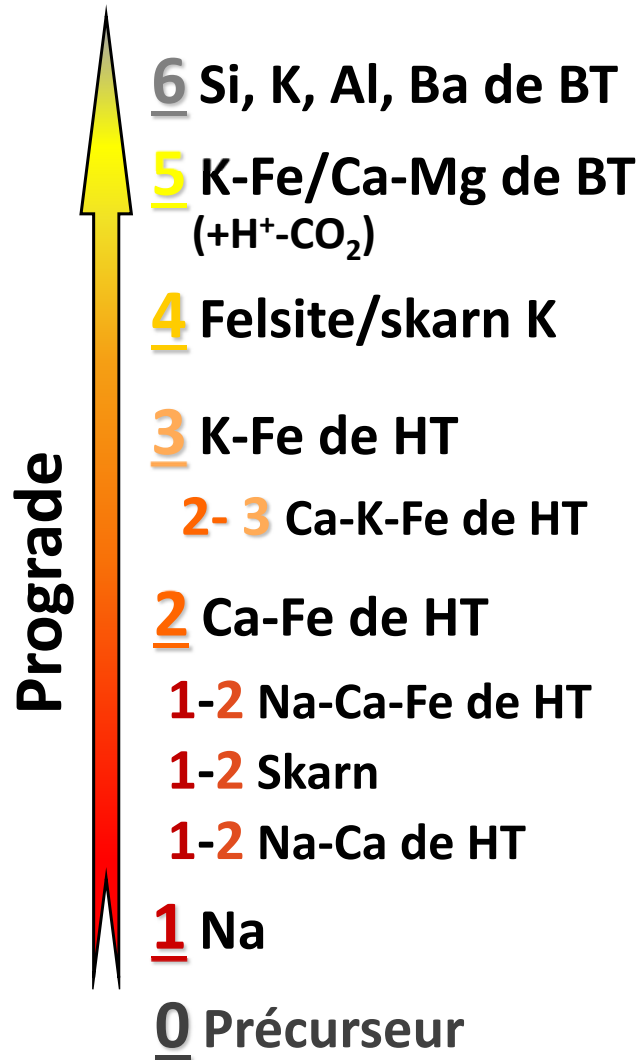
Faciès	Indices et secteurs
<u>6</u> Épithermal	Crowfoot, Echo Bay, Breccia Is.
<u>5</u> K-Fe de BT	Sue Dianne, Southern Bx, Terra, K2, Brooke, Mile, Damp, Breccia Is., Hottah, Hoy
<u>4</u> Felsite K Skarn K	Mile, Grouard
<u>3</u> K-Fe de HT	NICO, Southern Bx, Cole, Fab, deVries, Hump, Ham, Damp, Terra, Echo Bay, Mar, Hoy, South Duke
<u>2</u> Ca-Fe de HT	NICO, Mag Hill, Port Radium ↓, K2 ↓, Fab, JLD, Ron, Terra, Hottah, Grouard, Cat, South Duke
<u>1-2</u> Na-Ca-Fe	
<u>1-2</u> skarn	Carbonate Mountain, Mile, Grouard
<u>1-2</u> Na-Ca ± Fe	
<u>1</u> Na	Echo Bay, Mile, Terra, Fab, deVries, Southern Bx, Nod, Hoy, Grouard, South Duke, Damp

- Moins altérés
- K
- K-Fe riche en Fe
- K-Fe
- Ca-K-Fe
- Ca-K-Fe riche en Fe
- Ca-Fe riche en Fe
- Ca-Fe-(Mg)
- Na-Ca-Fe-(Mg)
- Na

↓ forage



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Évolution structurale des systèmes



# Contrôle structural

- Association spatiale des gîtes et districts avec des discontinuités structurales allant de locales à l'échelle de la croûte; ces structures exercent un contrôle important sur la circulation des fluides et la précipitation des métaux
- Déformation cassante à ductile fortement compartimentée en fonction du faciès d'altération (fracturation, bréchification, cisaillement, plissement, foliation et schistosité syn-métasomatiques)
- Circulation généralisée des fluides à travers les précurseurs (porosité et perméabilité du précurseur ou induites par réactions de dissolution et reprécipitation couplée ou par microfracturation et microbréchification)
- Circulation ciblée de fluides le long de veines, brèches, discontinuités stratigraphiques et failles
- Bréchification micrométrique à kilométrique, focalise la circulation des fluides et le lessivage (non fertile) et/ou focalise la précipitation des métaux, conduit à la formation de gîtes et contrôle leur tonnage
- Remobilisations multiples des métaux si systèmes affectés par du magmatisme ou des orogénèses subséquentes; potentiellement un facteur important pour la formation des gisements mêmes



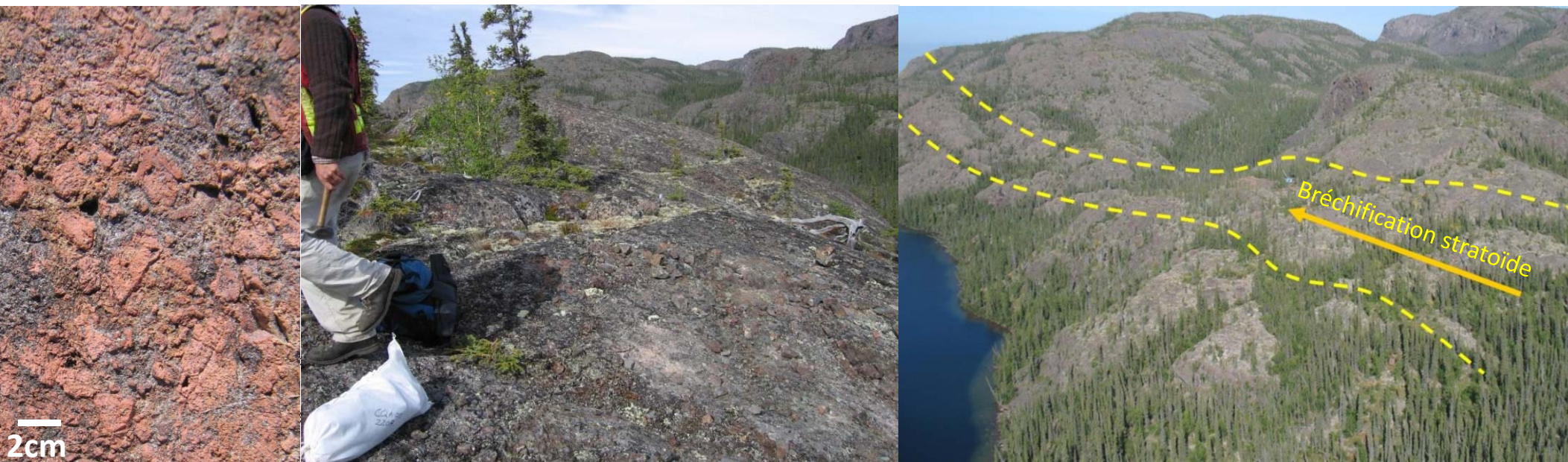
Oliver et Bons 2001; Austin et Blenkinsop 2009, 2010; Oliver et al. 2009, 2017; Rubenach 2012; Mumin et al. 2014; Montreuil et al. 2016a, b, c; Cherry et al. 2017



# Relations altération-bréchification-minéralisation

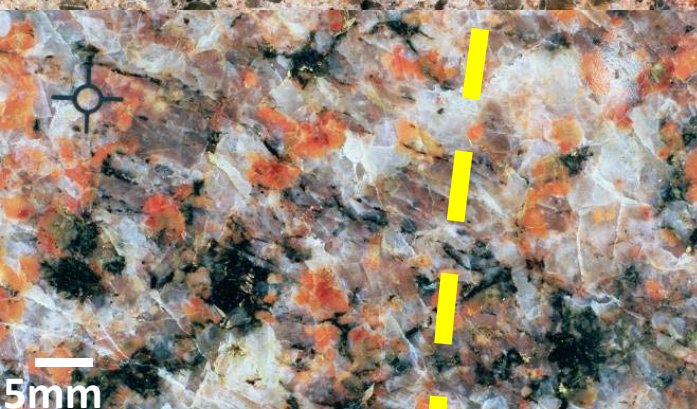
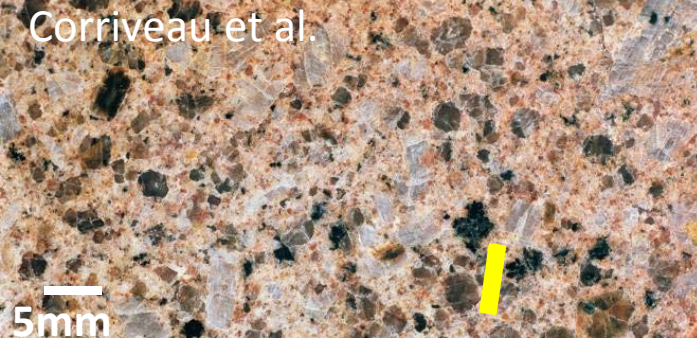
- **Gîtes IOCG généralement encaissés dans de larges complexes de brèches** (ex., Olympic Dam, Ernest Henry, La Candelaria)
- **Sites de canalisation des fluides et de précipitation de métaux**
- **Enregistre les relations de recoupement entre les types d'altération** (Attention: l'altération à feldspath-K des fragments est généralement contemporaine à la cristallisation des oxydes de fer dans la matrice; l'altération à magnétite de certains fragments peut être sélective et postérieure à la bréchification)
- **Unités historiquement cartographiées comme agglomérats peuvent être en fait des brèches hydrothermales minéralisées**
- **La documentation des brèches requière une approche descriptive**

Oliver et al. 2009, 2017; Marchik et Fontboté 2001; Jébrak 2010



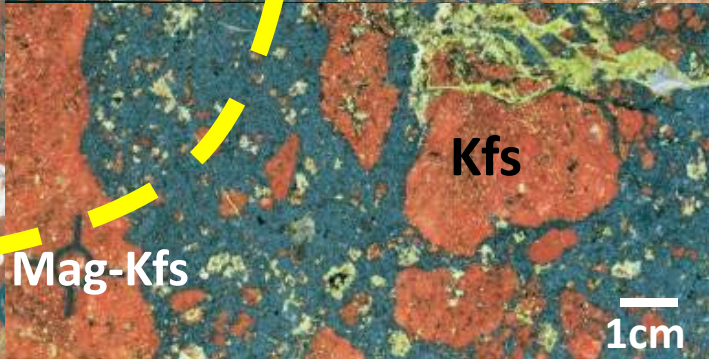
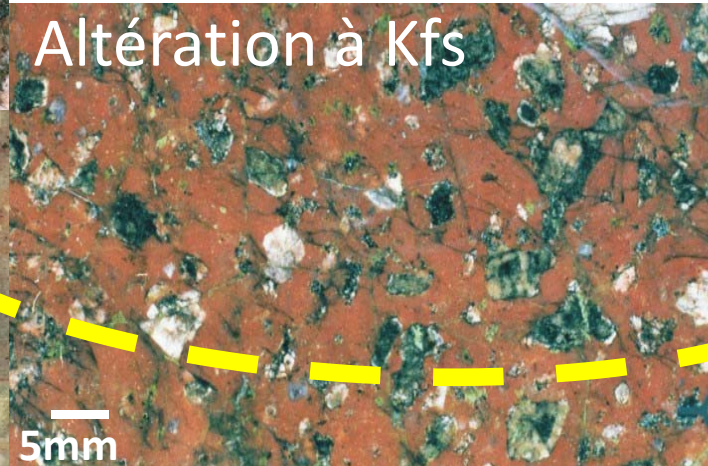
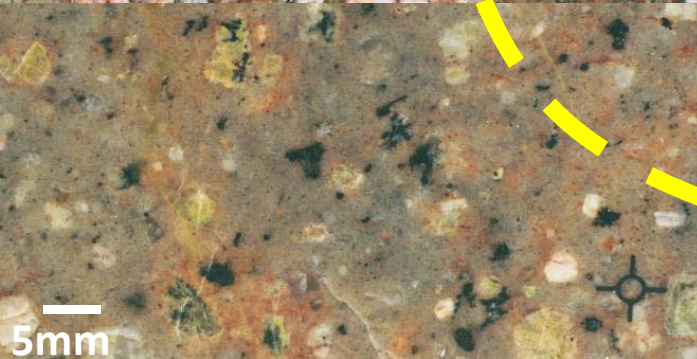
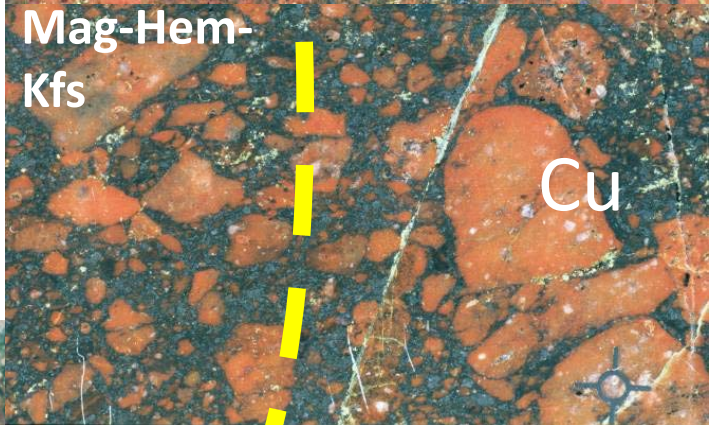
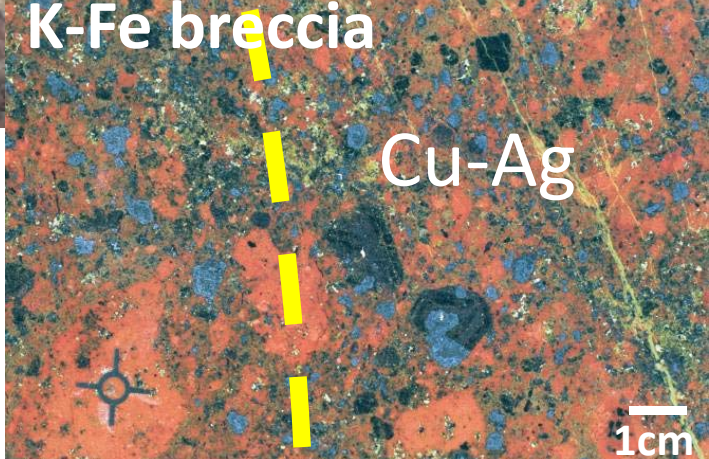


Corriveau et al.



**Bréchification et altération**  
 Gîte de Sue Dianne,  
 Province de l'Ours  
 (photos A.H. Mumin)

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada,  
 représentée par le ministre des Ressources naturelles,  
 2018



K-Fe breccia

Cu-Ag

Mag-Hem-Kfs

Cu

Altération à Kfs

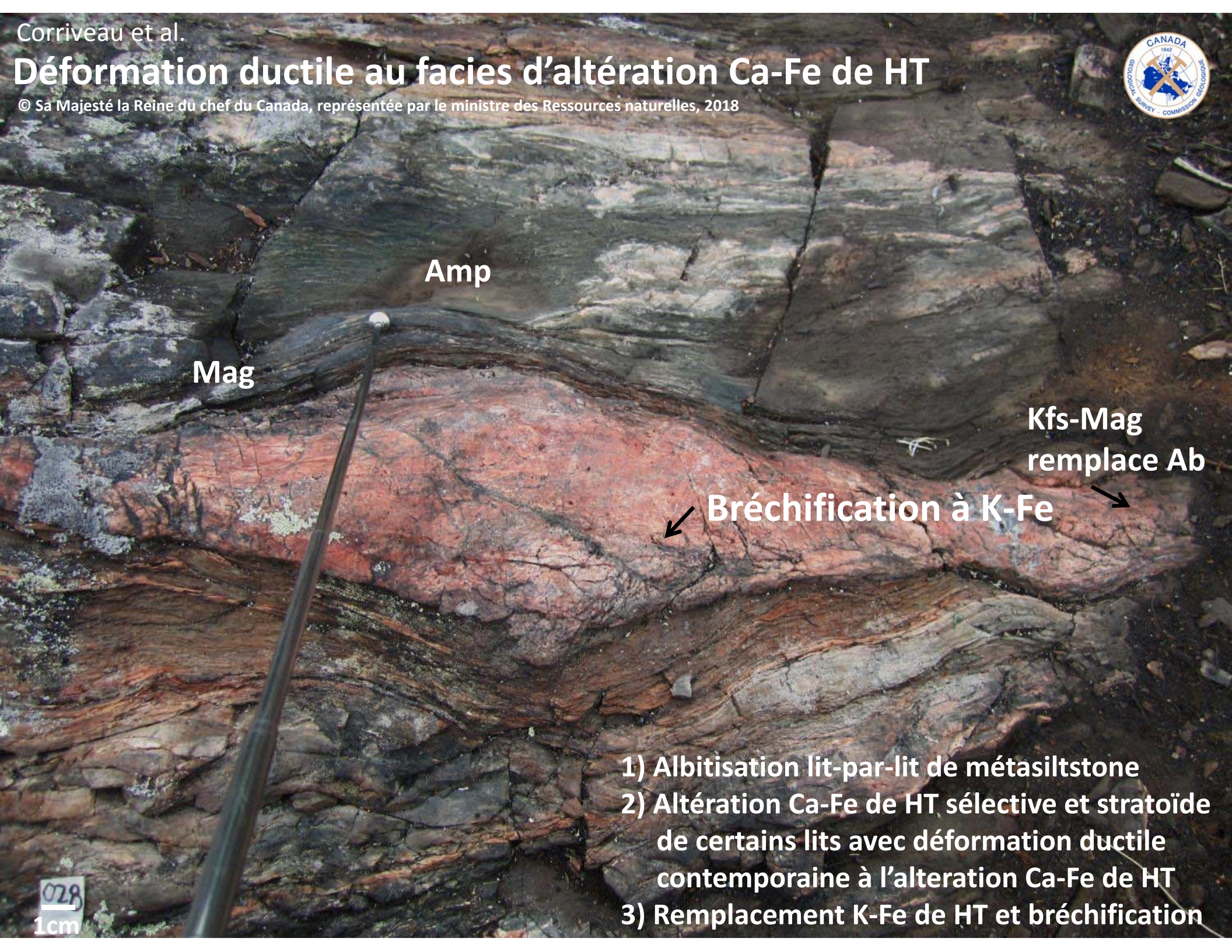
Mag-Kfs

Kfs



# Déformation ductile au faciès d'altération Ca-Fe de HT

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



Amp

Mag

Kfs-Mag  
remplace Ab

Bréchification à K-Fe

- 1) Albitisation lit-par-lit de métasiltstone
- 2) Altération Ca-Fe de HT sélective et stratoïde de certains lits avec déformation ductile contemporaine à l'altération Ca-Fe de HT
- 3) Remplacement K-Fe de HT et bréchification

028  
1cm



# Déformation fragile à ductile syn-métasomatisme

## Conditions

## Faciès d'altération

## Attributs

Distale  
Basse Temp.  
Superficielle  
Tardive

≤250°C

6 Si-Al-K de BT  
(épithermal)

Veines, brèches,  
Déformation fragile

≤350°C

5 K-Fe et Ca-Mg de BT

Brèches hydrothermales formées  
systémiquement

4 Skarn K (si carbonates)  
Felsite K

Déformation fragile domine

Déformation fragile-ductile et  
fluidisation localement présentes  
au sein de zones de cisaillement

≤470°C

3 K-Fe de HT

Coeur  
thermique  
Haute Temp.  
Plus profond  
Précoce

≤800°C

2 Ca-Fe de HT  
Skarn (dans carbonates)

Déformation ductile confinée  
Veines abondantes (± halos)  
Brèches locales (± fluidisation)

≤600°C

1 Na Albitites

Brèches structurales post-  
albitisation



# Empreintes lithogéochimiques du métasomatisme: Outils et exemples

Na

Ca

Fe

K

Mg

Si-Al

10

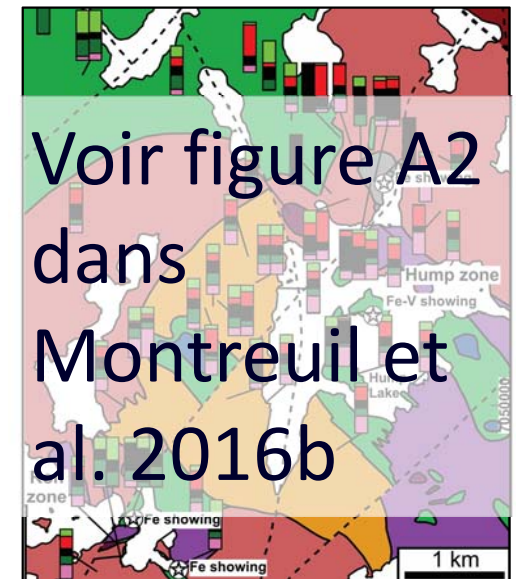
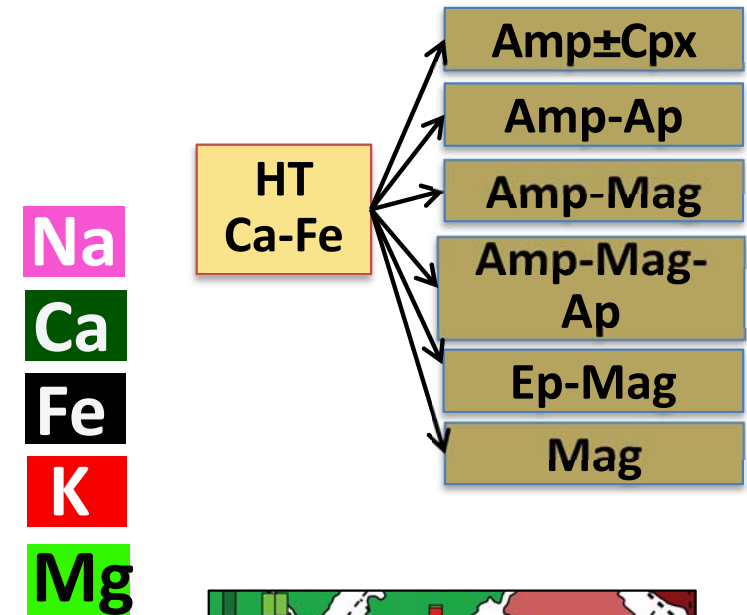


# Outils de caractérisation

- Subdivision par faciès d'altération
- Codes-barres cationiques
- Cartes lithogéochimiques

# Études de processus

- Évolution prograde des réactions métasomatiques
- Évolution des fluides minéralisateurs

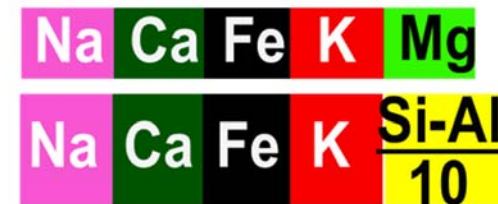


# Composition diagnostique des faciès d'altération

Les cations Na-Ca-Fe-K-Mg renvoient aux minéraux diagnostiques des principaux faciès d'altération

<b>Na</b>	Na en rose pour l'albite
<b>Ca</b>	Ca en vert pour l'amphibole
<b>Fe</b>	Fe en noir pour les oxydes de fer
<b>K</b>	K en rouge pour le feldspath potassique
<b>Mg</b>	Mg en vert clair pour la chlorite
$\frac{\text{Si-Al}}{10}$	(Si+Al)/10 en jaune illustrant la nature communément sous saturée en Si des minéraux

Les proportions cationiques sont dérivées des analyses géochimiques sur roche totale et sont représentées par des codes-barres



Corriveau et al. 2016, 2017; Montreuil et al. 2016a, b; Blein et Corriveau 2017

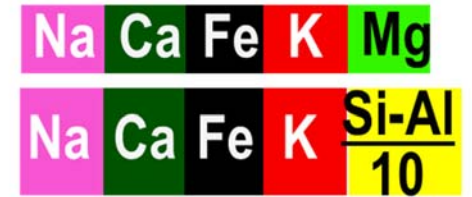
© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# Codes-barres ignés et sédimentaires

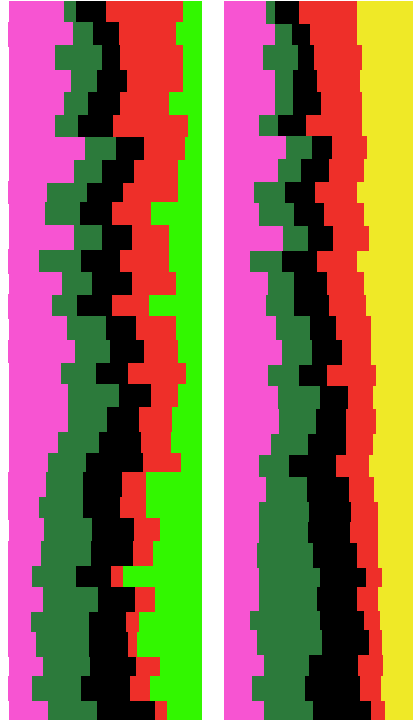
Codes-barres à 3 à 4 cations significatifs pour les roches ignées, métamorphiques et sédimentaires usuelles (sauf pour les rhyolites)



Suites calc-alcalines ( $\pm$ K)



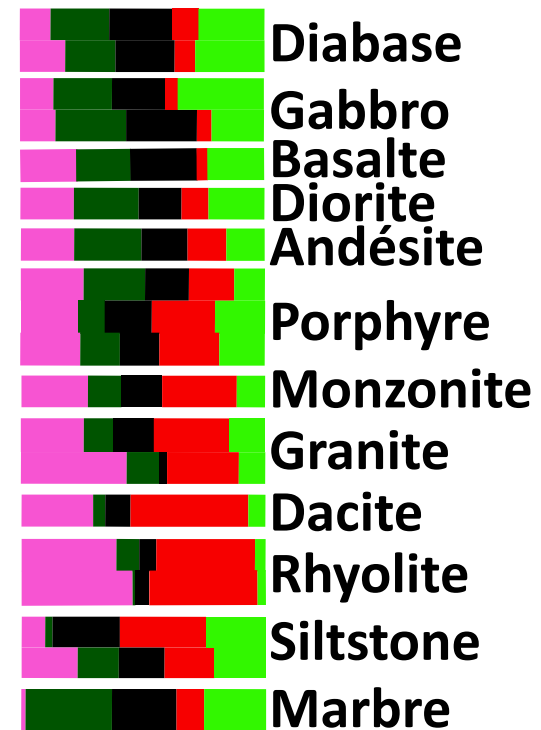
Suites shoshonitiques



Shales nord-américains



Encaissants Province de l'Ours



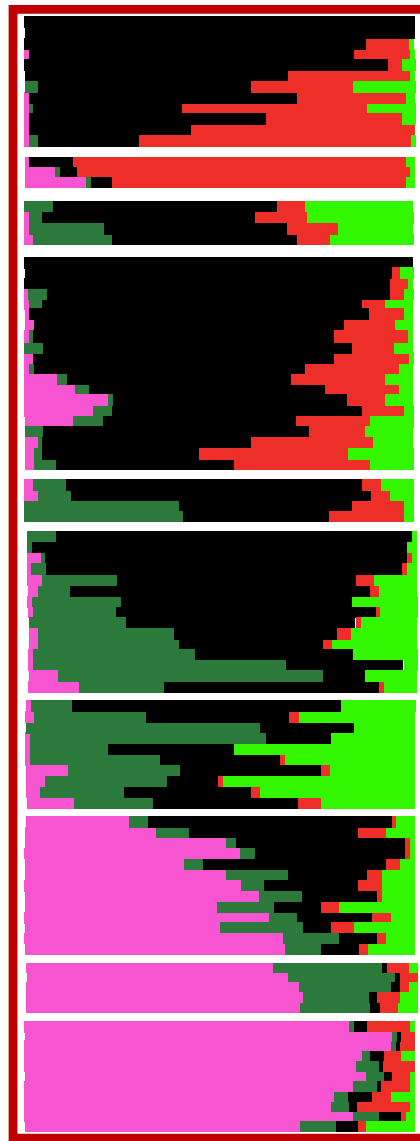
© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

# Codes-barres métasomatiques

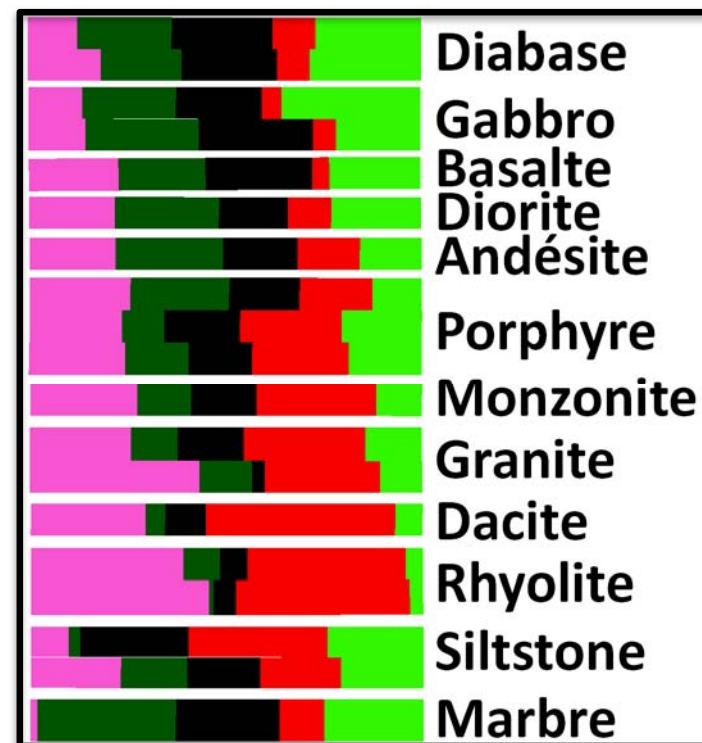
- Codes-barres dominés par un ou deux cations pour tous les faciès d'altération alcali-calcique et à oxydes de fer
- Les codes-barres à Na-Ca-Fe-K-Mg discriminent les roches usuelles des roches métasomatiques

**Roches métasomatiques à altération alcali-calcique et à oxydes de fer, Province de l'Ours**

Corriveau et al. 2016, 2017  
Montreuil et al. 2016a, b  
Blein et Corriveau 2017



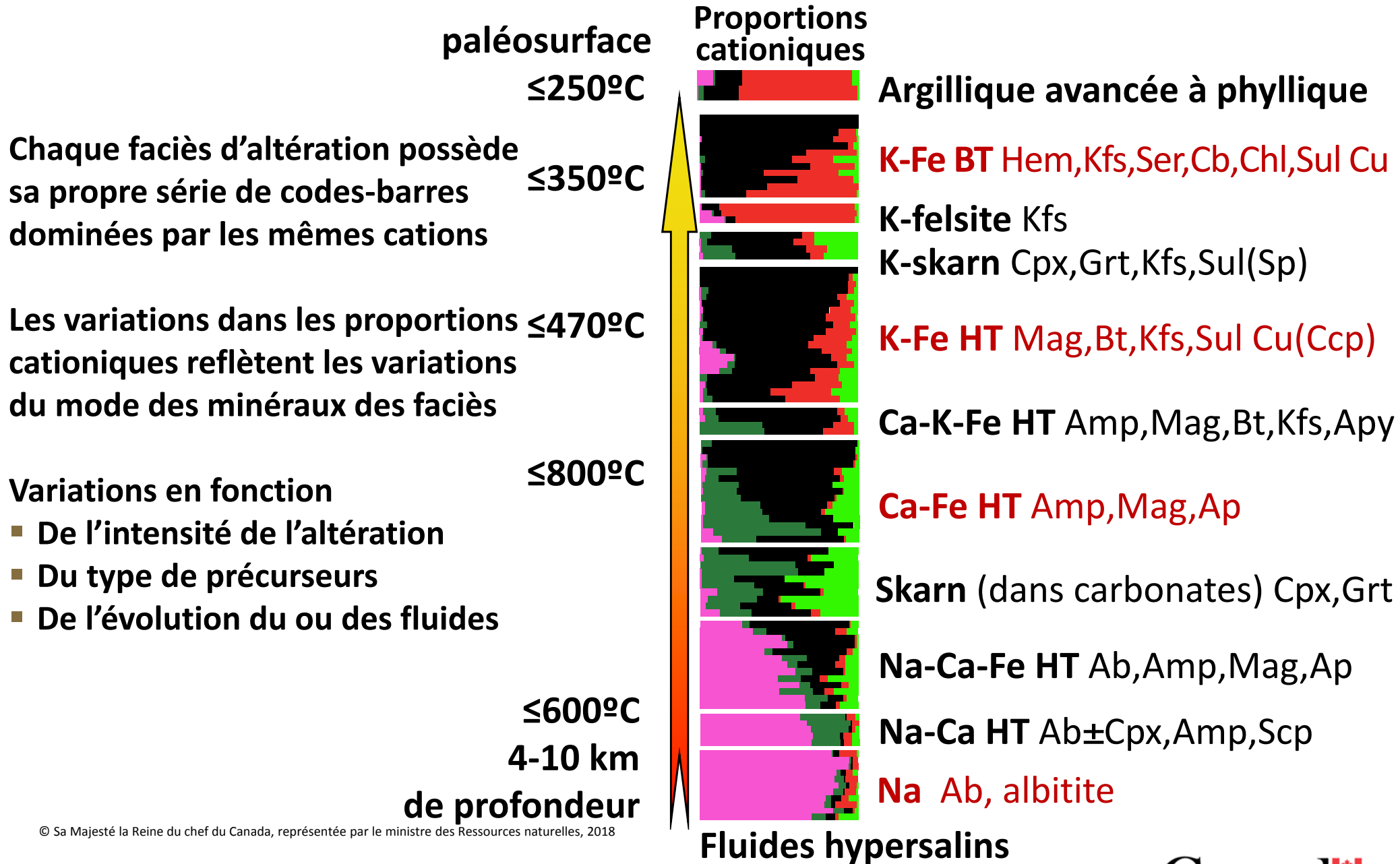
Encaissants, Province de l'Ours



Na Ca Fe K Mg



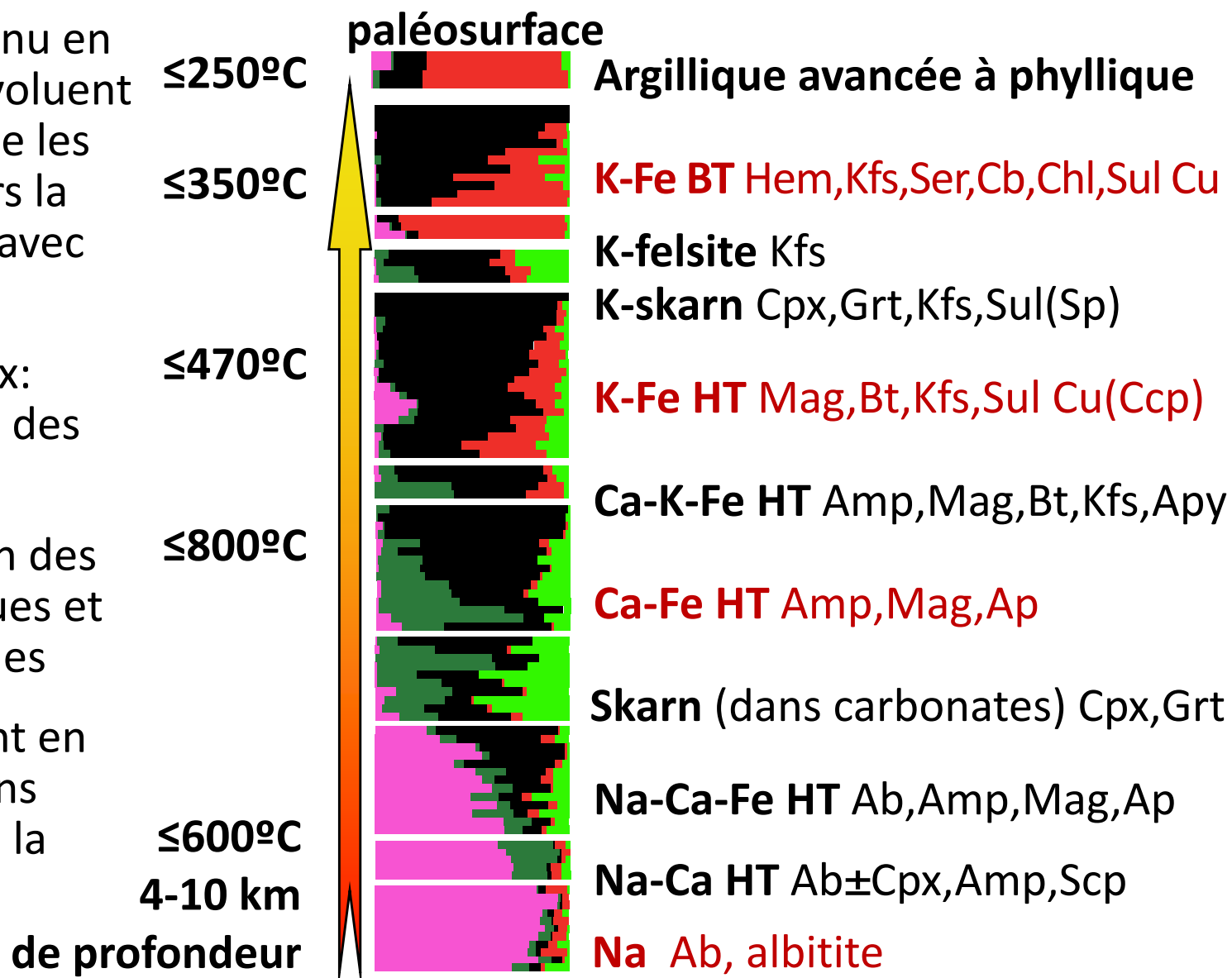
# Évolution des faciès d'altération



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

# Cheminement prograde des réactions métasomatiques

- Composition et contenu en métaux des fluides évoluent au fur et à mesure que les fluides remontent vers la surface et réagissent avec les encaissants
- **Stabilité** des minéraux: induit la précipitation des cations et métaux
- **Instabilité**: dissolution des composantes chimiques et transport par les fluides
- Assemblages changent en fonction des conditions physico-chimiques de la colonne de fluides



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





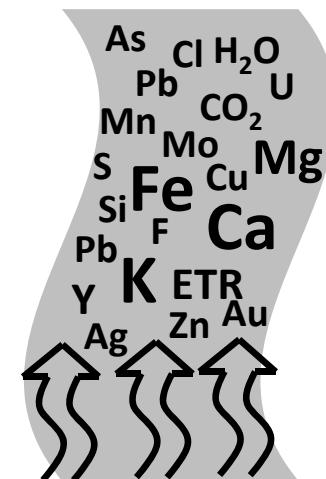
# Gradients physicochimiques extrêmes

- Apport important chaleur-fluides-métaux
- Déstabilisation des précurseurs et réactions par dissolution et reprécipitation couplée des éléments
- Compositions des fluides changent constamment au cours de la formation des systèmes avec perte des signatures de leurs sources au profit des signatures des encaissants
- Métasomatisme redistribue les métaux aux échelles régionales et des gîtes
- Métasomatisme intense modifie minéralogie, composition, textures et propriétés physiques des précurseurs régionalement
- Donne lieu à des types de roches distincts, contrastés, atypiques

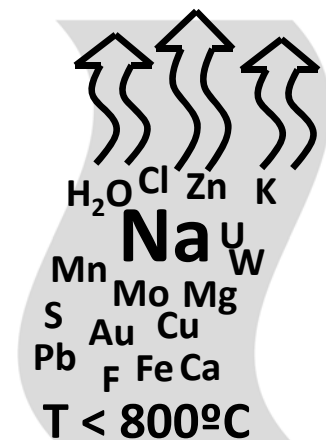
© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



3. Fluides rechargés en métaux et cations formant les faciès subséquents



2. Réactions fluides-encaissants par dissolution et reprécipitation couplée



1. Montée de fluides hypersalins

# Métasomatisme

## K-Fe de HT

À une profondeur de 1-2 km  
Diamètre: 0.2-6 km



## Ca-Fe de HT

À une profondeur de 2 à 8 km  
Longueur: 1-10 km  
Largeur: <1km



## Na (albitite)

À une profondeur de 3-10 km  
Longueur: 1->10 km  
Largeur: ≤1km  
Épaisseur: > 1km



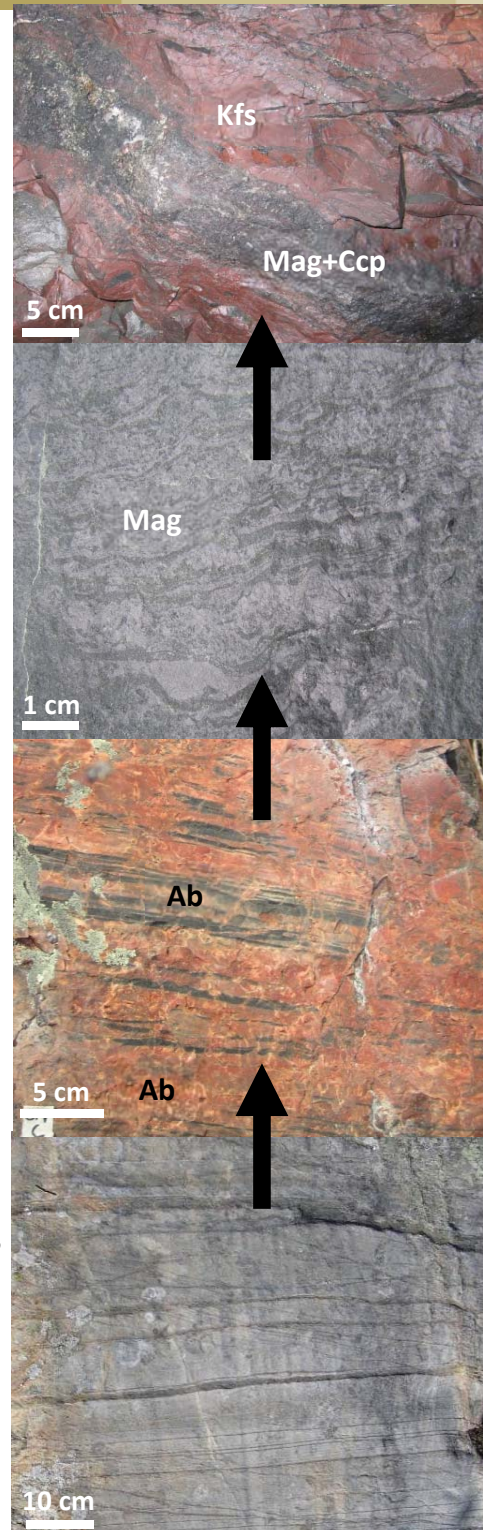
## Protolite (p. ex. siltstone)

Biotite  
Feldspath-K  
Magnétite  
Sulfures Cu

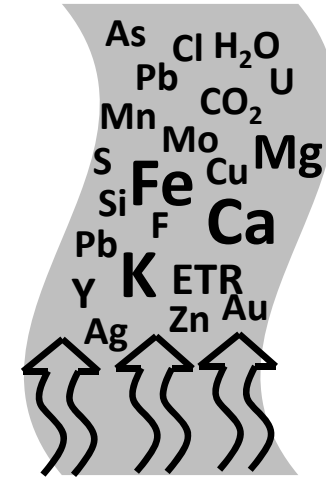
Amphibole  
Magnétite  
Apatite

Albite  
Scapolite

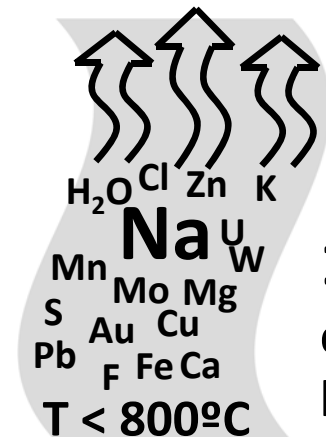
Quartz  
Feldspaths  
Biotite  
Magnétite



3. Fluides rechargés en métaux et cations formant les faciès subséquents



2. Réactions fluides-encaissants avec précipitation du Na; autres éléments dissous



1. Montée de fluides hypersalins

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Évolution des fluides

K-Fe HT



Ca-Fe HT



Na



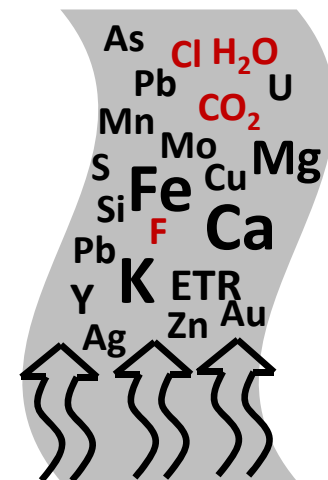
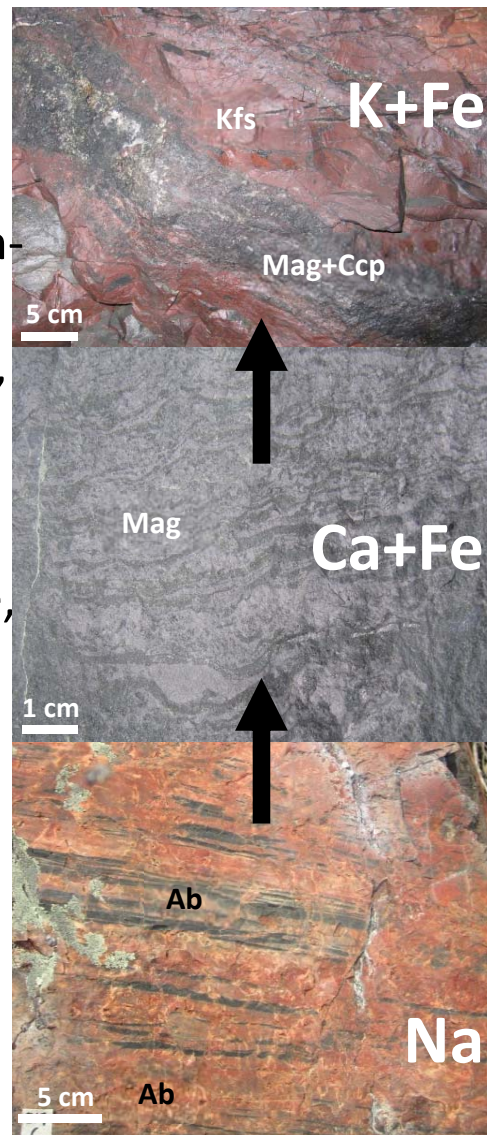
Protolite

**5.** Dissolution des minéraux du précurseur, cristallisation de feldspath-K, magnétite et sulfures de Cu concomitant avec de la bréchification, apport de Na, Mg, etc. dans le fluide

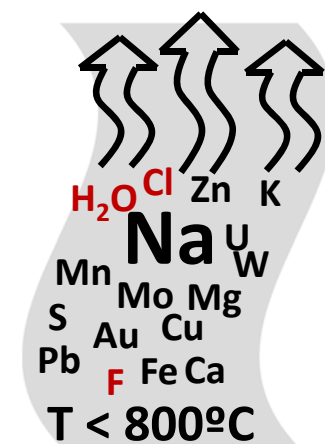
**4.** Dissolution des minéraux du précurseur, cristallisation d'amphibole, magnétite, apatite; apport de K, Mg dans le fluide

**2.** Réactions fluides-encaissants par dissolution de minéraux couplée à de la cristallisation d'albite et de scapolite, recristallisation du quartz non dissous (en excès)

**1.** Montée de fluides hypersalins avec dissolution de tous les minéraux du précurseur (quartz, feldspath-K, biotite, magnétite, etc.)

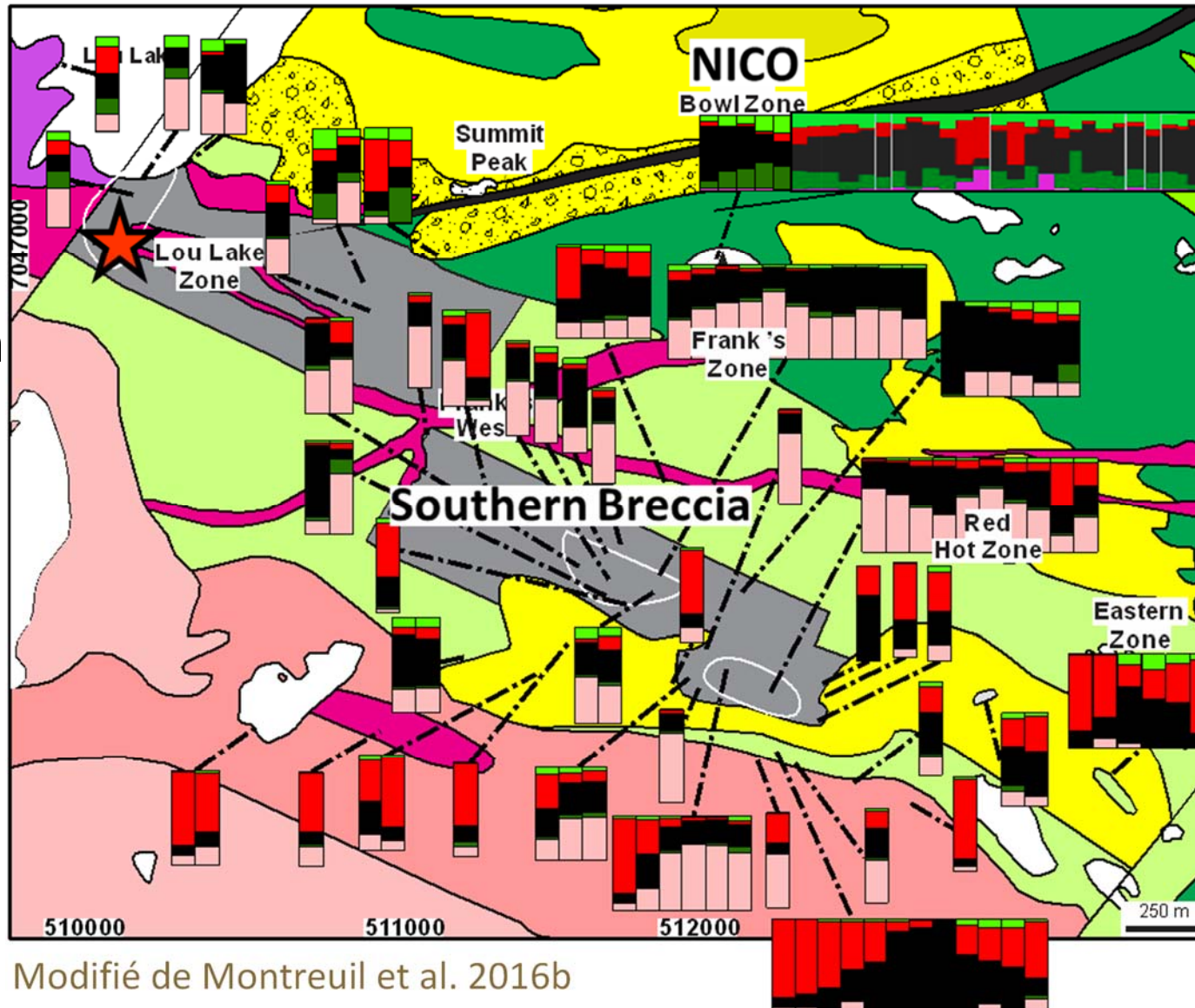


**3.** Fluides rechargés en métaux, cations, CO<sub>2</sub> formant les faciès subséquents



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

# Carte lithogéochimique des faciès d'altération



**NICO**  
**Variante IOCG**  
**à Au-Co-Bi-Cu**  
**HT Ca-K-Fe**

Modifié de Montreuil et al. 2016b

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Associations métallifères (Province de l'Ours)

## Faciès d'altération

## Indices et secteurs



**6** Épithermal

Port Radium-Echo Bay district

**5** K-Fe et Ca-Mg de BT

Sue Dianne, Southern Breccia, Terra, K2, Brooke, Mile, Breccia Is., Hottah, Hoy, Duke Sud

**4** Felsite K  
Skarn K

Mile, Grouard

**3** K-Fe de HT

NICO, Southern Bx, Cole, Fab, deVries, Hump, Ham, Terra, Echo Bay, Mar, Hoy, Duke Sud

**2** Ca-Fe de HT

NICO, Mag Hill, Port Radium ↓, K2 ↓, Fab, JLD, Ron, Terra, Hottah, Grouard, Cat, Duke Sud

**1-2** skarn

Carbonate Mountain, Mile, Grouard

**1** Na

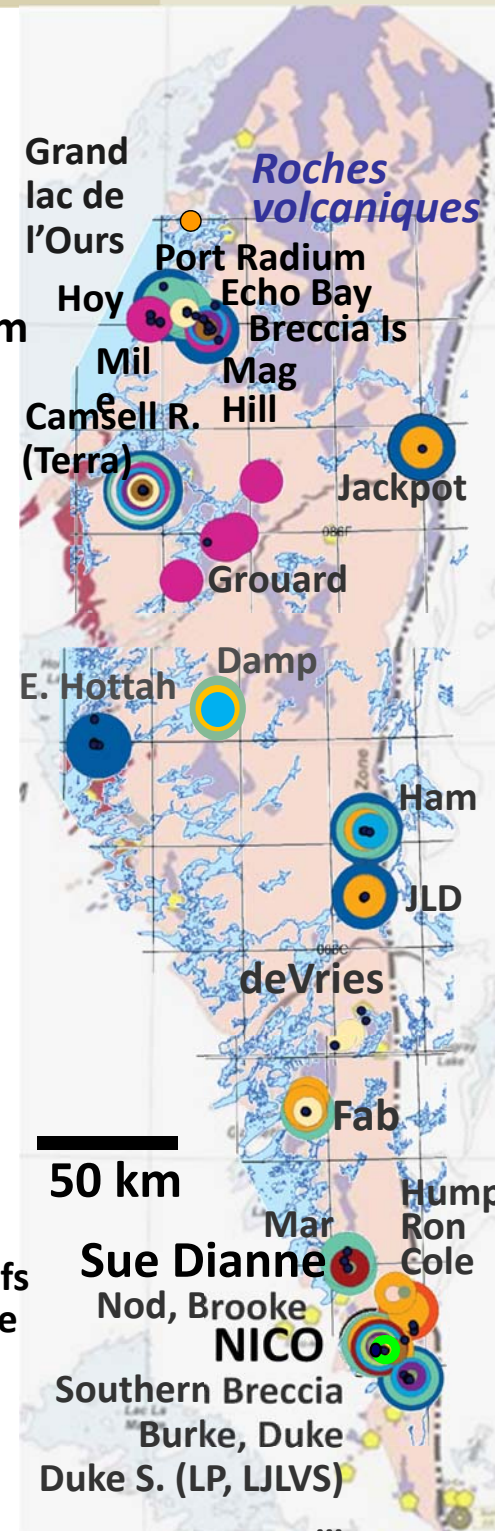
Echo Bay, Mile, Terra, Fab, Damp, deVries, Southern Bx, Nod, Hoy, Grouard, Duke Sud

## Métaux (ppm)

- $Fe_2O_3 > 20$  wt%
- $WO_3 > 1000$  ppm
- $ThO_2 > 1000$
- $Au > 0.5$
- $Ag > 20$
- $V > 1000$
- $Ni > 2000$
- $Bi > 1000$
- $Co > 500$
- $Mo > 500$
- $U_3O_8 > 300$
- $Zn > 3000$
- $Pb > 4000$
- $Cu > 2000$
- $Ta > 20$
- $ETR > 2000$

↓ forage

Échantillons représentatifs avec teneurs au dessus de la limite des indices de Normin



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

# Associations métallifères IOA + ETR

Port Radium–Echo Bay

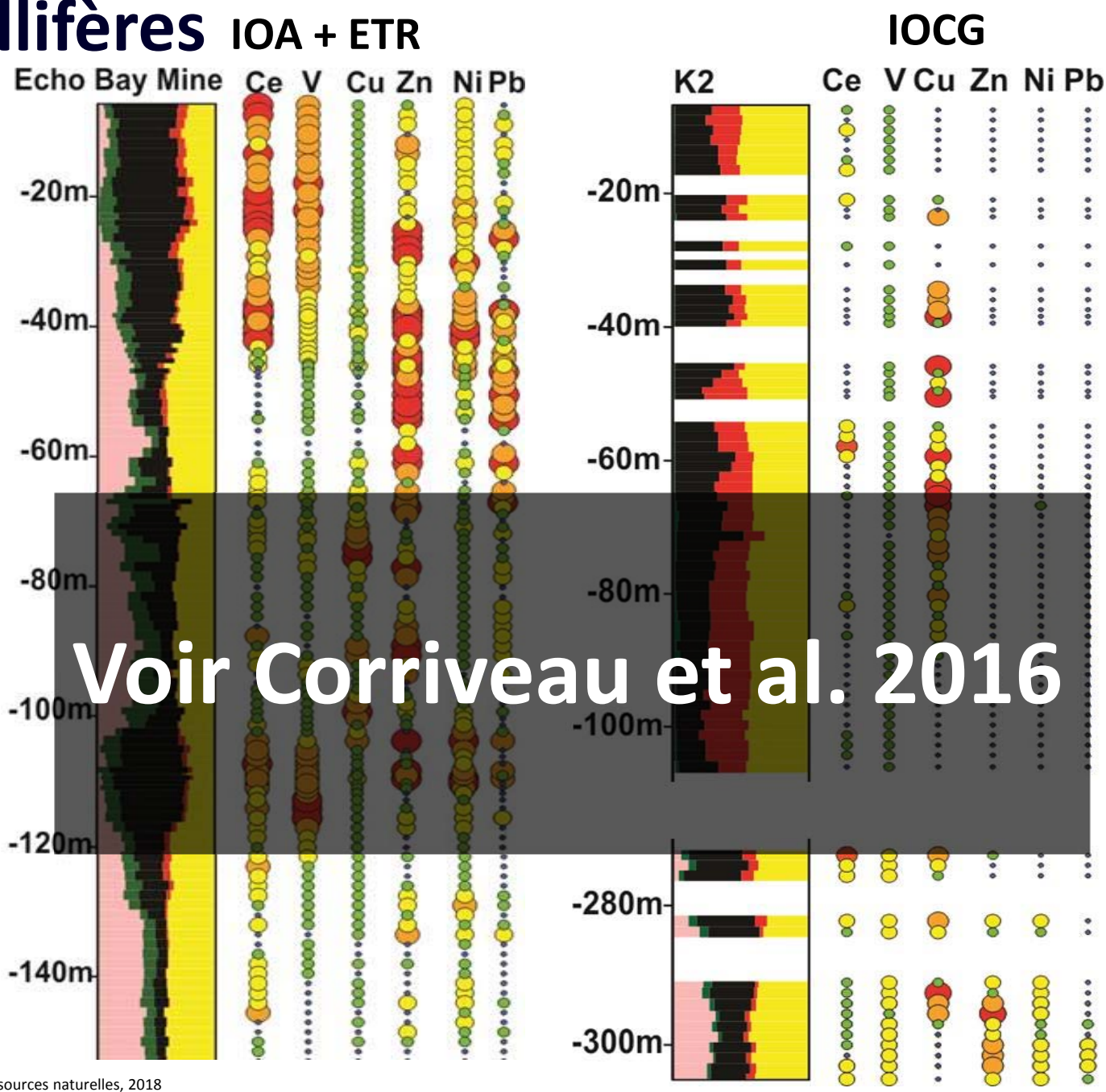
## Transition IOA à IOCG

Métal X 100 ppm

Cu	Zn	Ni	Pb
0 - 2	0 - 2	0 - 0.5	0 - 2
2 - 5	2 - 5	0.5 - 1.5	2 - 5
5 - 10	5 - 20	1.5 - 3	5 - 20
10 - 20	20 - 50	3 - 5	20 - 50
20 - 100	50 - 200	5 - 10	50 - 200

Ce	V
0 - 0.6	0 - 0.5
0.6 - 1	0.5 - 1
1 - 2	1 - 3
2 - 3	3 - 8
3 - 10	8 - 20

Na	Ca	Fe	K	Si/3



Voir Corriveau et al. 2016

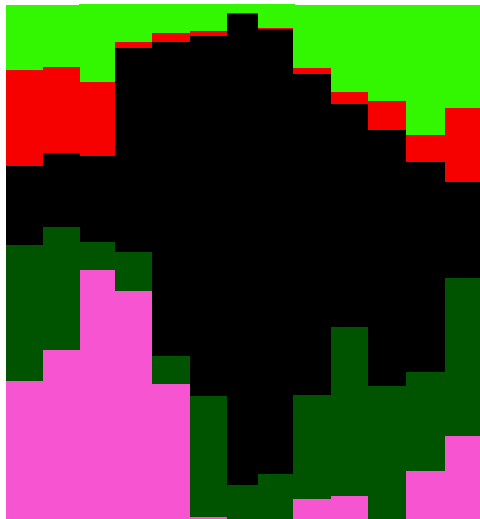
© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Codes-barres des gîtes



**IOA et IOA à ETR**  
altération Ca-Fe to Ca-K-Fe HT



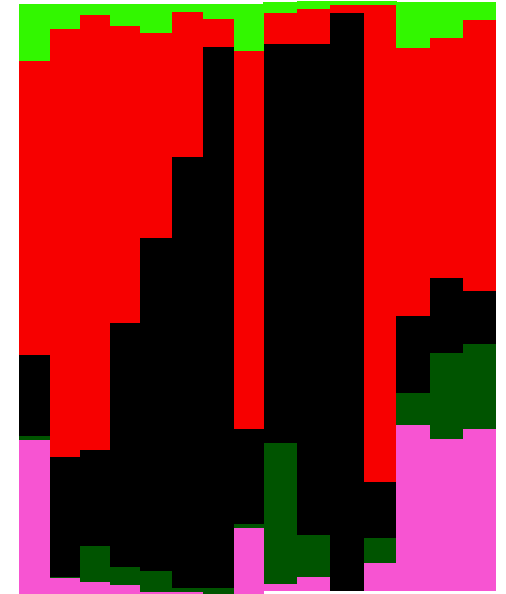
**IOA + ETR**

**Variante à Au-Co-Bi**  
**IOCG à magnétite**  
altération Ca-K-Fe HT

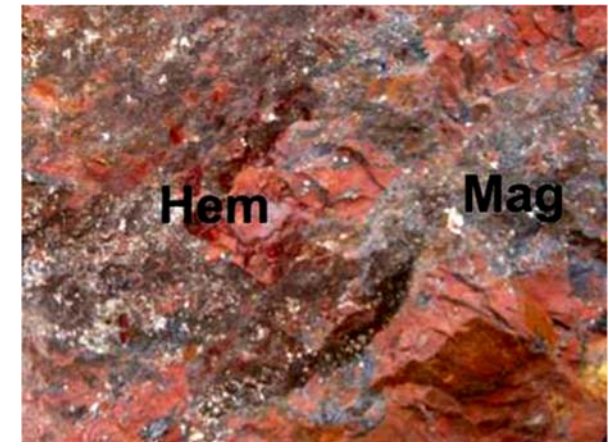


**Co-variant**  
**IOCG**

**IOCG à magnétite et**  
**hématite (Cu-Ag-Au)**  
altération K-Fe HT



**IOCG**

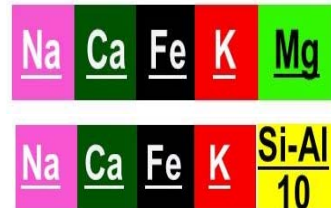


© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

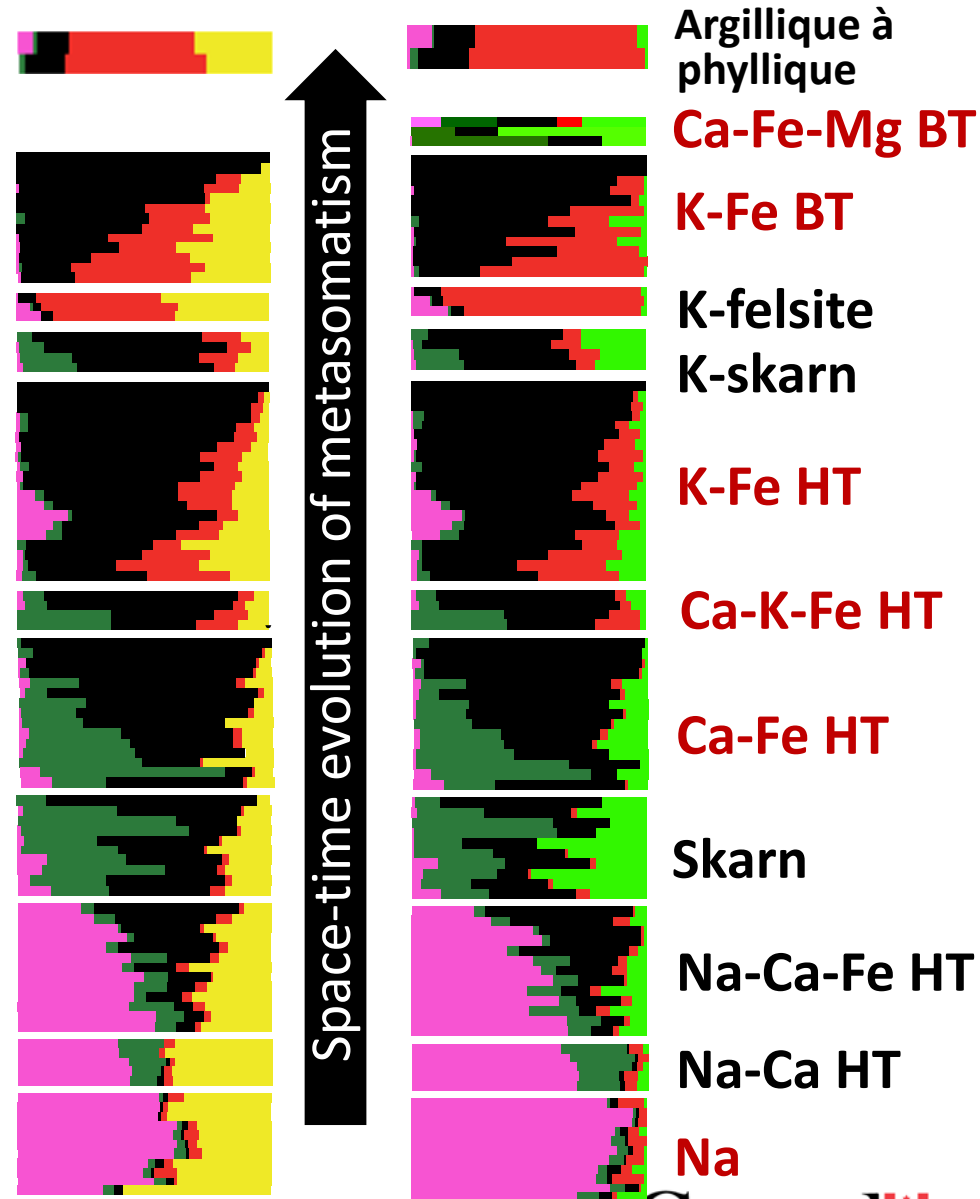
# Évolution des faciès d'altération

- = changement compositionnel des roches
- = changement compositionnel des fluides
- = variations des associations métallifères précipitées

Carto de terrain permet de déduire les changements lithogéochimiques induits par les fluides et d'établir des stratégies d'exploration adaptées



Codes-barres sédimentaires, ignés et métamorphiques usuels

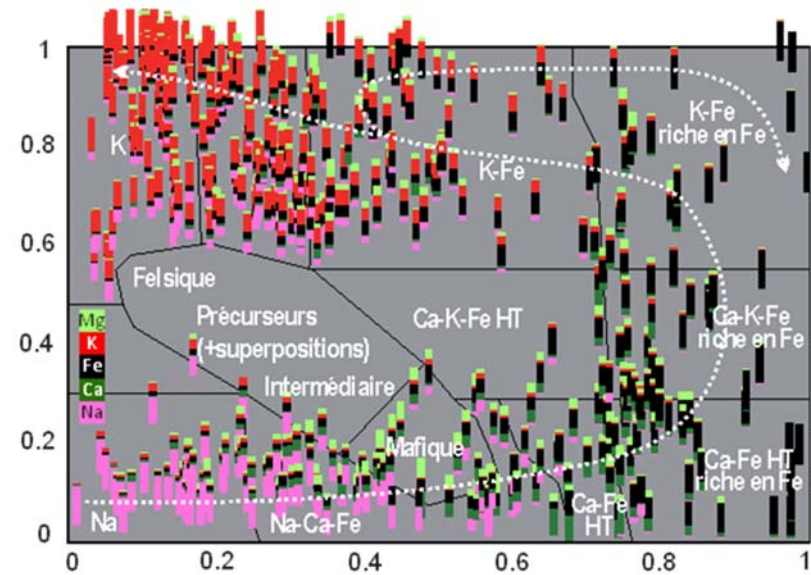
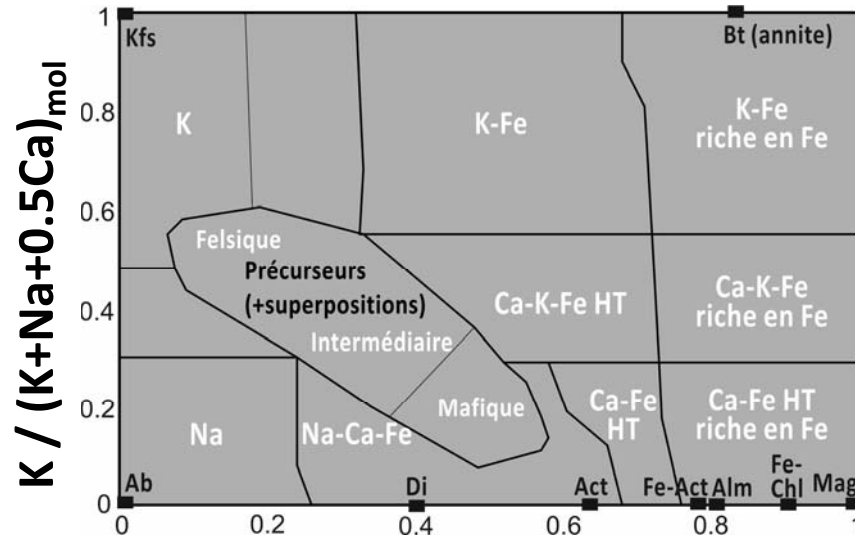


© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Diagrammes discriminants

## Signatures cationiques des gîtes et halos d'altération



$$\frac{2Ca+5Fe+2Mn)_{mol}}{2Ca+5Fe+2Mn+Mg+Si)_{mol}}$$

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Index d'altération et diagramme discriminant

Chaque faciès d'altération a une signature chimique distincte et diagnostique

Les données géochimiques affinent la mobilité en éléments majeurs interprétée macroscopiquement

## Index de Benavides et al. (2008a, b)

- Détecte les faciès d'altération des gîtes IOCG mais difficile d'utilisation puisqu'il requiert le contenu en CO<sub>2</sub> des roches totales
- Caractérise l'intensité mais non conçu pour discriminer les faciès d'altération

## Index de Montreuil et al. (2013)

### Basé sur les concentrations molaires

- A-IOCG1 discrimine le faciès Na du faciès K et le faciès Ca-Fe du faciès K-Fe
- A-IOCG2 discrimine l'altération à alcali (Na-K) des faciès Ca-Fe, K-Fe et Fe

## Index A-IOCG1

$$K / (K + Na + 0.5Ca)_{\text{mol}}$$

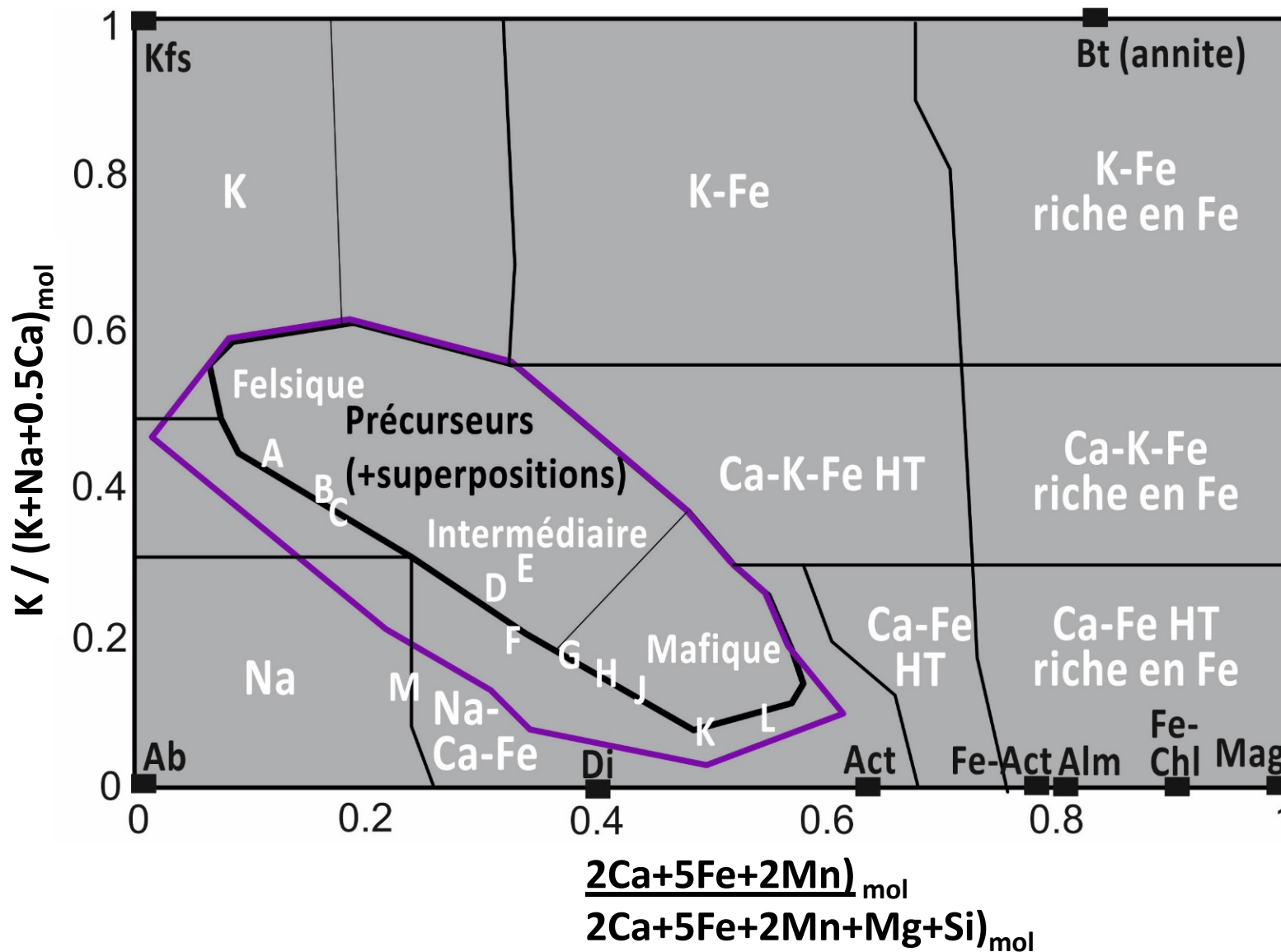
Modifié de Madeisky (1996)

## Index A-IOCG2

$$\frac{(2Ca + 5Fe + 2Mn)_{\text{mol}}}{(2Ca + 5Fe + 2Mn + Mg + Si)_{\text{mol}}}$$



# Index d'altération et diagramme discriminant

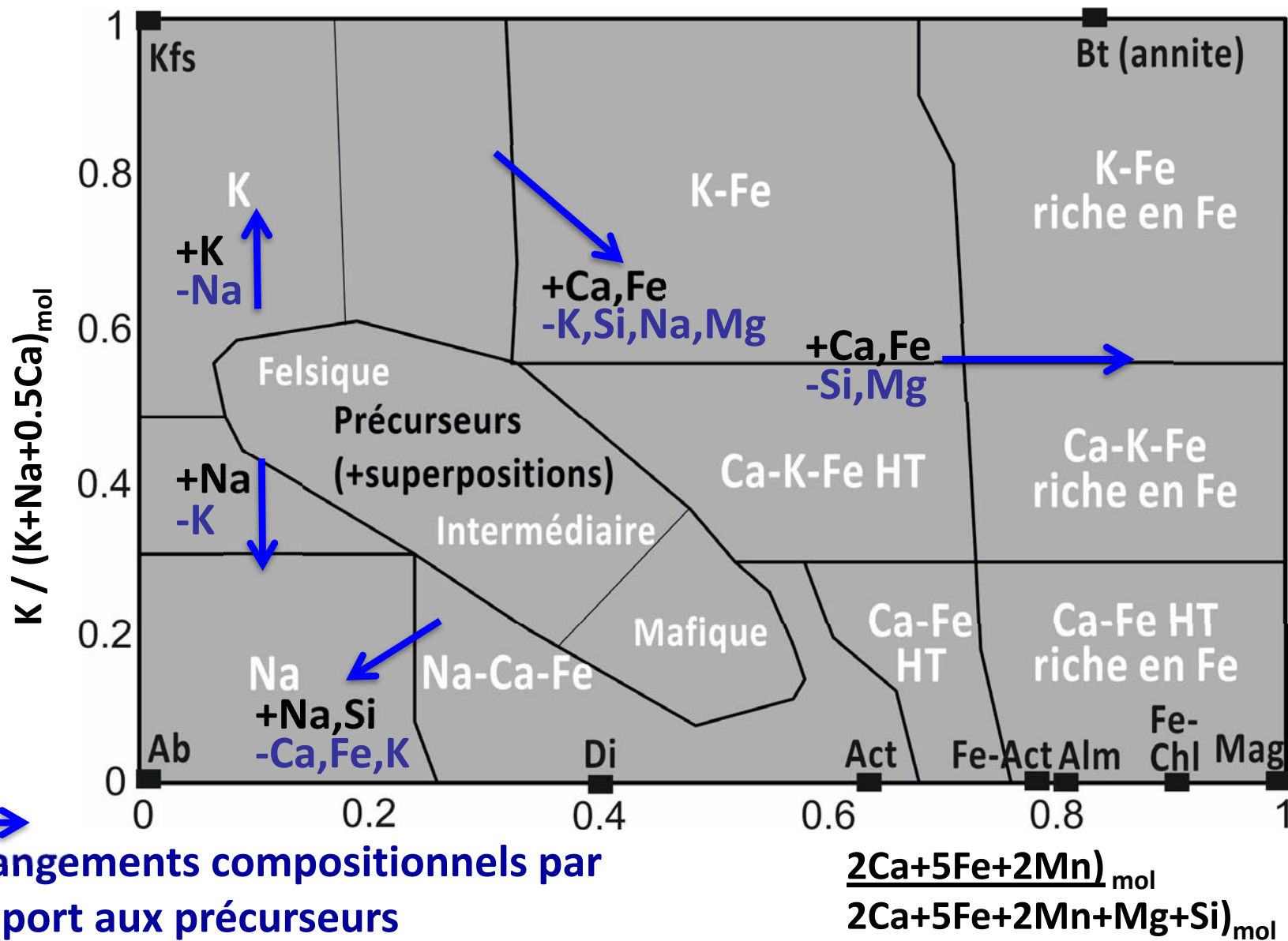


Précurseurs usuels incluant les séries calc-calcalines à shoshonitiques (Montreuil et al. 2013)

Précurseurs de la zone magmatique du Grand lac de l'Ours (Montreuil et al. 2016)

A-L: compositions classiques listées dans Montreuil et al. (2013)

# Index d'altération et diagramme discriminant



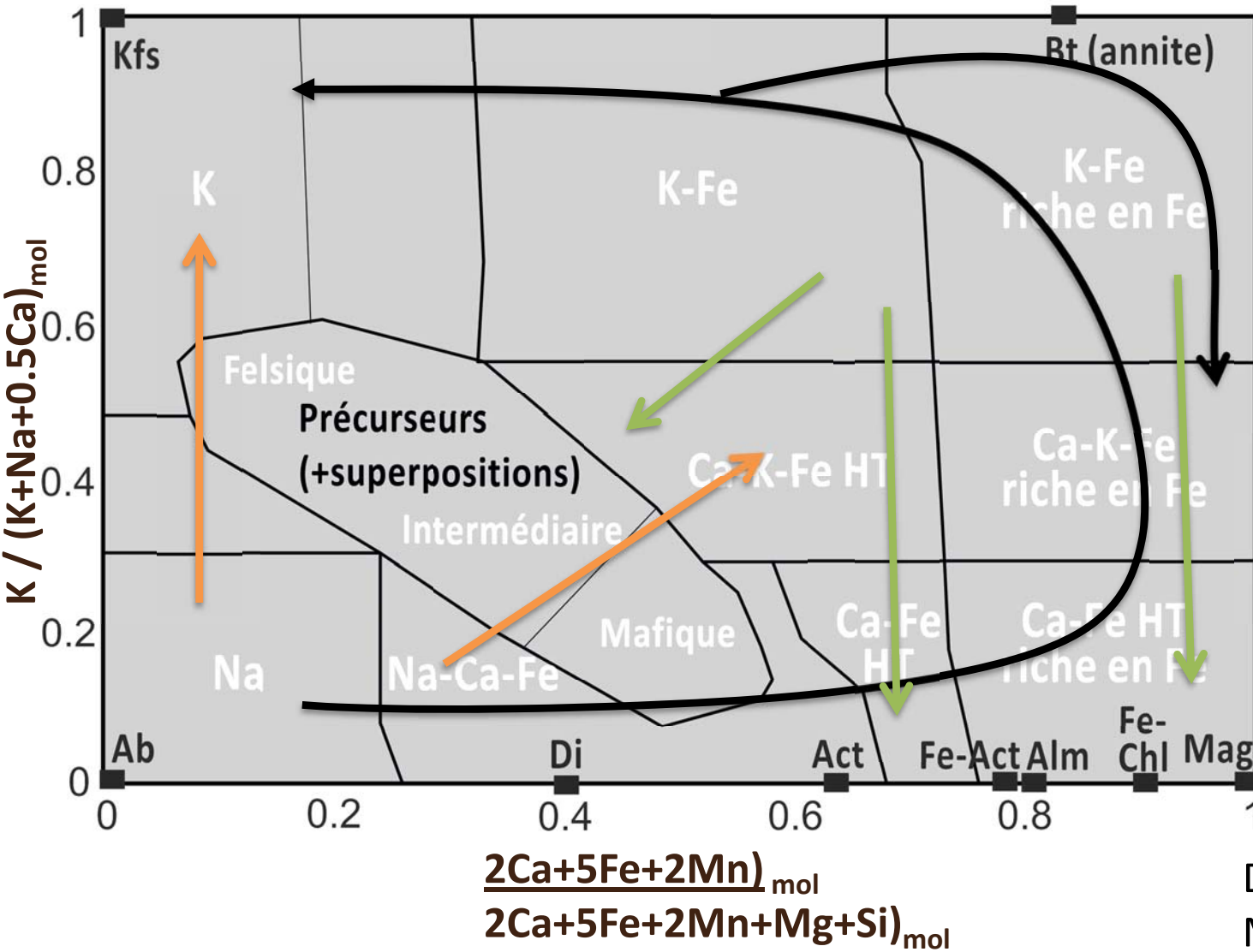
→ **Changements compositionnels par rapport aux précurseurs**

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# Index d'altération et diagramme discriminant



**Cheminevements**

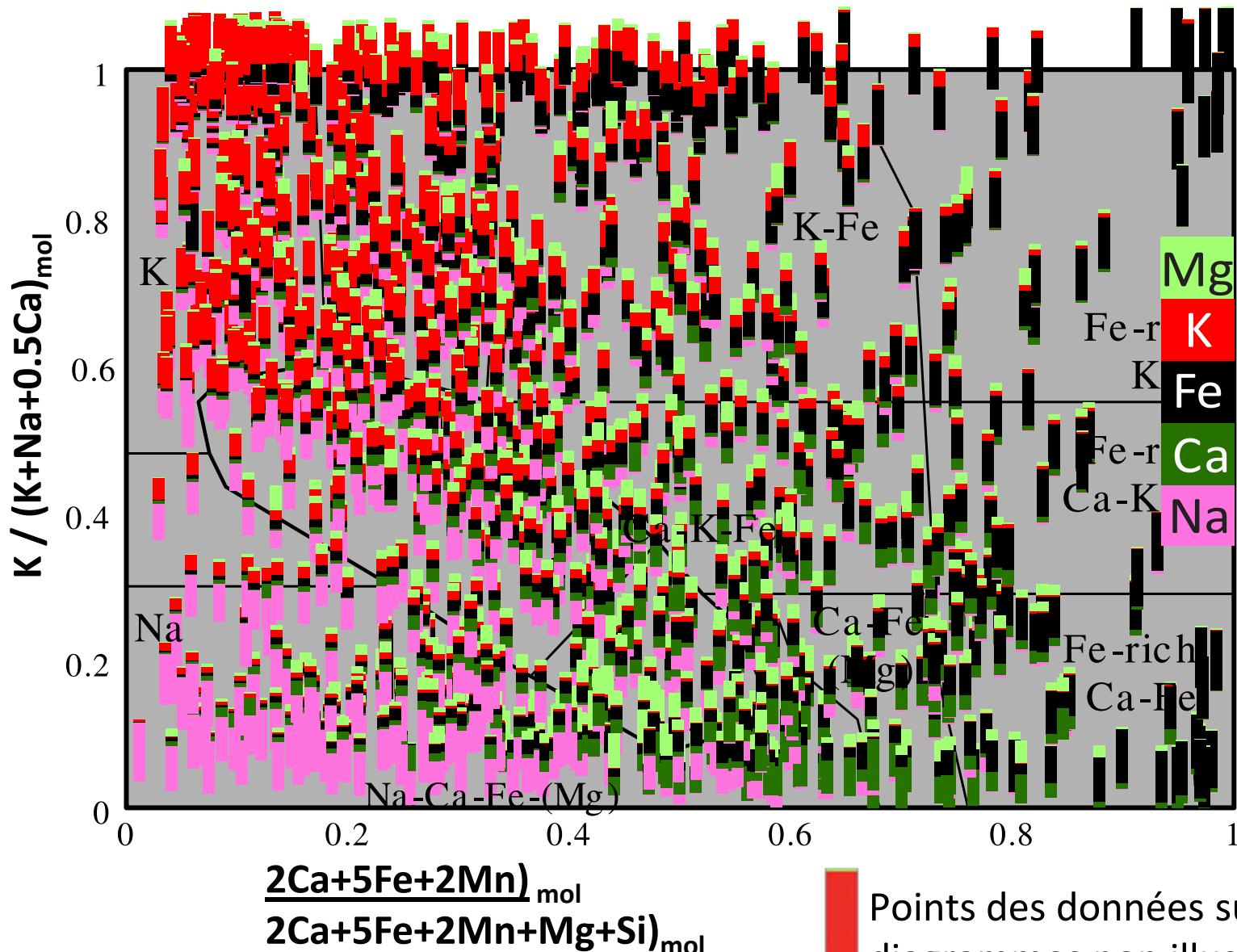
- progrades →
- rétrogrades ←
- et surpositions →

**plus facilement discernables en reportant les proportions molaires Na-Ca-Fe-K-Mg et Na-Ca-Fe-K (Si+Al)/10 sur le diagramme discriminant (diapos 112-120)**

Diagramme discriminant de Montreuil et al. 2013, 2016a

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

# Empreintes globales des systèmes



Zone magmatique du Grand lac de l'Ours toutes données confondues (précurseurs, faciès d'altération progrades, rétrogrades et superposés)

Données géochimiques: Corriveau et al. 2015  
Diagramme discriminant: Montreuil et al. 2013, 2016a

Points des données sur les diagrammes non illustrés et situés à la base des codes-barres

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



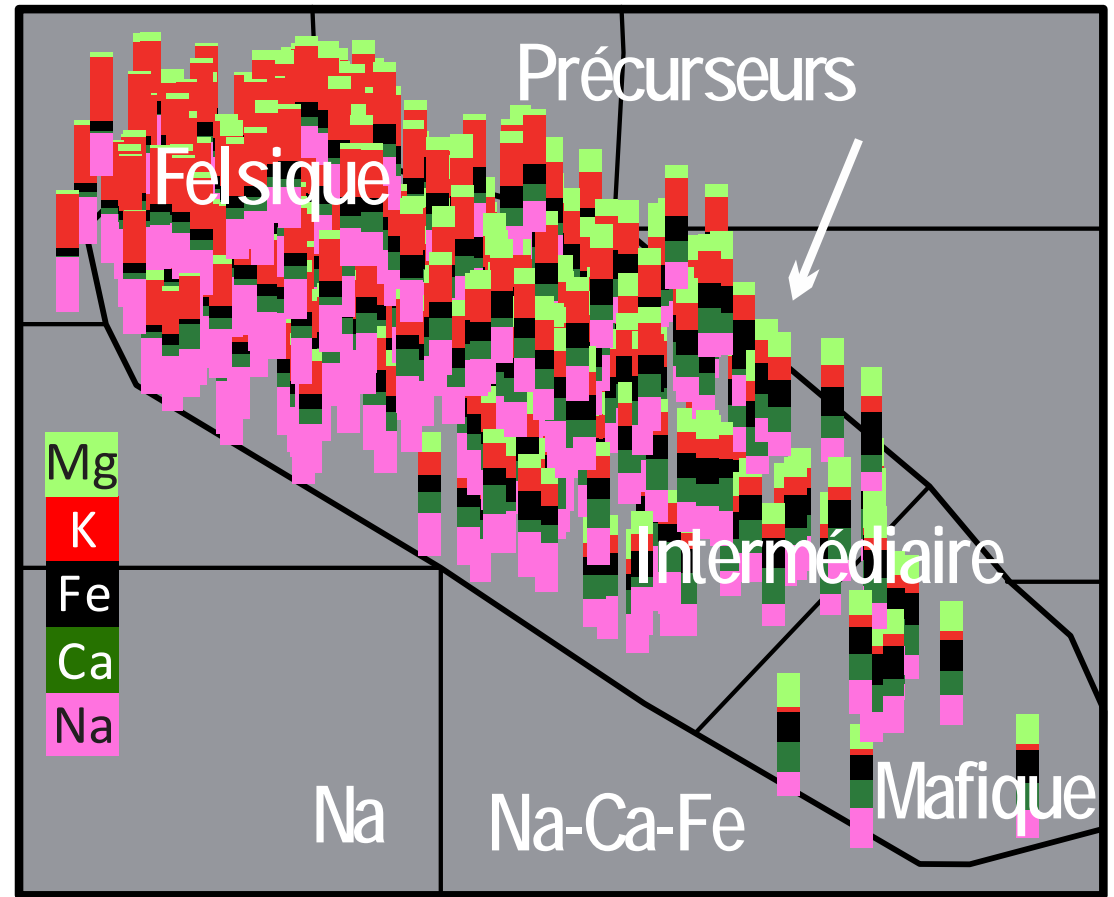
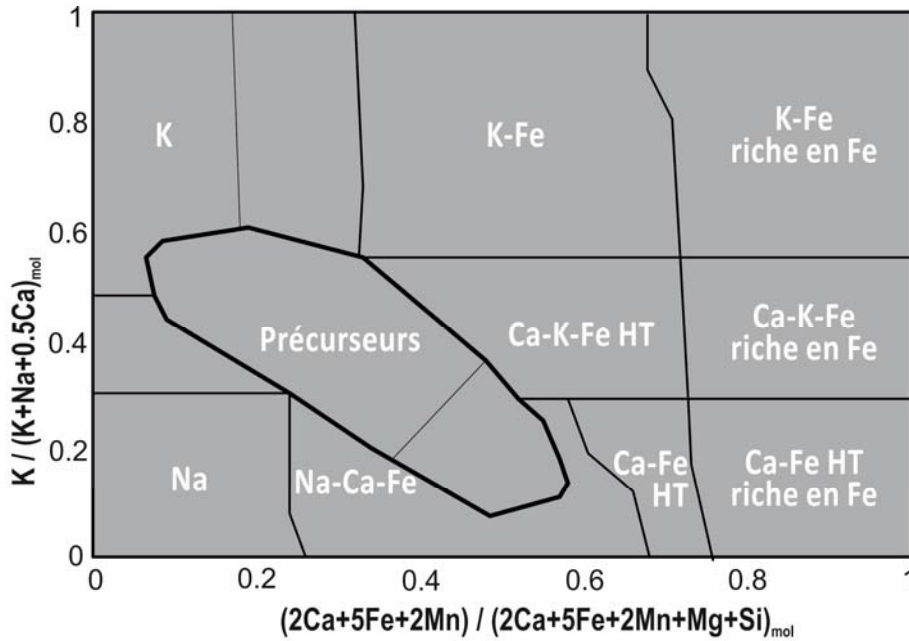
# Signatures des précurseurs les moins altérés

## Zone magmatique du Grand lac de l'Ours

Modifié de Corriveau et al. 2017

Données géochimiques: Corriveau et al. 2015

Diagramme discriminant: Montreuil et al. 2013, 2016a



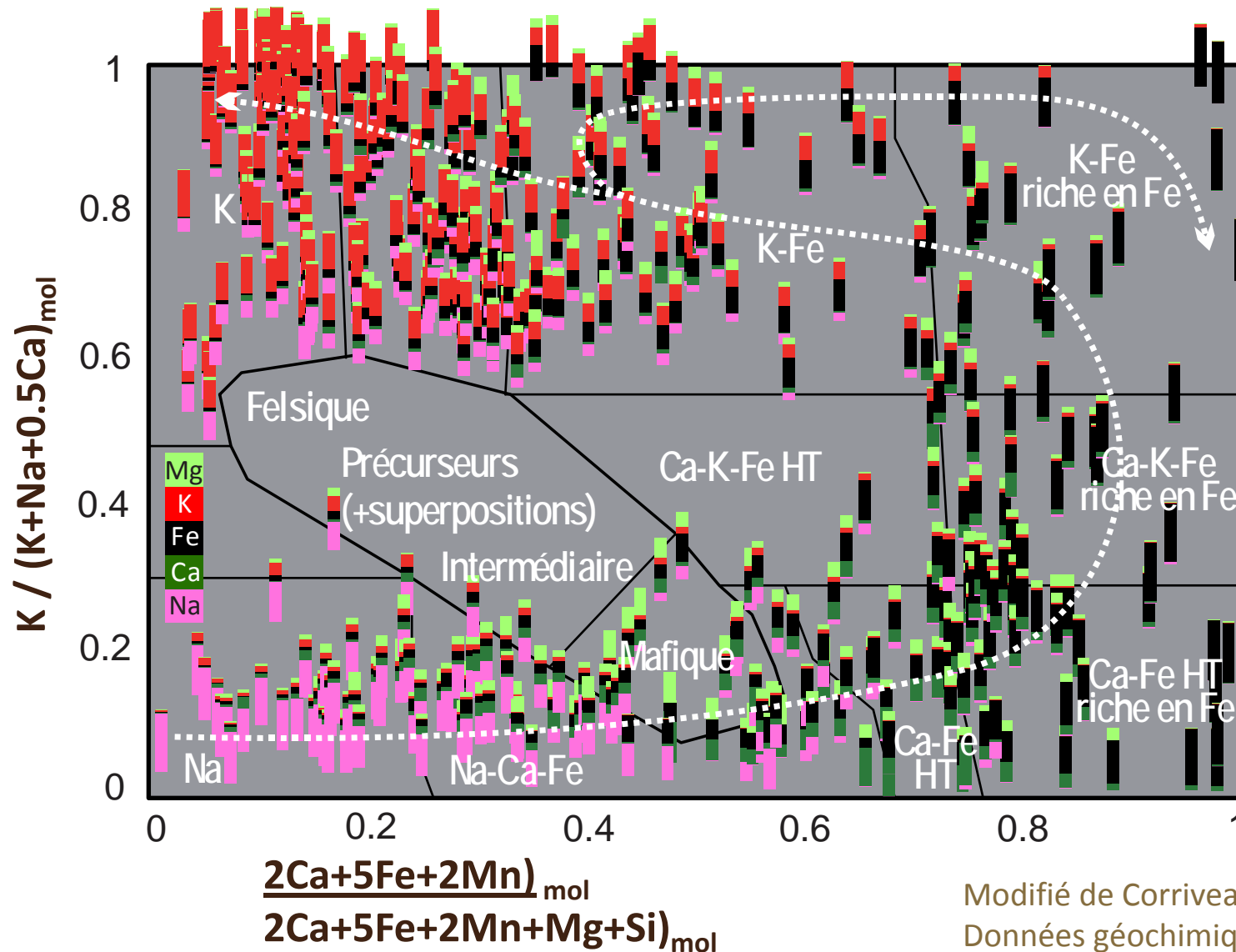
Les analyses de précurseurs choisies combinent une absence d'évidence de terrain pour de l'altération hydrothermale et un bas index d'Ishikawa

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

$$\frac{2Ca+5Fe+2Mn}{2Ca+5Fe+2Mn+Mg+Si}_{mol}$$

# Cheminement prograde

Zone magmatique du Grand lac de l'Ours



Échantillons de roches métasomatiques comportant une seule phase d'altération intense et généralisée (c.-à-d. précurseur complètement transformé + aucune évidence de terrain pour de l'altération hydrothermale subséquente)

Modifié de Corriveau et al. 2017

Données géochimiques: Corriveau et al. 2015

Diagramme discriminant: Montreuil et al. 2013, 2016a

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



Ressources naturelles  
Canada

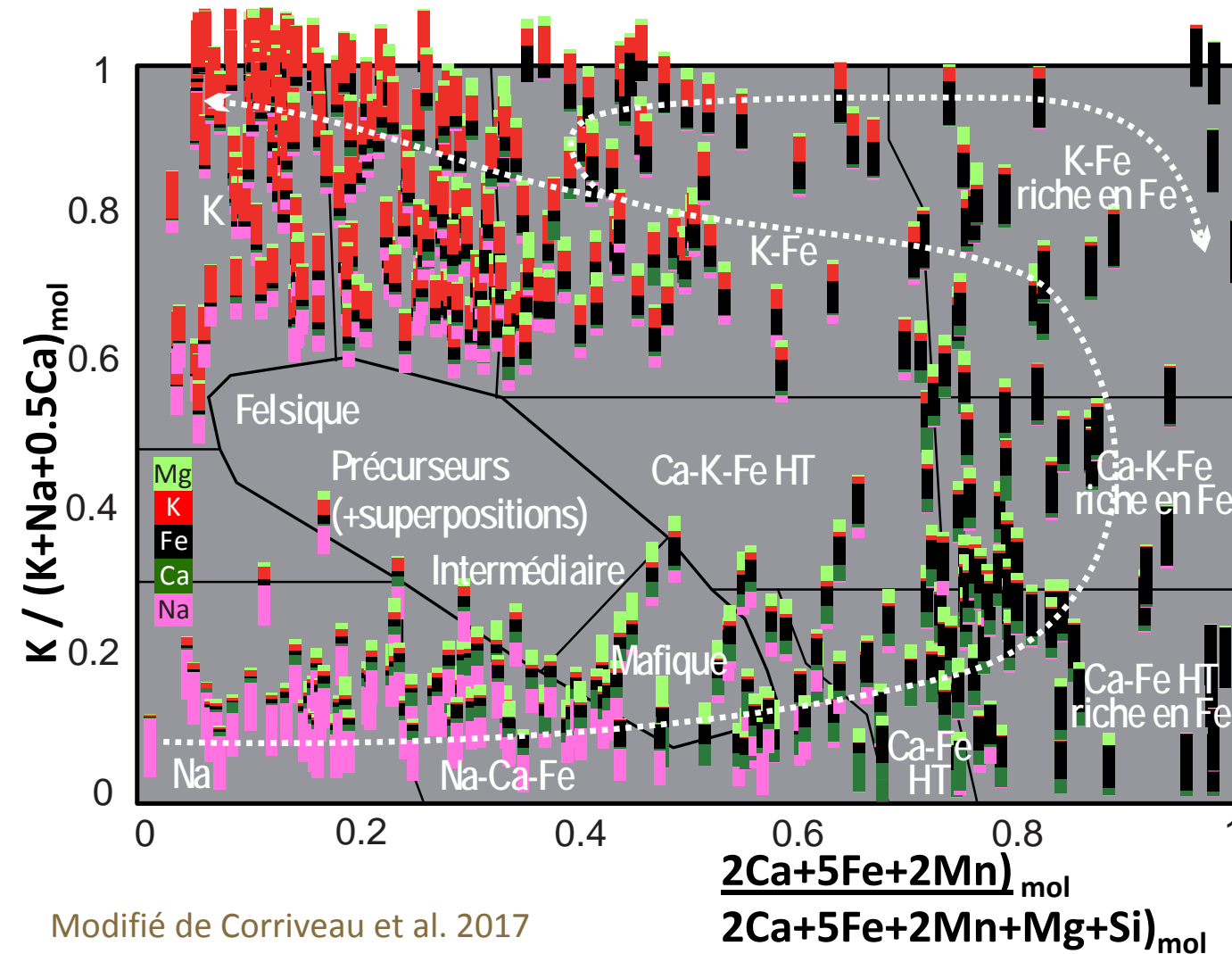
Natural Resources  
Canada

Canada



# Cheminement prograde

Zone magmatique du Grand lac de l'Ours



Modifié de Corriveau et al. 2017

Données géochimiques: Corriveau et al. 2015

Diagramme discriminant: Montreuil et al. 2013, 2016a

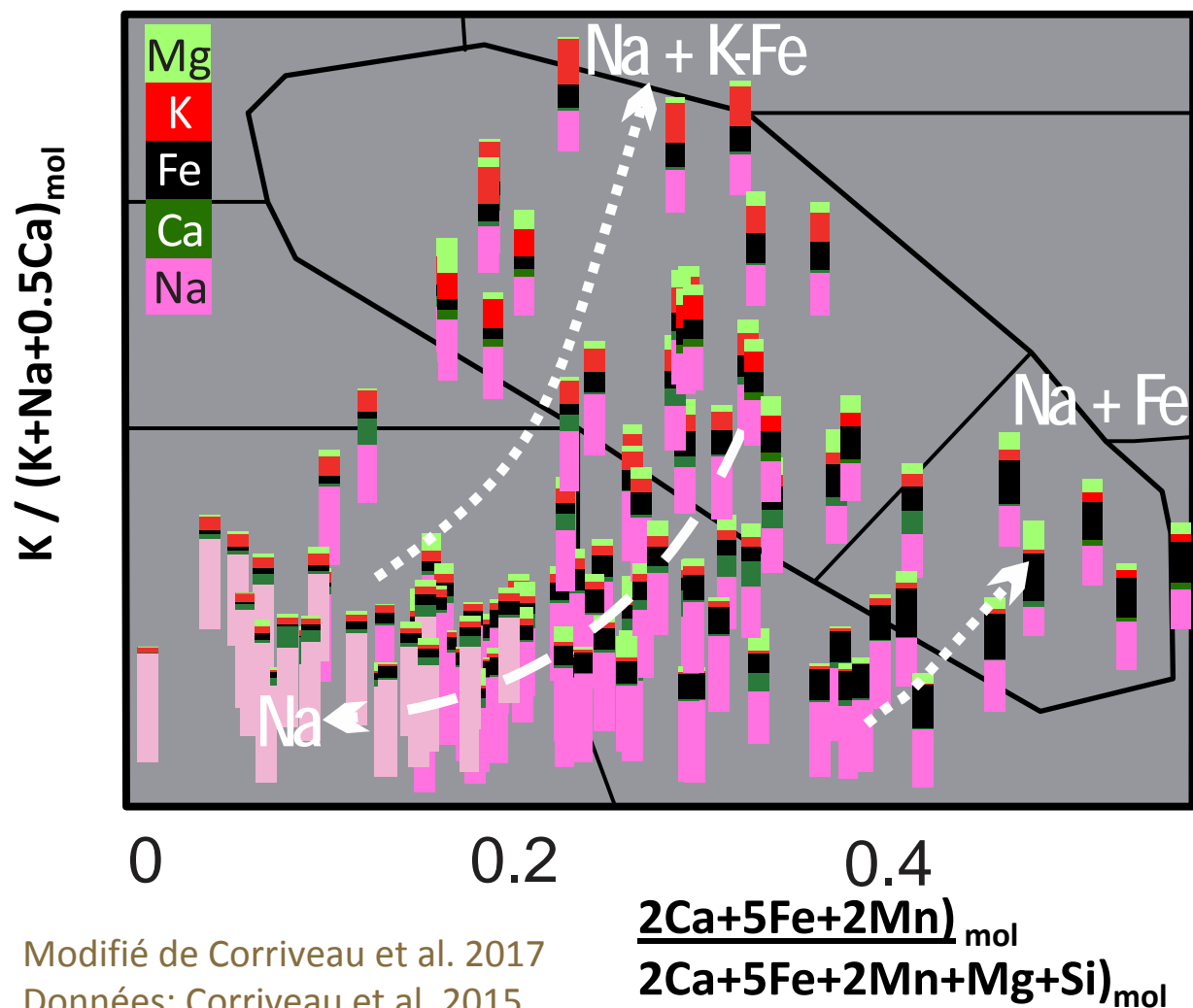
© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

Aux faciès K-Fe, les unités s'enrichissent graduellement en Fe puis peuvent présenter une altération carbonatée ce qui mène à des tendances K-Fe puis Ca-K-Fe riches en Fe

Vers la surface, le K s'accroît fortement par altération potassique, phyllique ou argillique avancée associée au développement de systèmes épithermaux et d'enveloppes d'altération K orthomagmatiques



# Discrimination des cheminements pro- et rétrogrades



Les codes-barres permettent d'identifier:

1. les roches métasomatiques qui tombent dans le champ des précurseurs moins altérés à cause de la superposition de faciès d'altération .....→
2. les cheminements où l'altération des précurseurs s'intensifie - - - →
3. les cheminements télescopés .....→

Modifié de Corriveau et al. 2017

Données: Corriveau et al. 2015

Diagramme discriminant: Montreuil et al. 2013, 2016a

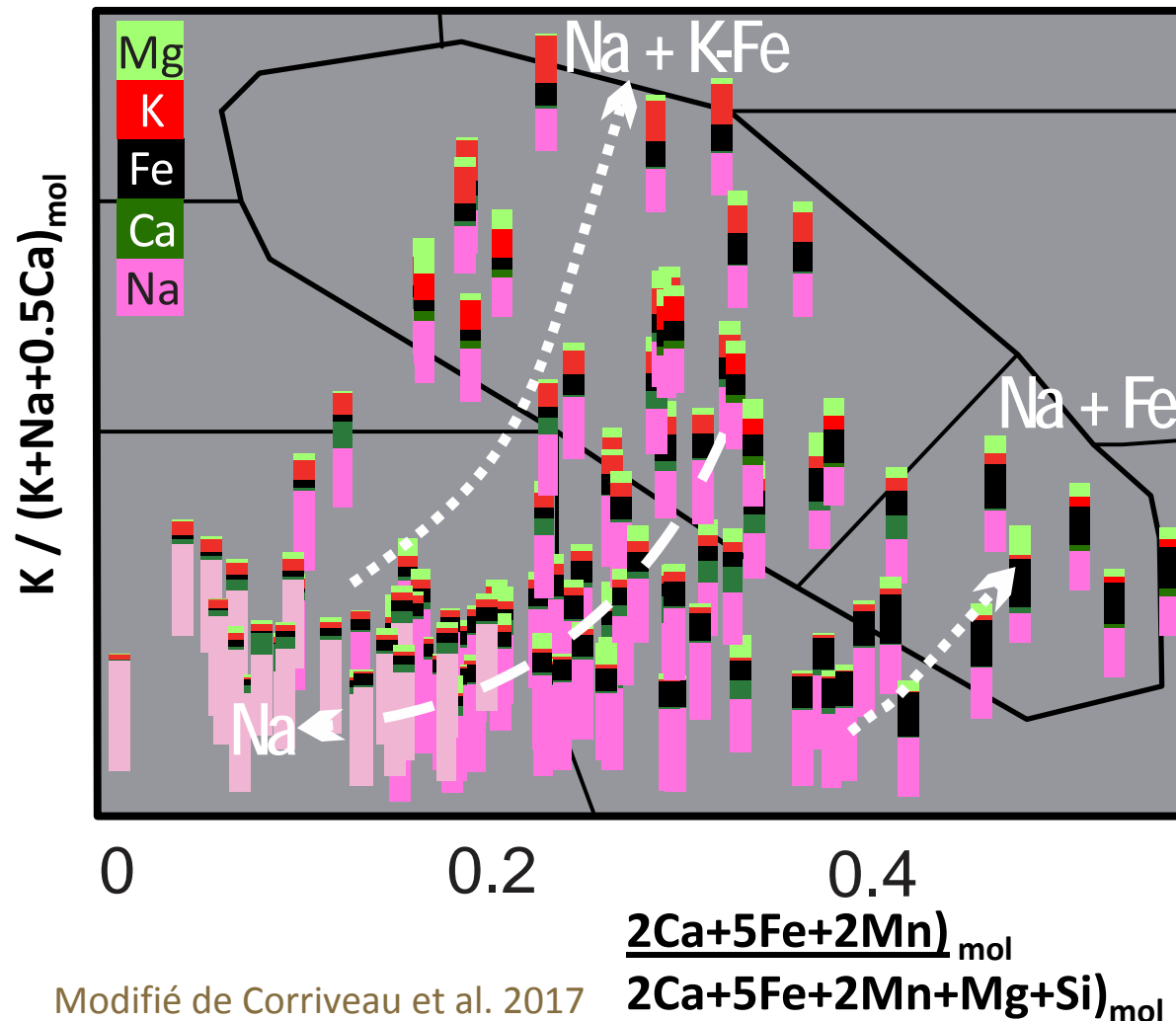
© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

Albitites non altérées par la suite





# Cheminements pro- et rétrogrades



Modifié de Corriveau et al. 2017

Données: Corriveau et al. 2015

Diagramme discriminant: Montreuil et al. 2013, 2016a

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

Les précurseurs faiblement albitisés se distinguent des albitites remplacées par un autre faciès par des proportions relativement égales en Ca-K-Fe

Ca-K-Fe résiduel du précurseur

Na du précurseur + albitisation

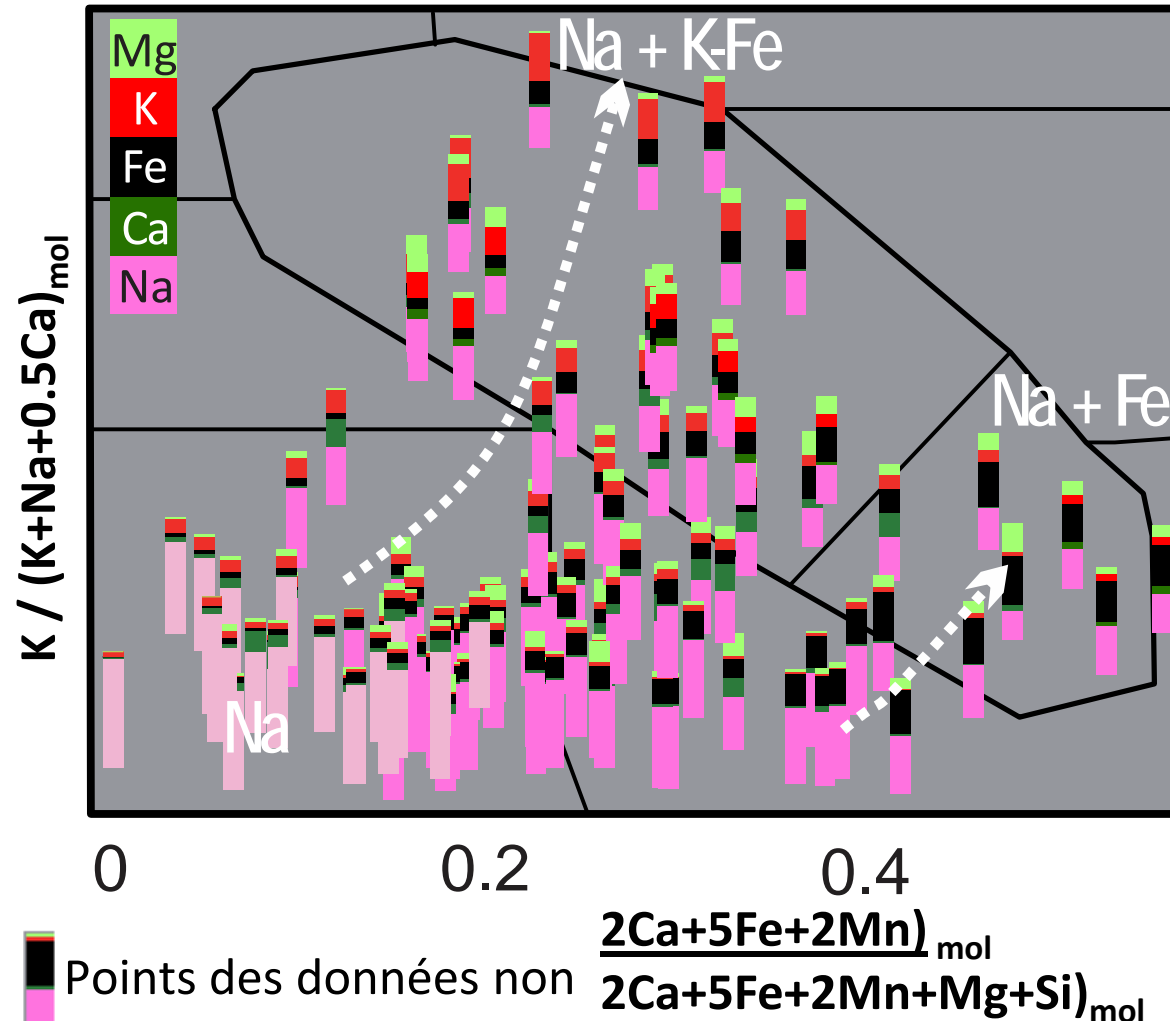
Albitisation

Albitites

Les albitites téléscoquées à des niveaux supérieurs de la croûte et remplacées en partie par les faciès Ca-Fe de HT, K-Fe de HT et BT et Ca-Mg de BT occupent le champ des précurseurs moins altérés



# Albitites remplacées par d'autres faciès d'altération



Les albitites (Na en rose pâle) peuvent conserver une quantité faible de Ca, K et Fe

**Na+Fe:** albitites (Na en rose foncé) remplacées (ou finement veinées) par de la magnétite

**Na + K-Fe:** albitites télescopées au faciès K-Fe

Le métasomatisme rétrograde des albitites (ex. faciès à carbonates, chlorite, feldspath K ou séricite) donne lieu à diverses tendances à Na + K-Fe-Ca-Mg

Modifié de Corriveau et al. 2017

Données: Corriveau et al. 2015

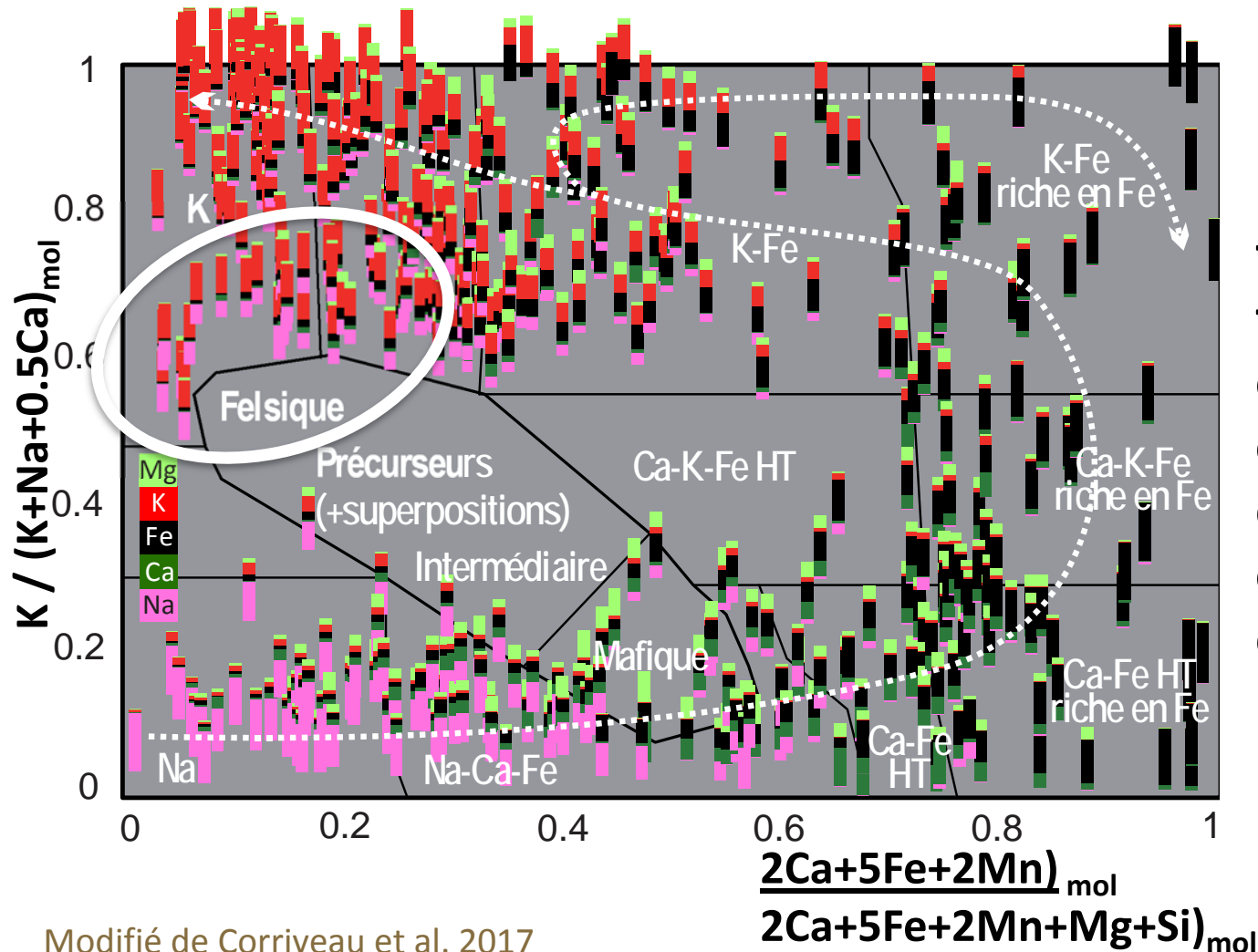
Diagramme discriminant: Montreuil et al. 2013, 2016a

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# Albitites remplacées par des felsites potassiques



Les albitites altérées très fortement par les faciès de felsites K acquièrent des codes-barres similaires à ceux des rhyolites mais les données tombent dans le champs des faciès d'altération K

Points des données non illustrés et situés à la base des codes-barres

Modifié de Corriveau et al. 2017

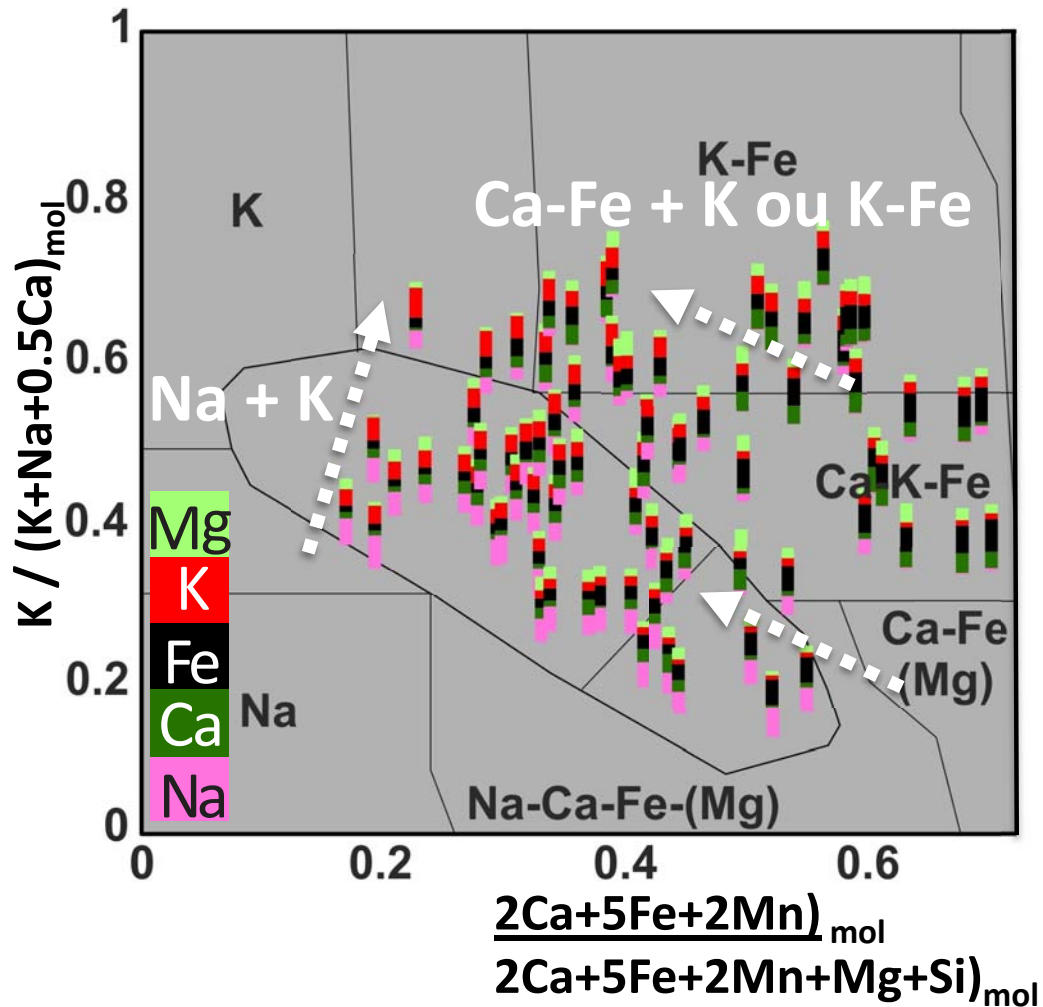
Données: Corriveau et al. 2015

Diagramme discriminant: Montreuil et al. 2013, 2016a

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Altération K de faciès Na-Ca-Fe et Ca-Fe de HT



Les faciès prograde Na-Ca-Fe et Ca-Fe de HT peuvent être remplacés en tout ou en partie par de l'altération K ou K-Fe

La composition des unités se déplacent vers des indices  $K/(K+Na+0.5Ca)_{molaire}$  plus élevés et peuvent tomber dans le champ des précurseurs moins altérés

Les proportions cationiques diffèrent de celles des précurseurs

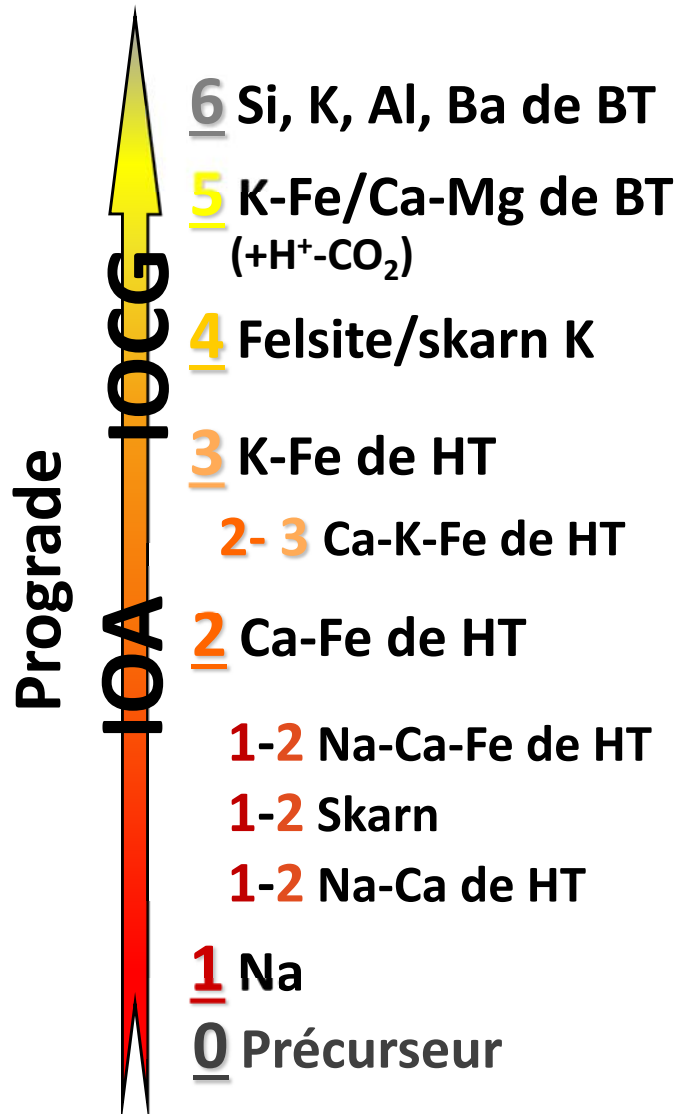
Données: Corriveau et al. 2015

Diagramme discriminant: Montreuil et al. 2013, 2016a

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018







**Chaque cheminement  
métasomatique et  
chaque faciès d'altération  
mène à des types de gîtes  
distincts**

# Progradation des systèmes

L'apport volumineux de fluides salins en profondeur et leur remontée vers la surface induit un gradient géothermique élevé au sein de la croûte supérieure et déclenche une réaction en chaîne avec formation de faciès d'altération à Na, Ca-Fe, K-Fe et épithermaux des profondeurs vers la surface.

Chaque faciès possède des assemblages minéralogiques (c.-à-d. une paragenèse) et une composition diagnostiques et mène à la formation de gîtes minéraux distincts en termes d'associations métallifères.

L'impact du type de roches précurseurs demeure faible sauf là où les roches carbonatées prédominent.

Les attributs mégascopiques clés incluent:

- Faciès d'altération Na à Na-Ca-Fe, les albitites et brèches d'albitites;
- Faciès d'altération HT Ca-Fe, skarns transitionnels et gîtes IOA±ETR
- Faciès d'altération K-Fe de HT et BT et gîtes IOCG
- Faciès transitionnels Ca-K-Fe de HT (à Bt-Apy), K et skarns K et les variantes IOCG à Au-Bi-Co ou à Zn-Pb
- Faciès d'altération épithermale.





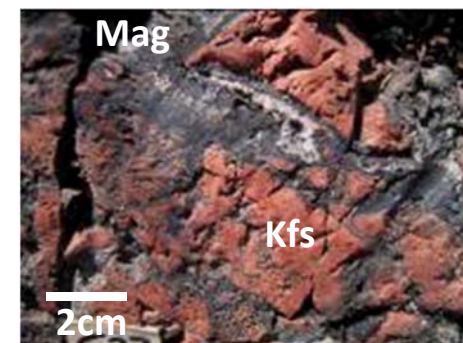
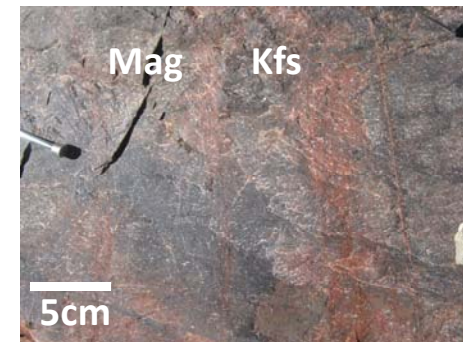
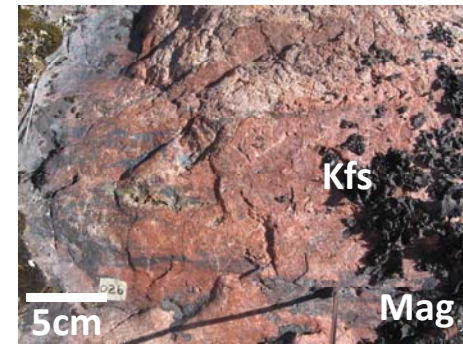
# Modèle métallogénique

Les cheminements métasomatiques témoignent de l'addition et soustraction nette d'éléments au sein des fluides minéralisateurs. Ils enregistrent aussi les flux de chaleur et de fluides qui revivifient périodiquement ces systèmes.

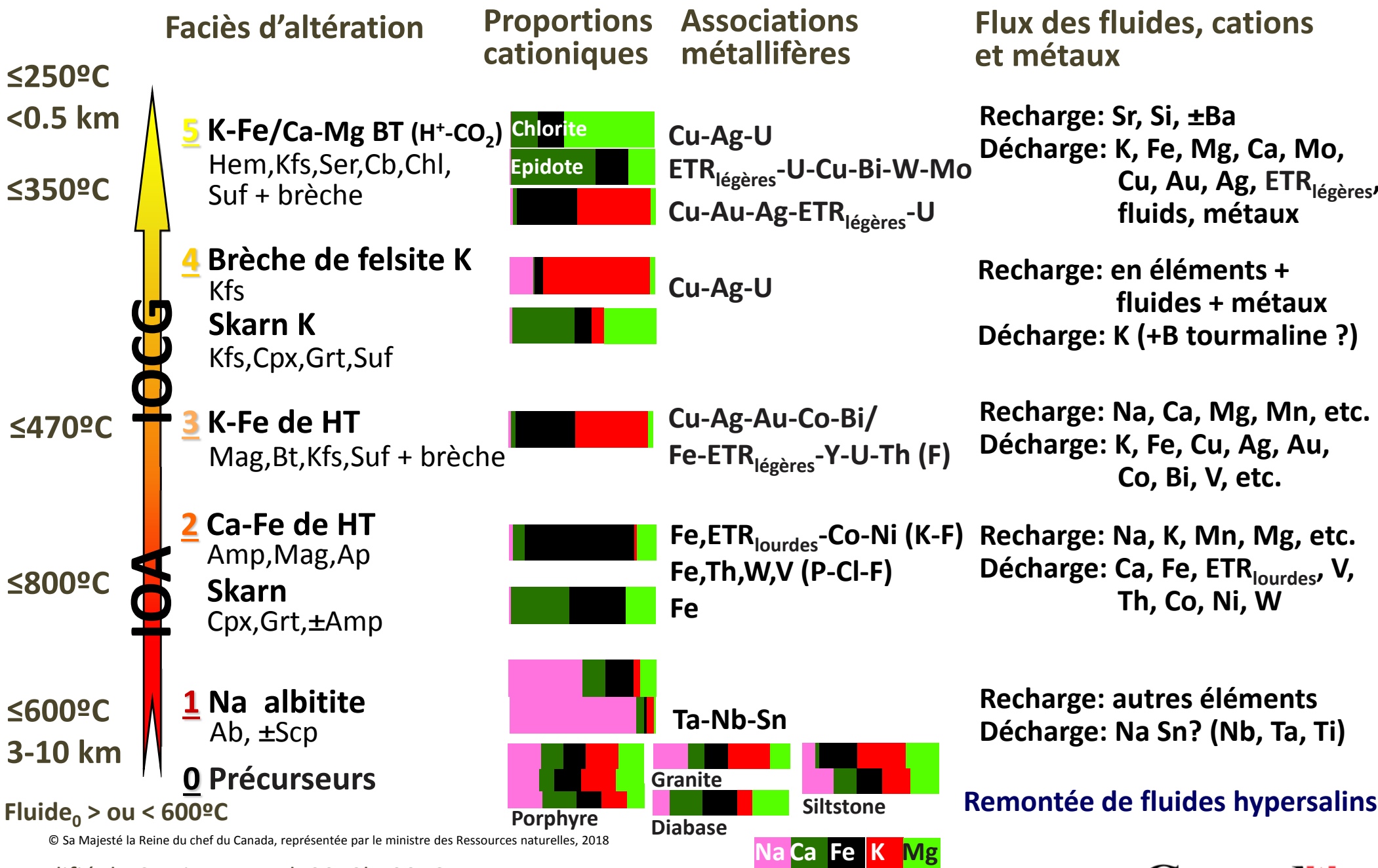
Le développement des brèches au sein des faciès K-Fe est régulier et associé à la minéralisation en sulfures de Cu.

L'évolution des systèmes magmatiques en milieu tectoniquement actif syn-métasomatique et l'influx de magmas pré-, syn et post-tectonique modifient la progradation simple des systèmes et induisent des juxtapositions, des superpositions, de la cyclicité et du télescopage des faciès d'altération.

La régularité des associations métallifères, des types de gîtes, des faciès d'altération et des brèches au sein des trajectoires progrades, rétrogrades et cycliques du métasomatisme (documentées des paléo-profondeurs aux paléo-surfaces ainsi que régionalement) permet d'élaborer un modèle de gîtes holistique utile pour l'exploration et l'interprétation des données de terrain.



# Progradation des facies d'altération et gîtes IOAA



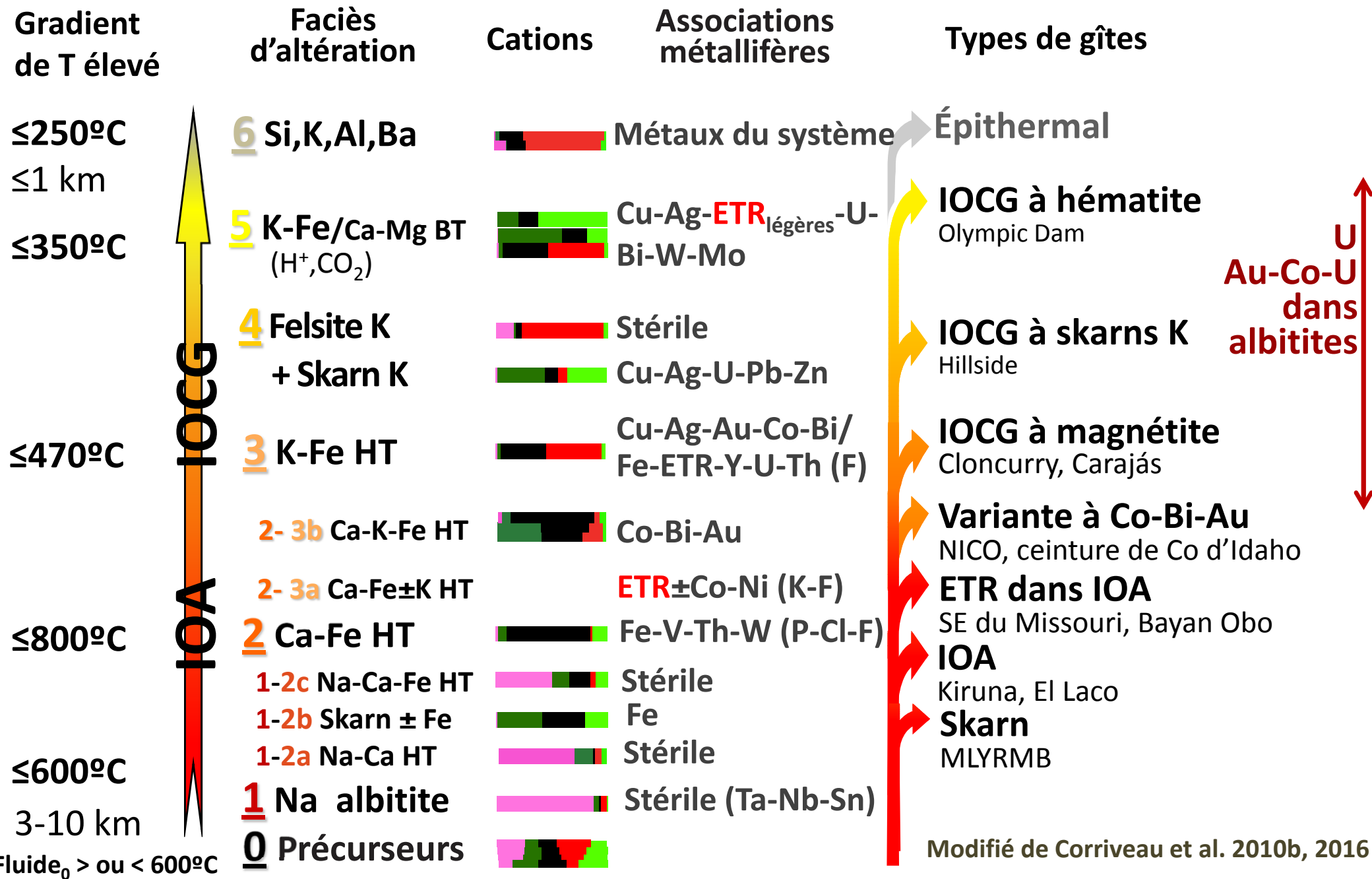
© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

Na Ca Fe K Mg  
Proportions de concentrations molaires



Modifié de Corriveau et al. 2010b, 2016  
Voir aussi Montreuil et al. 2015, 2016a, b, c



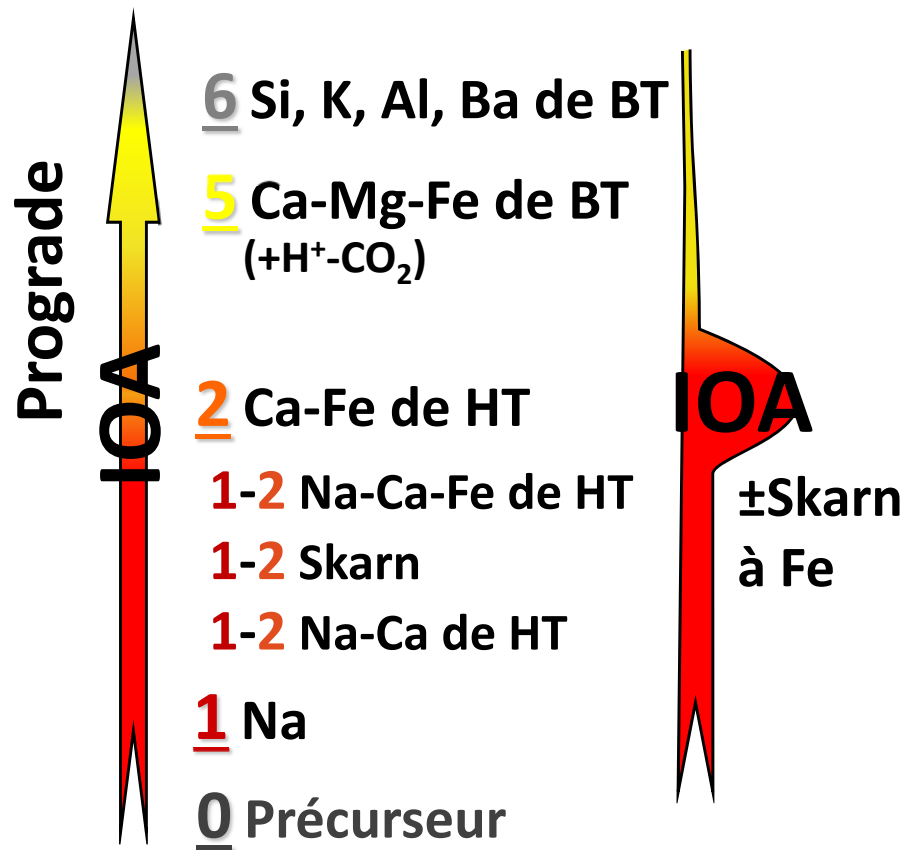


Modifié de Corriveau et al. 2010b, 2016

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

# Cheminement des réactions métasomatiques: IOA

Fort gradient thermique induit par des fluides de haute température et la mise en place d'intrusions magmatiques intermédiaires



**5. Précipitation de carbonates avec rétrogradation in situ mineure (ex. magnétite par hématite)**

**4. Refroidissement rapide**

**3. Précipitation d'IOA au faciès d'altération Ca-Fe de HT**

**2. Apport de chaleur soutenu par intrusion de diorites. Dans certains secteurs des skarns et skarns à Fe se forment**

**1. Altération Na**

Exemples

- P. Ours, Canada (Hildebrand 1986; Mumin et al. 2007, 2010; Corriveau et al. 2010b, 2016)
- MLYRMB, Chine (Zhao et al. 2017a)



# Variantes IOA riches en terres rares

## Précipitation et remobilisation des ETR; enrichissement des ETR lourdes

6 Si, K, Al, Ba de BT

5 K-Fe/Ca-Mg de BT  
(+H<sup>+</sup>-CO<sub>2</sub>)

4 Felsite/skarn K

3 K-Fe de HT

2-3 Ca-K-Fe

2 Ca-Fe de HT

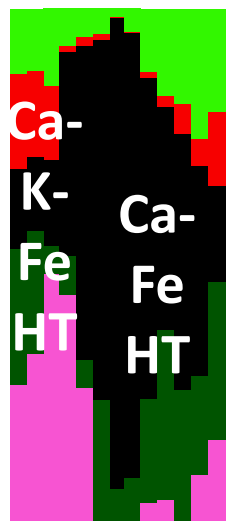
1-2 Na-Ca-Fe

1-2 Skarn

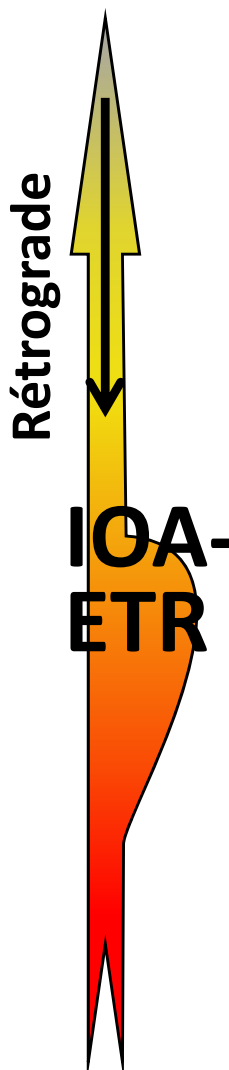
1-2 Na-Ca

1 Na

0 Précurseur



IOA-ETR



1. Les gîtes IOA évoluant vers les faciès K-Fe cristallisent des apatites riches en ETR aux faciès à Ca-Fe ou Ca-Fe-K de HT (Harlov et al. 2016)

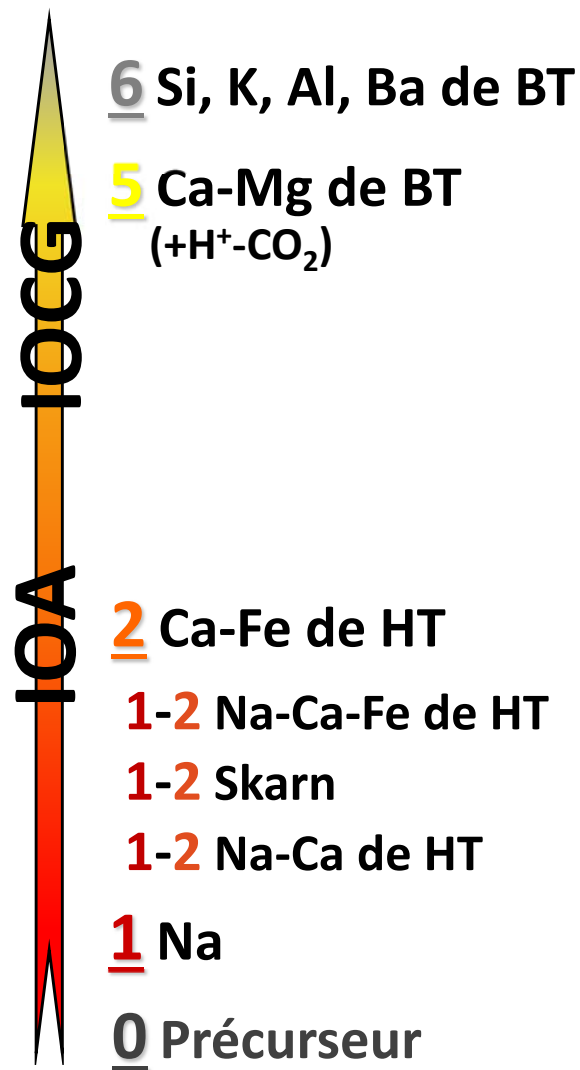
2. Les fluides rétrogrades (ou de nouveaux fluides) réagissent avec le IOA existant, l'apatite de HT se rétrograde en apatite pauvre en ETR par dissolution-reprécipitation couplée ce qui remobilise les ETR (Normandeau et al. 2018)

3. Cristallisation de monazite, xénotime, allanite, etc. riches en ETR

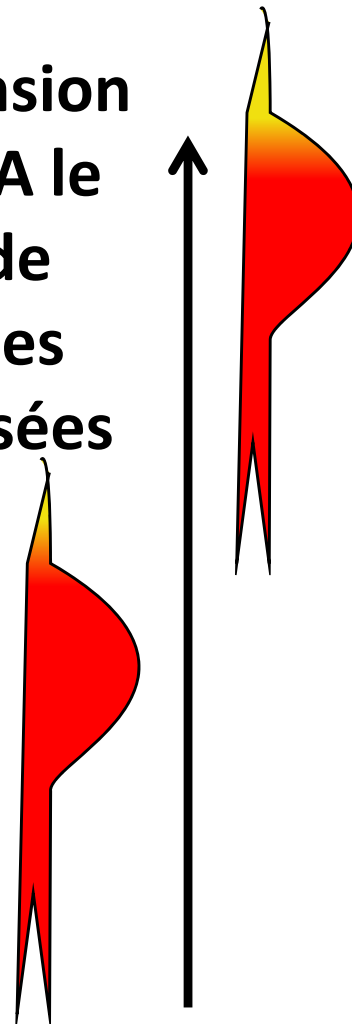
4. Le parallélisme des patrons ETR des zones minéralisées et IOA moins altérés témoigne d'une remobilisation à l'interne SANS apport externe (ex. apport d'ETR de magmas alcalins tel que proposé par Perreault et Lafrance 2015; Hofstra et al. 2017)

5. Développement de composantes épithermales (ex. Pea Ridge, SE du Missouri) (Corriveau et al. 2016; De Toni 2016; Harlov et al. 2016; Montreuil et al. 2016b, c)

# IOA fluidisés?



Ascension  
de IOA le  
long de  
brèches  
fluidisées



Des brèches de fluidisation  
consistant d'IOA peuvent  
remonter hors de leur faciès Ca-  
Fe de HT original (ex., brèches de  
fluidisation à la mine Terra, P. de l'Ours;  
Corriveau et al. données inédites)

Est-ce que ce mécanisme peut  
être impliqué dans la mise en  
place de gîtes IOA près de ou à  
la surface ?



# Genèse des gîtes IOA

**Est-ce que les fluides magmatiques-hydrothermaux sont seuls responsables de la formation des IOA?**

**Modèles de gîtes invoquent:**

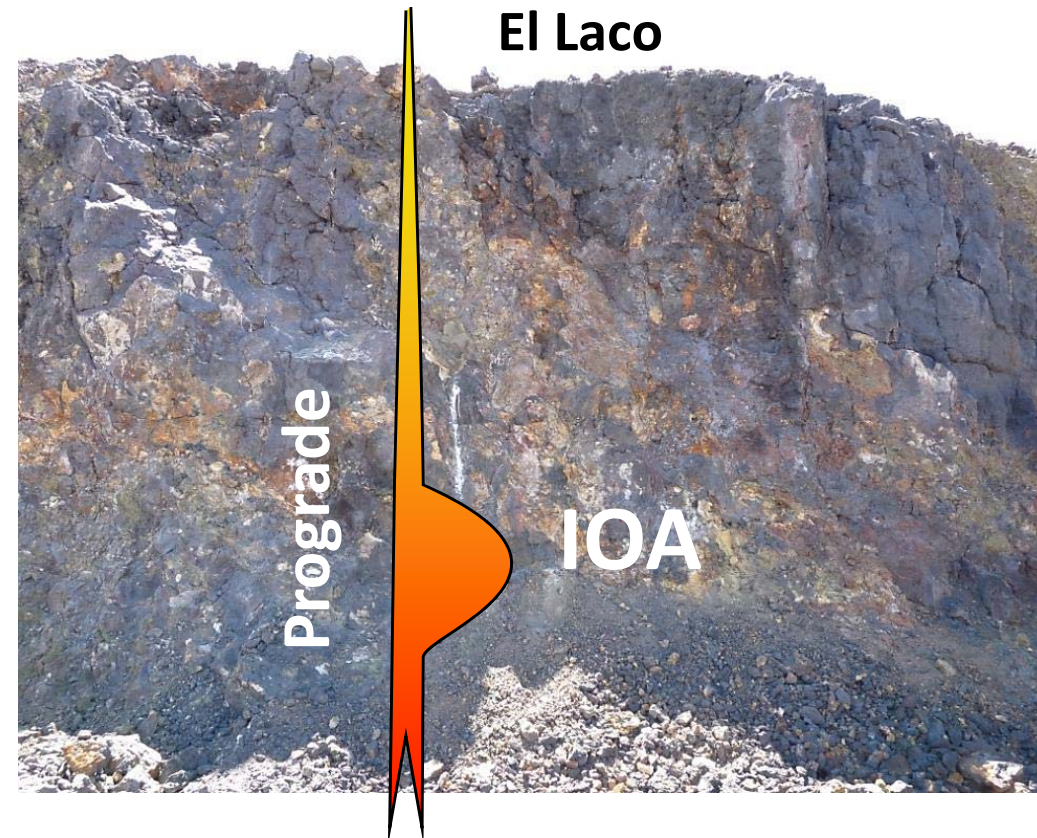
**Métasomatisme (altération magmatique-hydrothermale)**

**Magmas à oxydes de fer (immiscibilité avec andésites avec présence d'inclusions magmatiques d'oxydes de fer dans les andésites contemporaines)**

**Liquides de sels à oxyde de fer**

**Fluidisation de précipités hydrothermaux**

**Flottation de magnétite ignée**



Quelque soit le modèle, les processus invoqués doivent expliquer la formation de corridors d'albitites et la présence des autres faciès métasomatiques observés à l'échelle du gîte et de sa région hôte

Voir: Hildebrand 1986; Hitzman et al. 1992; Williams et al. 2005; Corriveau et al. 2010a, b, 2016, inédit; Porter 2010a, b; Williams 2010a, b; Chen 2013; Knipping et al. 2015; Bilenker et al. 2016; Tornos et al. 2016, 2017; Zhao et al. 2016, 2017a, b

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Gîtes IOA— Ressources

- **Kiirunavaara** (682 Mt, 47.5% Fe), **Malmberget** (271 Mt, 41.8%), **Kaunisvaara** (164.9Mt, 32.7%), **Grangesberg** (115.2 Mt à 40.2% Fe, 0.78% P indiquée) (Suède)
- **Oak Dam** (~560 Mt , 41–56%) (+ Cu, U, Au), **Lightning Creek, Acropolis (Australie)**
- **Marcona** (~1940 Mt, 55.4%) (+ Cu), **Cerro Negro Norte** (377 Mt, 33%), **El Laco** (734 Mt, 49%), **Los Colorados** (943 Mt, 35%), **Romeral** (454 Mt, 28%) (Andes)
- **Bayan Obo (IOA?)** (1500 Mt, 35%) (+57 Mt, 6% ETR<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 2 Mt, 0.13% Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), **Yinachang** (20 Mt, 42-44%) (+ Cu, REE), **Washan** (~214 Mt, 50% Fe), (Chine)
- **Cerro del Mercado, Peña Colorada** (300 Mt, 50-60%) (Mexique)
- **Pea Ridge** (160.6 Mt réserves, ~ 53-55%) + (0.2Mt, 12%ETR), **Pilot Knob (US)**
- **Chador-Malu** (400 Mt, 55%), **Esfordi (Iran)**
- **Marmoraton** (28 Mt, 43%), **Kwyjibo** (ETR lourdes, études de faisabilité en cours) (Canada)

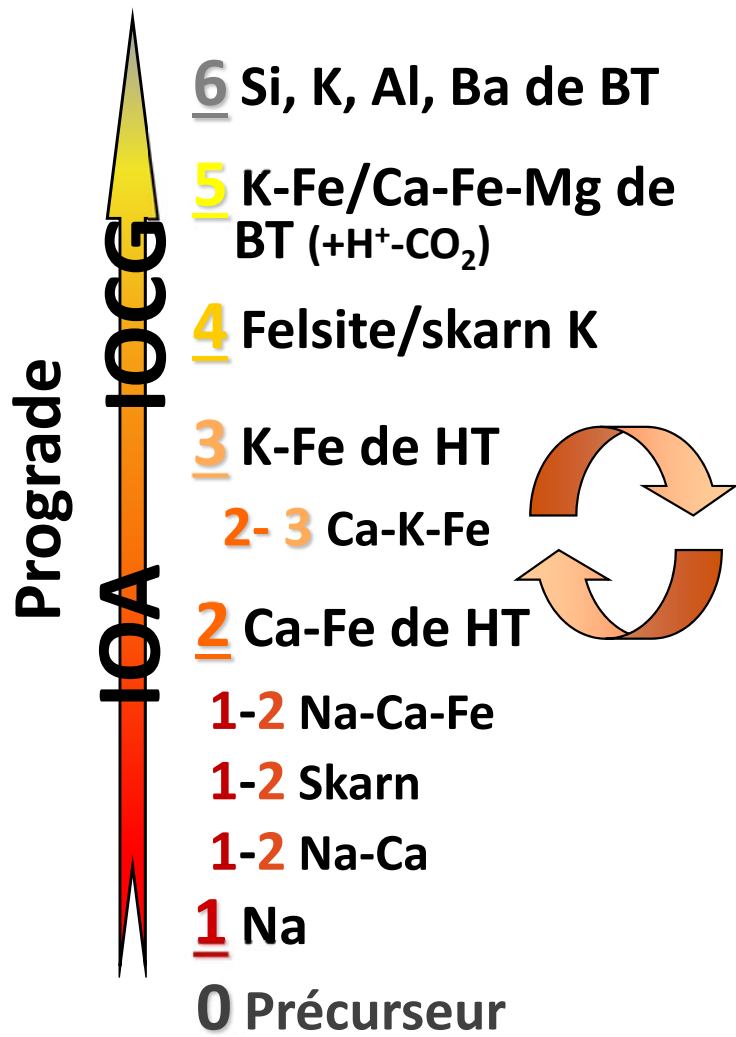
Les faciès d'altération aident à prédire les associations métallifères des gîtes IOA



# Variante à Co-Bi±Au des IOCG du groupe à magnétite

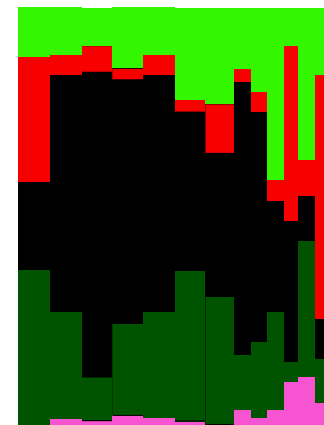
Cheminement prograde + apport de fluide soutenu à haute et moyenne température

À travers des séquences sédimentaires ou métasédimentaires



## Gîte d'Au-Co-Bi-Cu de NICO

P. Ours, Canada



1. Apport répété de fluides riches en Ca+Fe+Au+Co+Bi à des conditions oscillant entre celles des faciès Ca-Fe, Ca-Fe-K et K-Fe de HT
2. Cristallisation d'assemblages à Amp, Amp-Mag, Amp-Bt-Mag, Amp-Mag-Kfs et Kfs-Mag
3. Le Kfs demeure mineur et la bréchification est rare et d'extension limitée
4. Le remplacement est principalement stratoïde
5. Le système peut par la suite évoluer vers un faciès Ca-Fe-Mg à carbonates et magnétite et/ou à K-Fe.

Goad et al. 2000; Corriveau et al. 2010b, 2016; Slack 2013; Acosta-Góngora et al. 2015a, b; Montreuil et al. 2016b

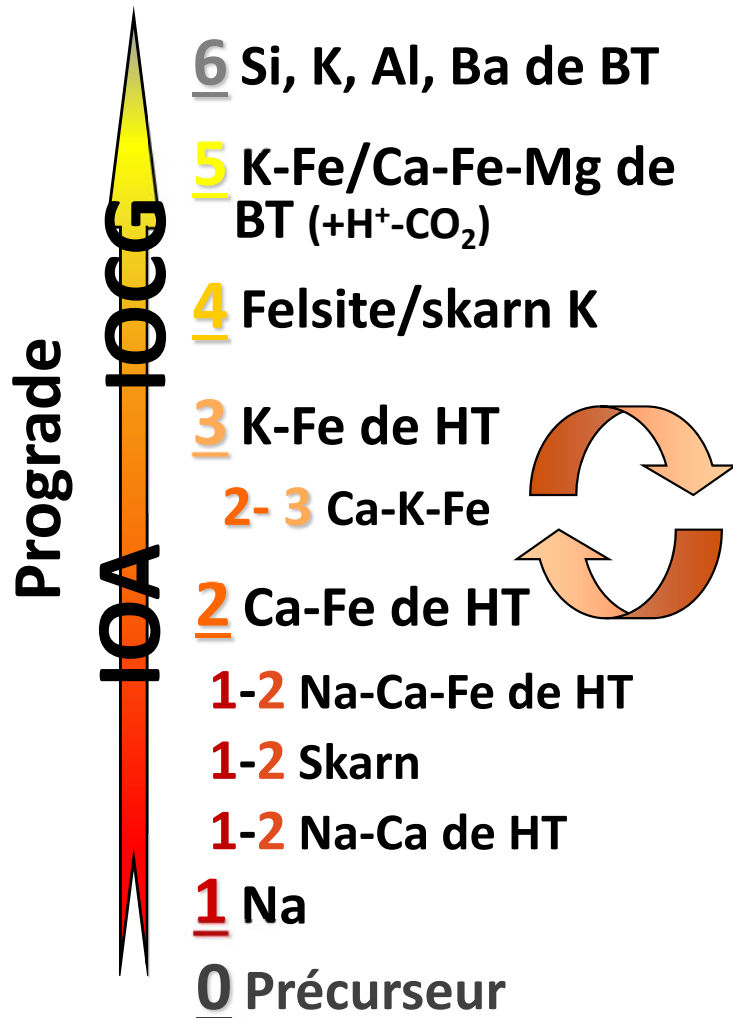
© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# IOCG du groupe à magnétite stratoïde

Cheminement prograde + apport de fluide soutenu à haute et moyenne température

**À travers des séquences sédimentaires ou métasédimentaires**



Gîte de Dahongshan, Chine  
Zhao et al. 2017b

1. Le faciès Ca-Fe de HT (Amp-Bt-Mag) évolue vers le faciès K-Fe de HT à Bt-Mag avec peu de Kfs formé ce qui inhibe la formation de brèches importantes
2. Le remplacement est stratoïde
3. De la déformation ductile est commune
4. Des assemblages à Amp-Grt-Bt incluant des schistes à Bt ou Amp-Bt se forment si les unités sont déformées et recristallisées lors du métasomatisme
5. Le système peut par la suite évoluer vers un faciès Ca-Fe-Mg à veines de carbonates.

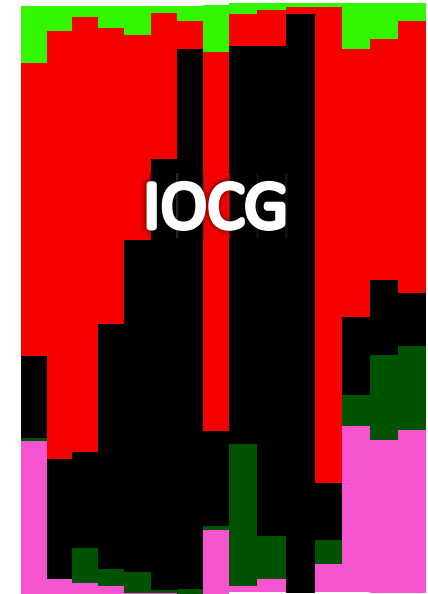
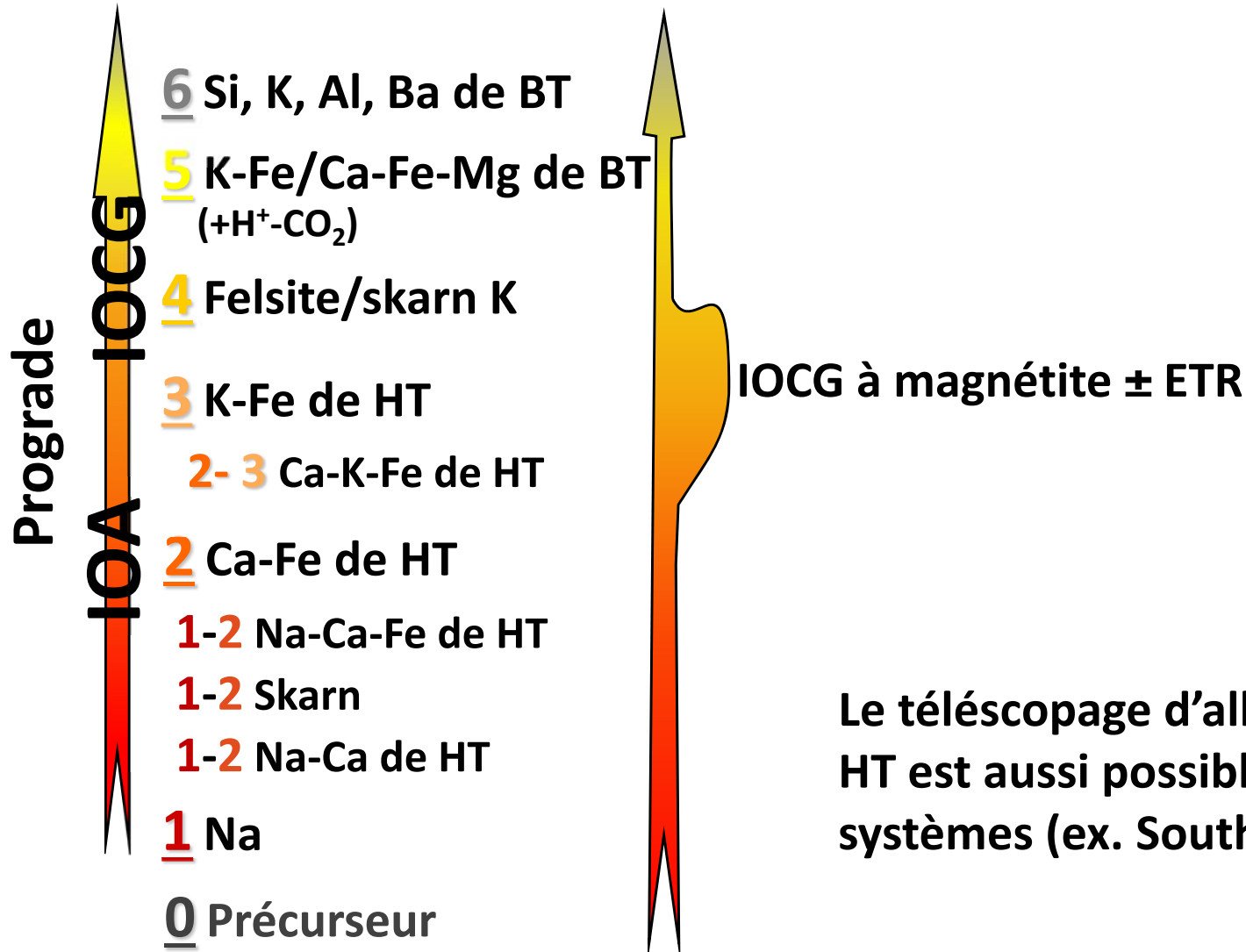
© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# K-Fe de HT: IOCG à magnétite

Cheminement prograde du métasomatisme avec ou sans réapprovisionnement en fluides à température moyenne ou basse



Le télescopage d'albitites au faciès K-Fe de HT est aussi possible localement au sein des systèmes (ex. Southern Breccia, P. Ours)

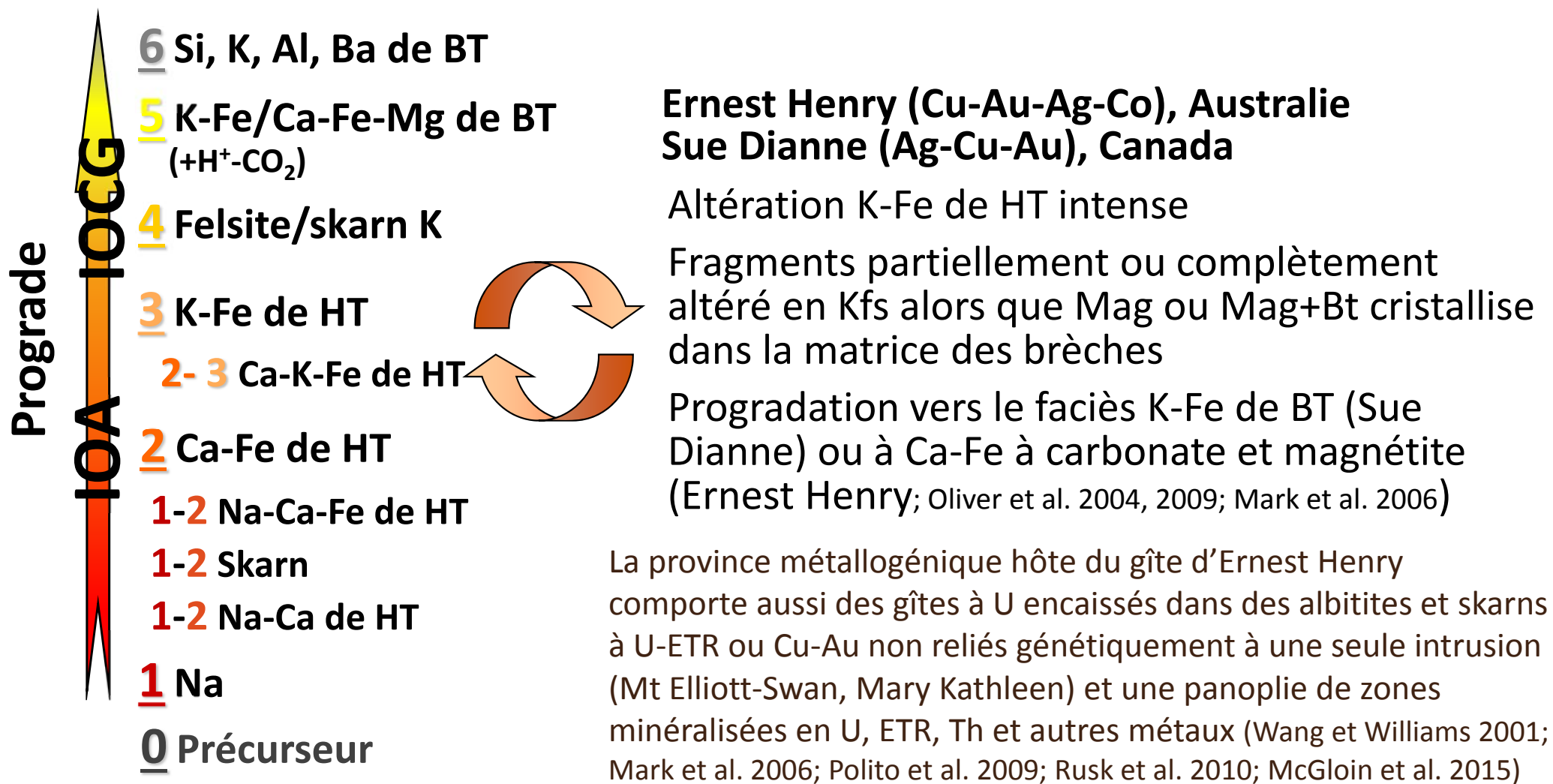
© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# IOCG à magnétite avec bréchification systémique

Cheminement prograde + apport de fluide soutenu à haute et moyenne température

**À travers tous types de roches; nécessite une abondante cristallisation de Kfs**



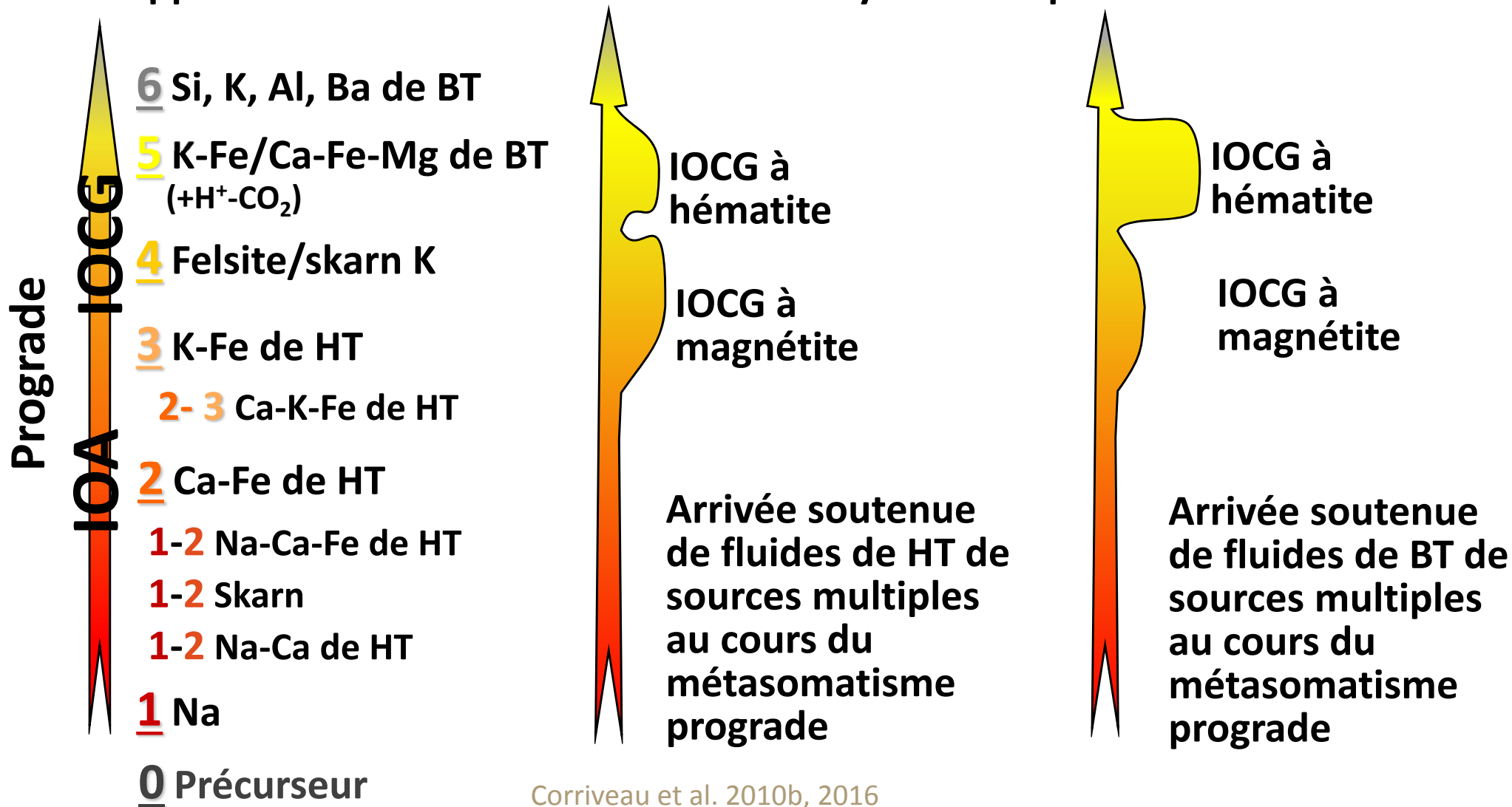
© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# IOCG à magnétite évoluant vers IOCG à hématite

Chemin prograde à un ou plusieurs stages d'évolution (voir Skirrow 2010)  
+ apport soutenu de fluides de faible à moyenne température



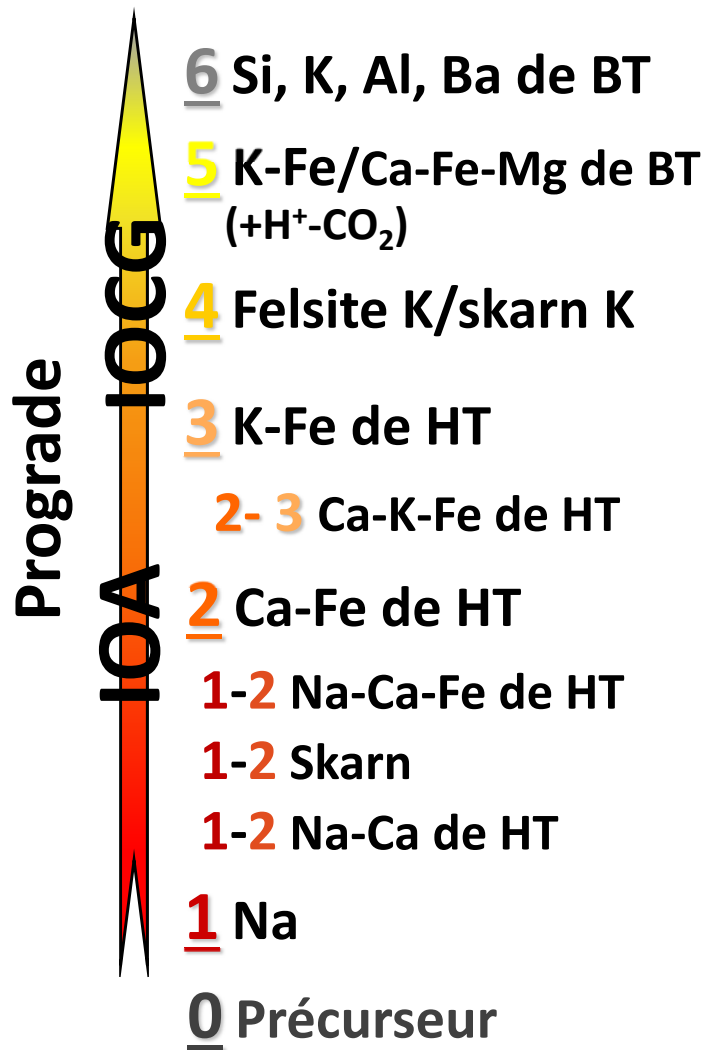
Corriveau et al. 2010b, 2016

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

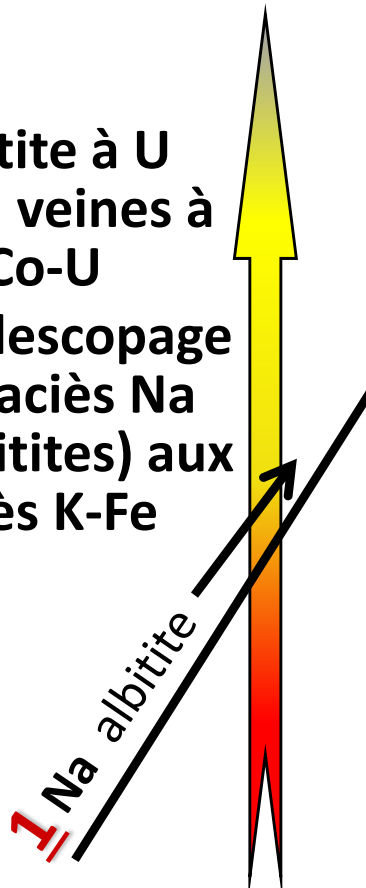


# U encaissé dans des albitites

Télescopage des faciès d'altération des albitites à des faciès K-Fe (ou Ca-Mg de BT)

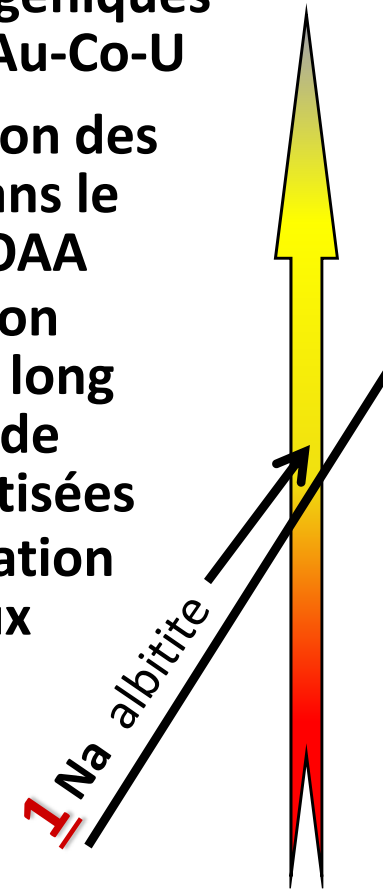


Albitite à U  
ou à veines à  
Au-Co-U  
= télescopage  
du faciès Na  
(albitites) aux  
faciès K-Fe



Couloirs "orogéniques"  
d'albitites à Au-Co-U

1. Précipitation des métaux dans le système IOAA
2. Déformation répétée le long des zones de failles albitisées
3. Remobilisation des métaux

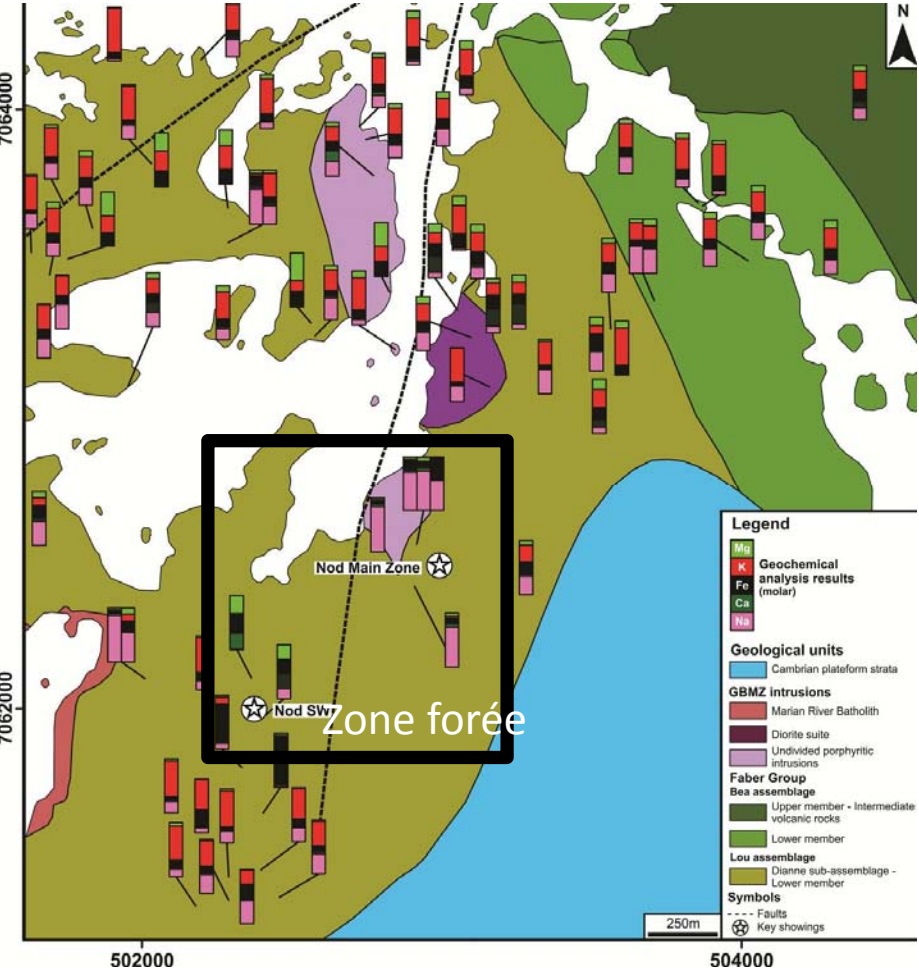


Modifié de Corriveau et al. 2010b, 2016, 2017; Wilde 2013; Montreuil et al. 2015, 2016c; Hayward et al. 2016

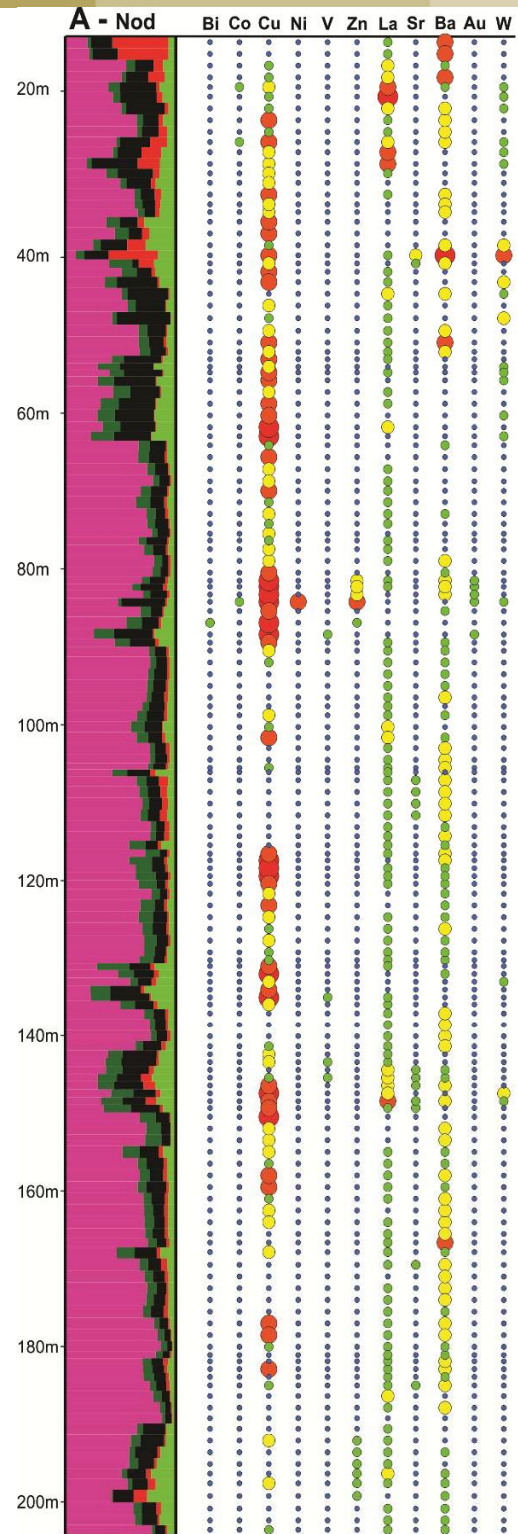


# Secteur de Nod

Altération Na + Ca-Fe de HT  
 Très peu d'altération K-Fe de HT et BT  
 Faible enrichissement en métaux usuels  
 Très peu de métaux précieux



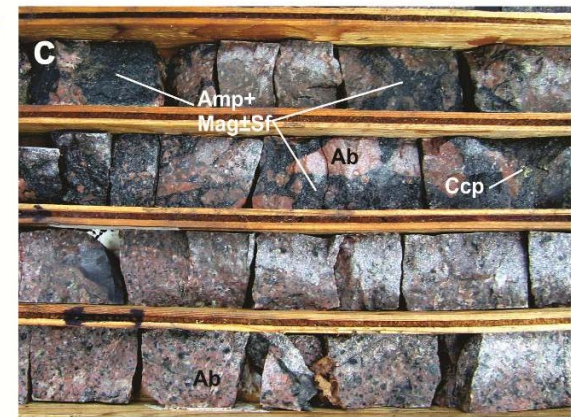
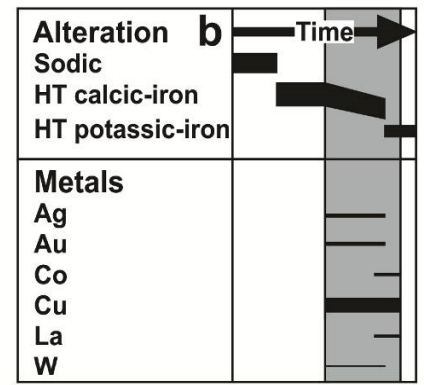
© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



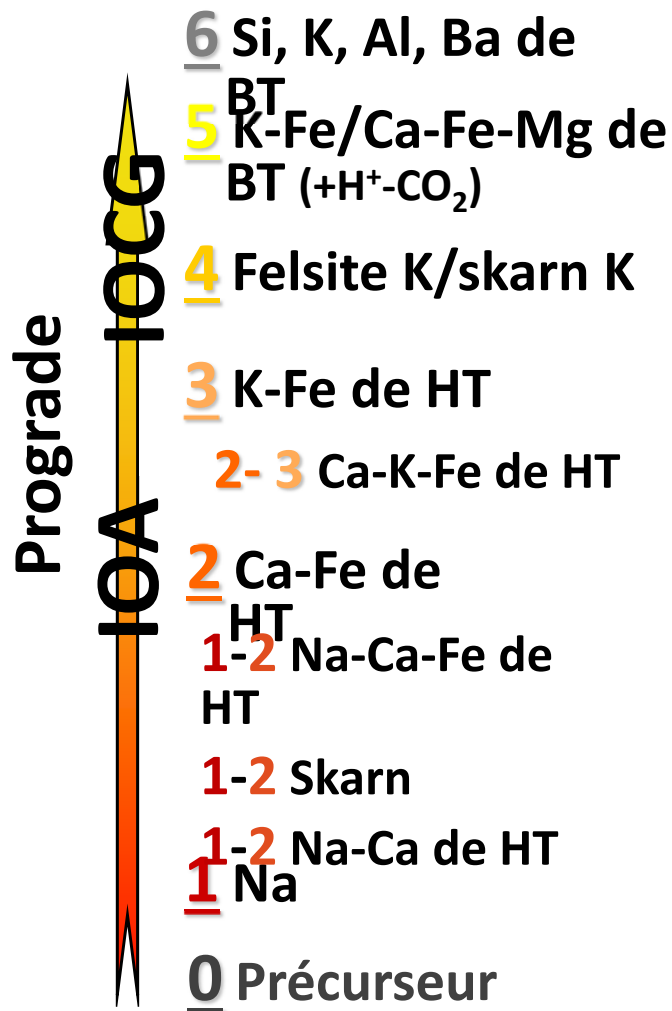
Au (ppb)	Ba (ppm)	Bi (ppm)	Co (ppm)
• 0 - 50	0 - 100	0 - 100	0 - 100
• 50 - 500	100 - 200	100 - 200	100 - 200
• 500 - 2000	200 - 500	200 - 500	200 - 500
• 2000 - 5000	500 - 1000	500 - 1000	500 - 1000
• 5000 - 200000	1000 - 20000	1000 - 20000	1000 - 20000
Cu (ppm)	La (ppm)	Ni (ppm)	Sr (ppm)
• 0 - 100	0 - 20	0 - 100	0 - 50
• 100 - 200	20 - 50	100 - 200	50 - 100
• 200 - 500	50 - 100	200 - 500	100 - 200
• 500 - 2000	100 - 200	500 - 2000	200 - 500
• 2000 - 100000	200 - 2000	2000 - 30000	500 - 10000
V (ppm)	W (ppm)	Zn (ppm)	
• 0 - 100	0 - 20	0 - 100	
• 100 - 200	20 - 100	100 - 200	
• 200 - 500	100 - 200	200 - 500	
• 500 - 1000	200 - 1000	500 - 3000	
• 1000 - 2000	1000 - 20000	3000 - 20000	

**Geochemical analysis results (molar concentration)**

Na Ca Fe K Mg



# Faciès métasomatiques



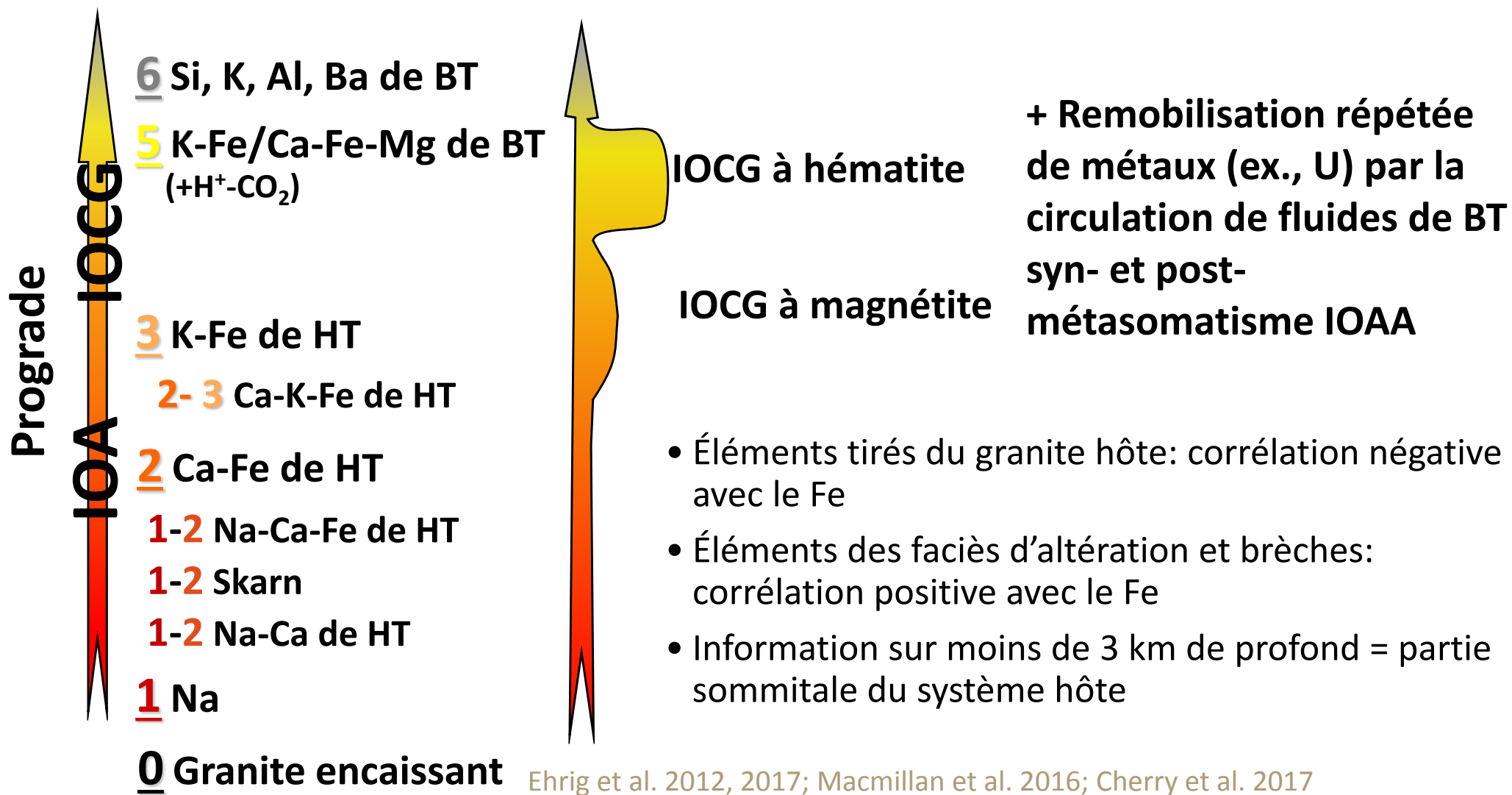
Prograde  
Rétrograde  
Cyclique  
Téléscopé

- Un outil de cartographie pétrologique
- Un outil d'exploration
- Un moyen d'unifier les modèles métallogéniques pour des systèmes minéralisateurs avec des associations métallifères et des types de gîtes variés, voire disparates et développer des stratégies d'exploration efficaces



# Olympic Dam

## Province à Cu-Au d'Olympic, Australie



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Province Cu-Au d'Olympic

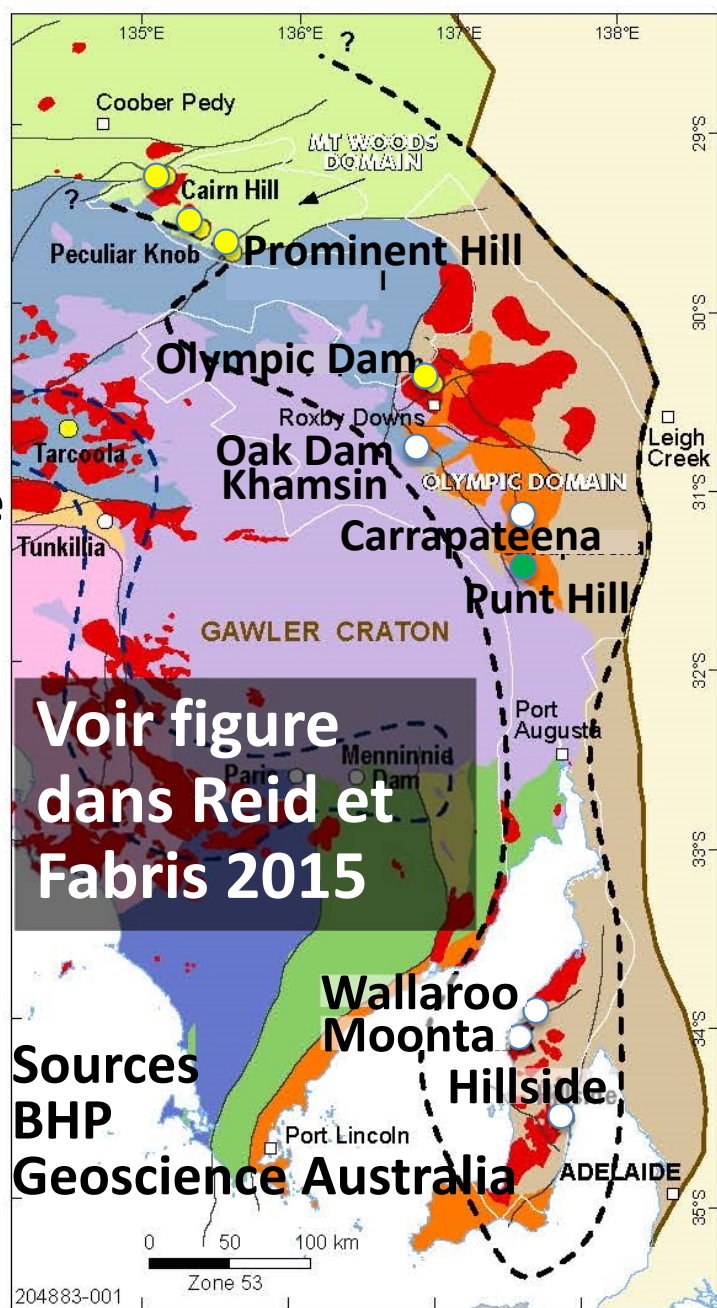
Craton du Gawler, Australie

Vaste province ignée felsique volcano-plutonique s'étendant sur 700 km

Magmas de type I, oxydés, et à composantes de type A ou juvéniles

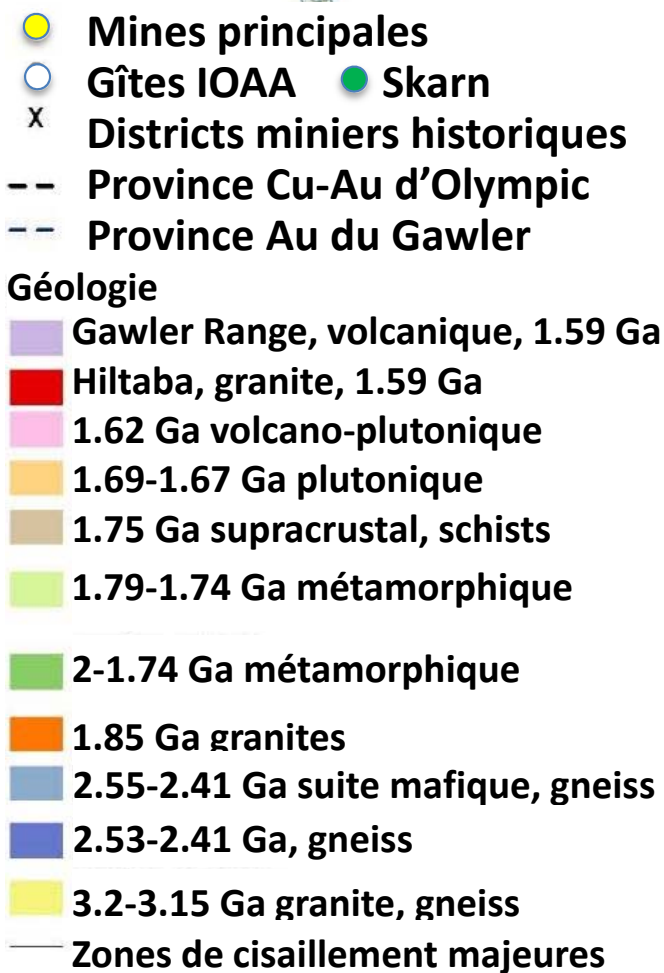
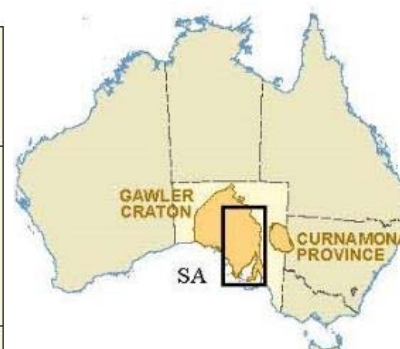
Granites de type A

- Magmatisme de haute température ( $>900^{\circ}\text{C}$ ; voir Creaser 1996)
- Aucune évidence de rift anorogénique



Voir figure dans Reid et Fabris 2015

Sources  
BHP  
Geoscience Australia





# Structure de la région d'Olympic Dam

dérivée de transects magnétotelluriques et sismiques

- **Ceinture orogénique avec une double vergence:** interprétation de Drummond et al. (2006) en cours de ré-examen suite au retraitement des données sismiques (voir Wise et al. 2016)
- **Rampe d'échelle crustale (chevauchement) atteignant le Moho**
- **Diminution abrupte de la réflectivité à l'interface du Moho et de la croûte inférieure sous le gisement d'Olympic Dam**
- **Marge cratonique archéenne et autres discontinuités lithosphériques majeures**
- **Fusion d'un manteau sub-continental métasomatisé**
- **Zones de cisaillement actives à 1.59 Ga, des failles sont altérées à magnétite**
- **Failles interprétées comme des conduits de premier ordre pour les IOCG**
- **Zone de basse réflectivité à travers la croûte supérieure sous le système minéralisateur principal (conduit magmatique, altération hydrothermale telle qu'albitisation?)**
- **Altération en Fe forme une série de réflecteurs sur 300 m de largeur jusqu'à une profondeur de ~3 km**

*Voir figures dans Drummond et al. (2006); voir aussi Corriveau (2007), Griffin et al. (2013) et Thiel et al. (2016) pour l'importance des chemins crustaux et mantelliques des magmas, des métaux et des fluides dans les systèmes minéralisés de type IOCG; Wise et al. 2016; Reid et al. 2017*

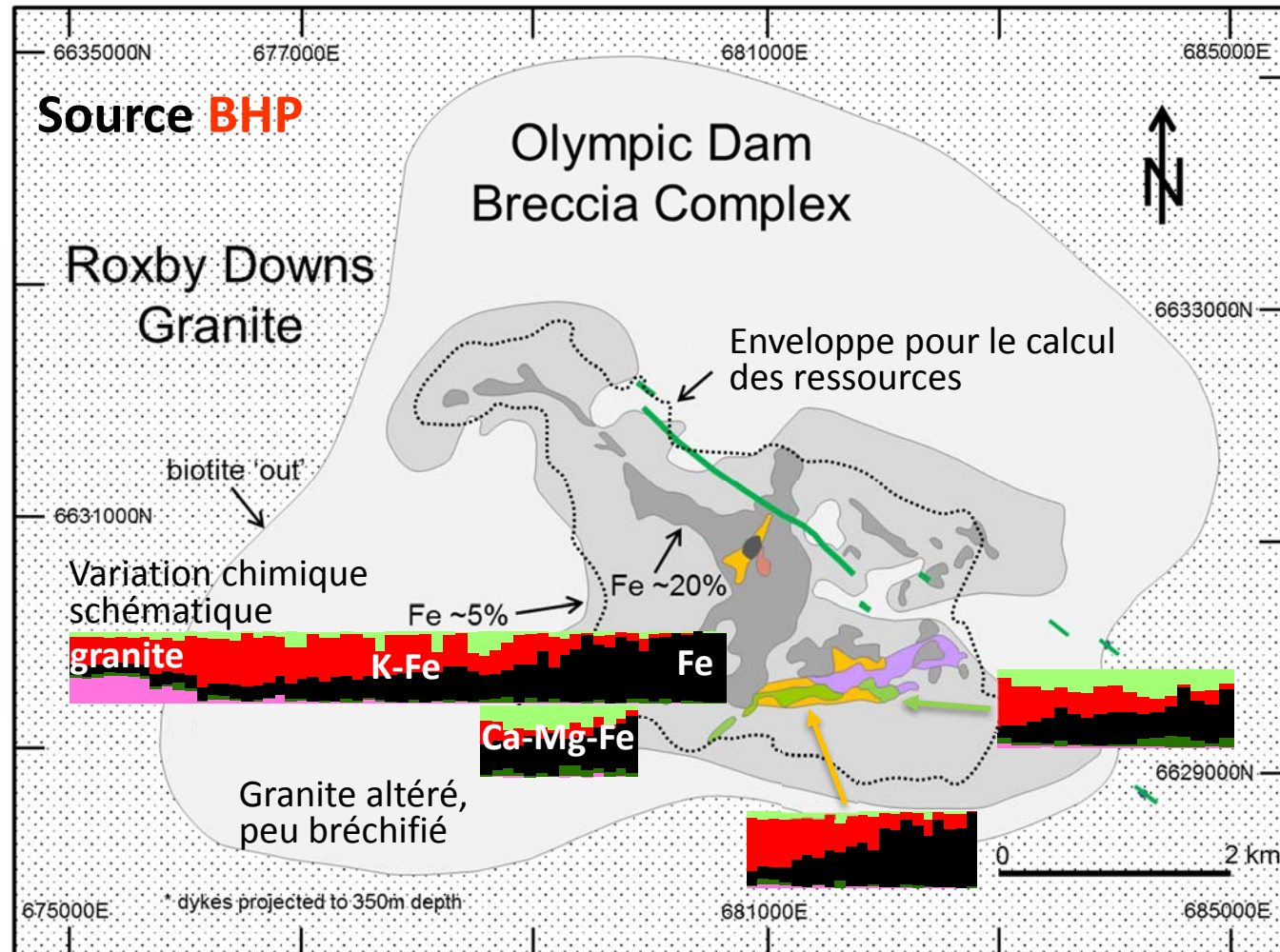
© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Olympic Dam

- Gîte à oxydes de fer Cu-U-Au-Ag
- Sous ~350m de roches sédimentaires non altérées
- Encaissé dans un système de brèches tectoniques-ignées- hydrothermales 'Olympic Dam Breccia Complex' ~50 km<sup>2</sup>
- Au sein du granite de Roxby Downs de ~1594 Ma
- Empreinte du gîte sur ~6 km x 3 km x 800 m
- Fe s'accroît des bordures vers le centre

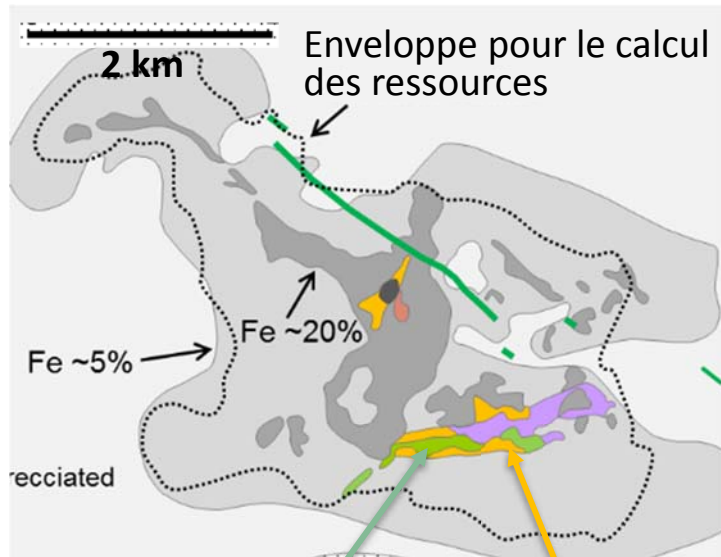
Figure modifiée de Ehrig et al. 2012  
Données géochimiques: Ehrig et al. 2012; McPhie et al. 2016



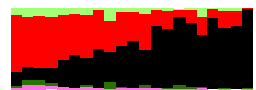


# Olympic Dam

Altération K-Fe et K-Fe+Ca-Mg du granite



Grès et shales verts



Grès et shales rouges

Compositions typiques de faciès d'altération K-Fe et Ca-Mg de BT

Figure modifiée de Ehrig et al. 2012

- 7 x 5 km de bréchification et d'altération
- Altération à Kfs-Hem (K-Fe), à Ab (Na) et à Mag-Ap (Ca-Fe de HT) reconnues récemment
- Altération:
  - Na (Ab)
  - Ca-Fe de HT (Mag-Ap + Sd-Chl-Qz)
  - K-Fe de BT (Hem-Kfs-Ser-Fl\Hem-Ser-Fl\Hem-Qz-Brt)
  - Fe de BT (Hem-Qz-Brt)
  - Minerais sulfurés (Sp\Gn\Py\Ccp\Bn\Cct)
  - Ca-Fe-Ba-C-F-S de BT (Sd\Fl\Brt)
  - Argillique avancée (acide à Ser-Qz ± Al-OH)
- Sulfures Fe-Cu, U, minéraux à ETR
- **Corrélation positive Fe vs Ag, As, Au, Ba, Bi, Cd, Co, CO<sub>2</sub>, Cr, Cu, F, Fe, In, Mo, Nb, Ni, P, Pb, S, Sb, Se, Sn, Sr, Te, U, V, W, Y, Zn, ETR**

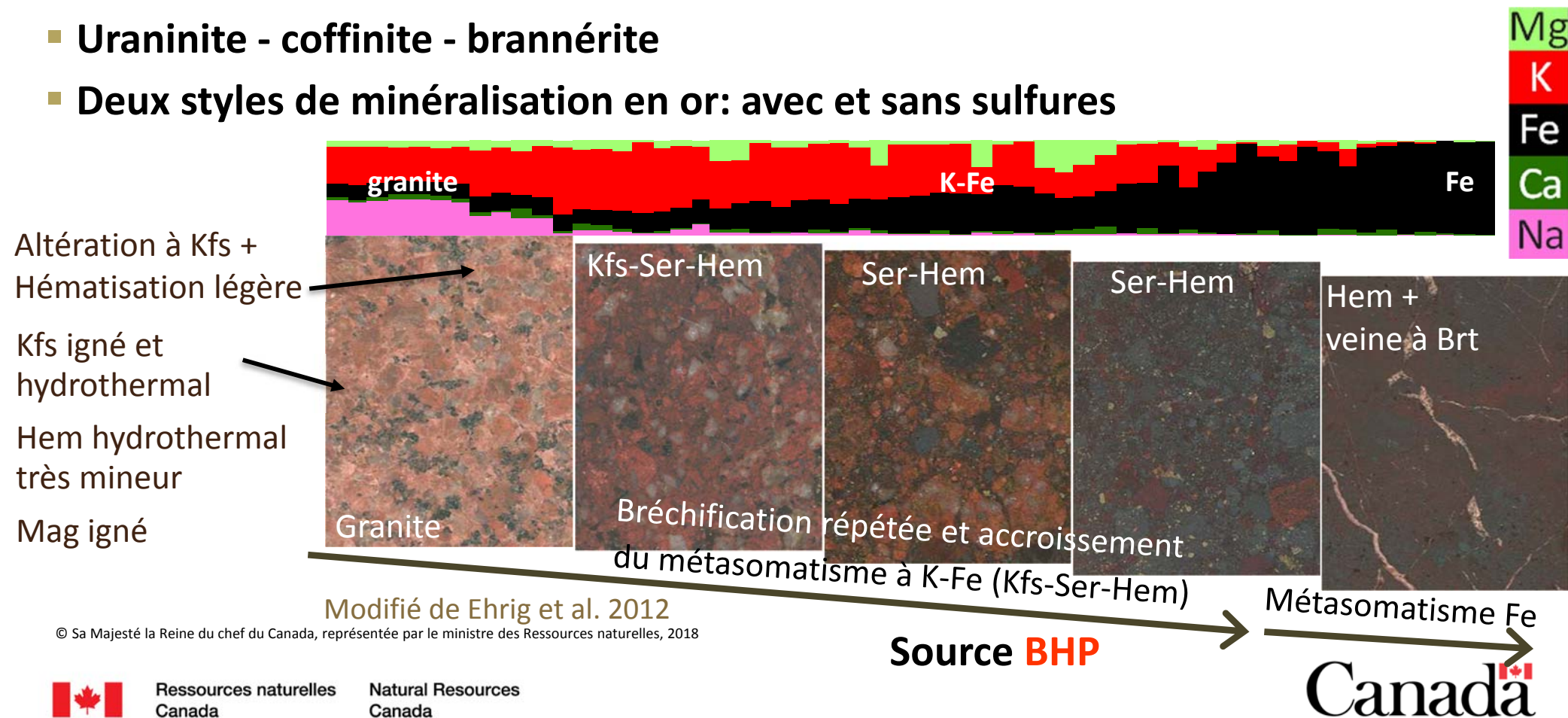
Voir Haynes et al. 1995; Hitzman et Valenta 2005; Skirrow 2010; Ehrig et al. 2012, 2017; Kontonikas-Charos et al. 2017

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



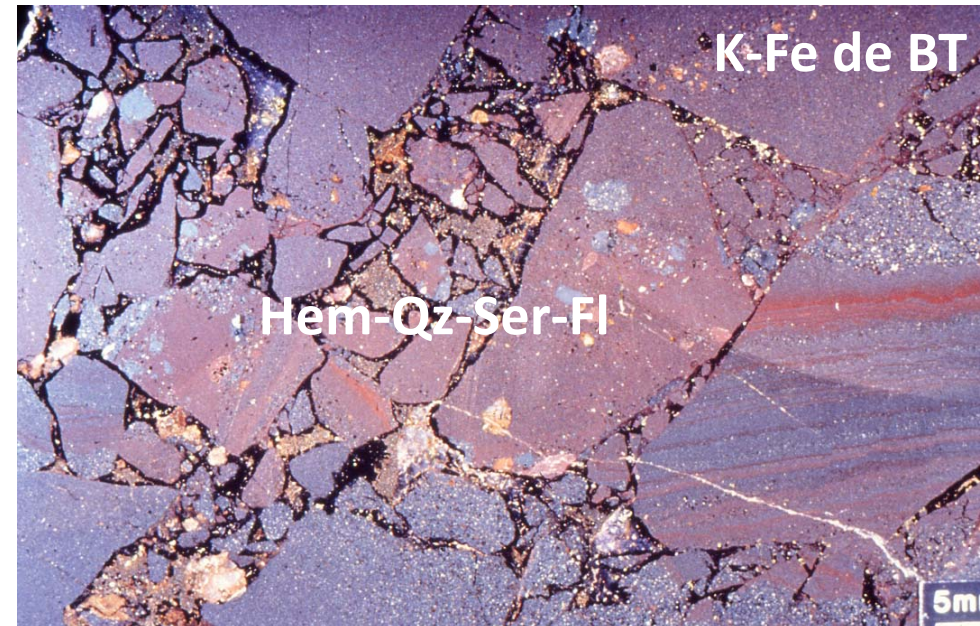
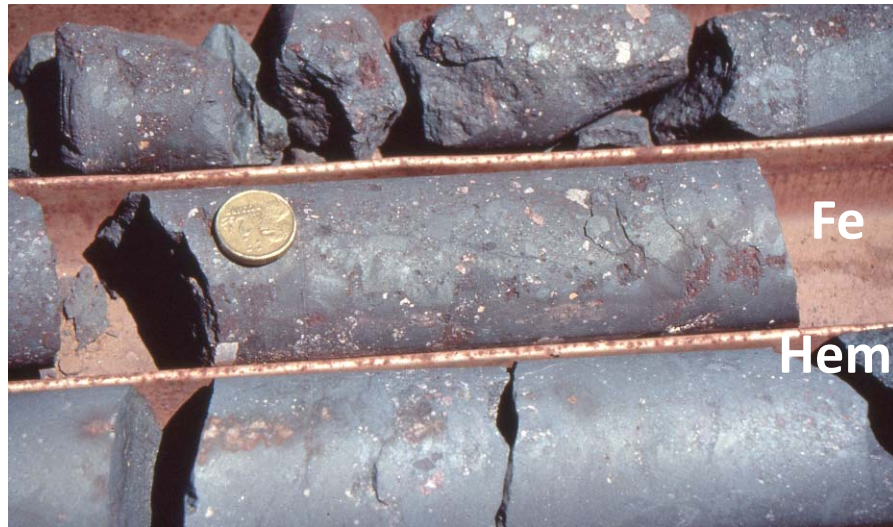
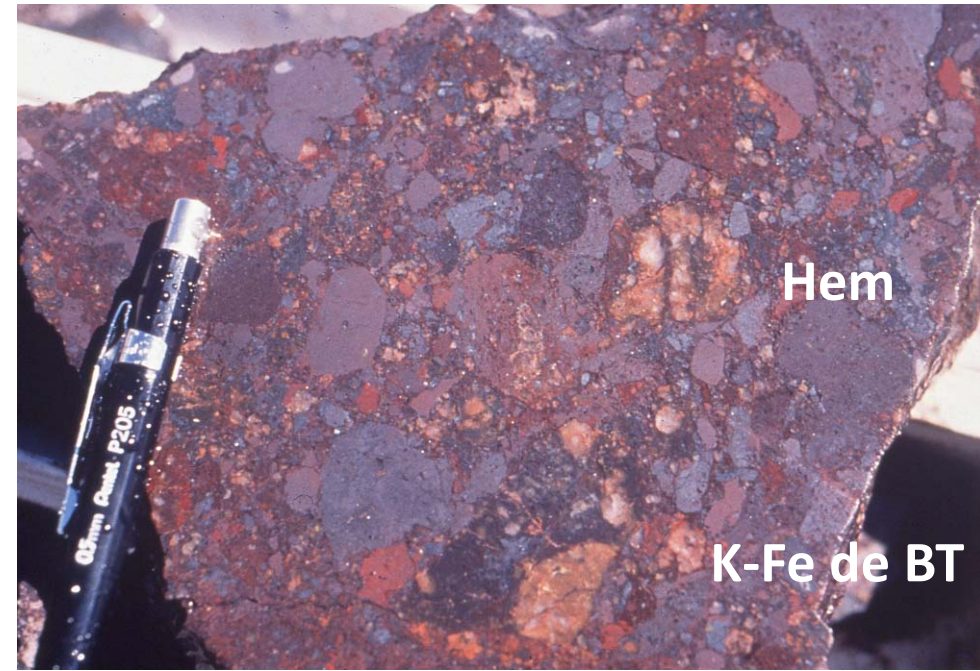
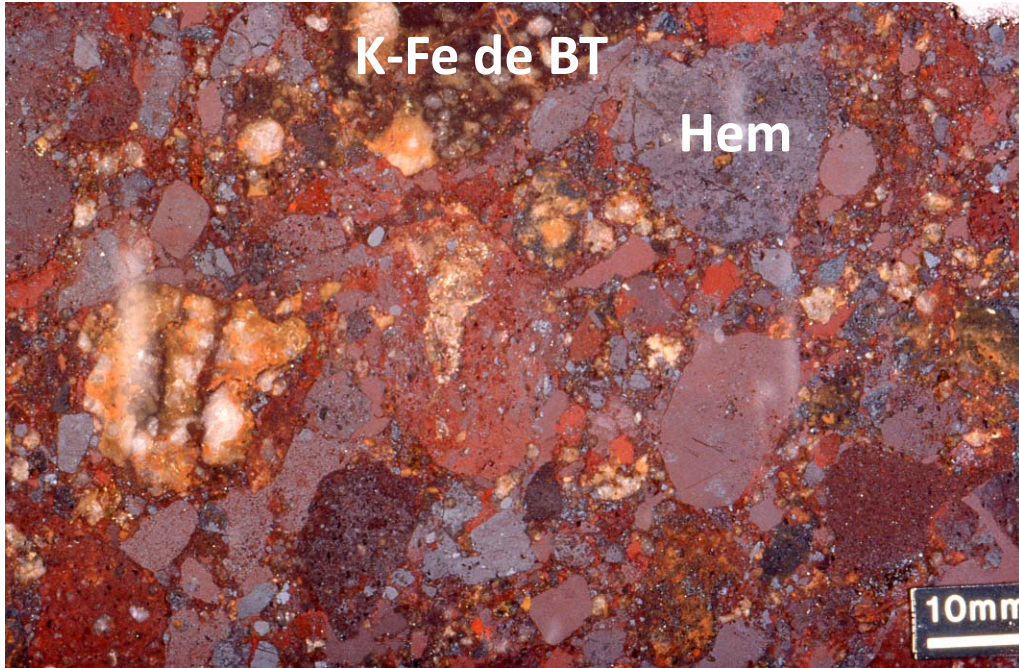
# Olympic Dam: altération et minéralisation

- Oxydes de fer ( $\text{Fe}^{+2} \rightarrow \text{Fe}^{+3}$ )
- Magnétite+apatite+chlorite  $\rightarrow$  feldspath K-hématite+séricite+sidérite
- Sidérite  $\rightarrow$  fluorite  $\rightarrow$  barytine
- Hypogène: Py  $\rightarrow$  Ccp  $\rightarrow$  Bn  $\rightarrow$  Cct  $\rightarrow$  Cu/Au
- Associations polymétalliques Zn-Pb-Ag et Mo-Sn-W
- Uraninite - coffinite - brannérite
- Deux styles de minéralisation en or: avec et sans sulfures





# Brèches à Olympic Dam



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



Ressources naturelles  
Canada

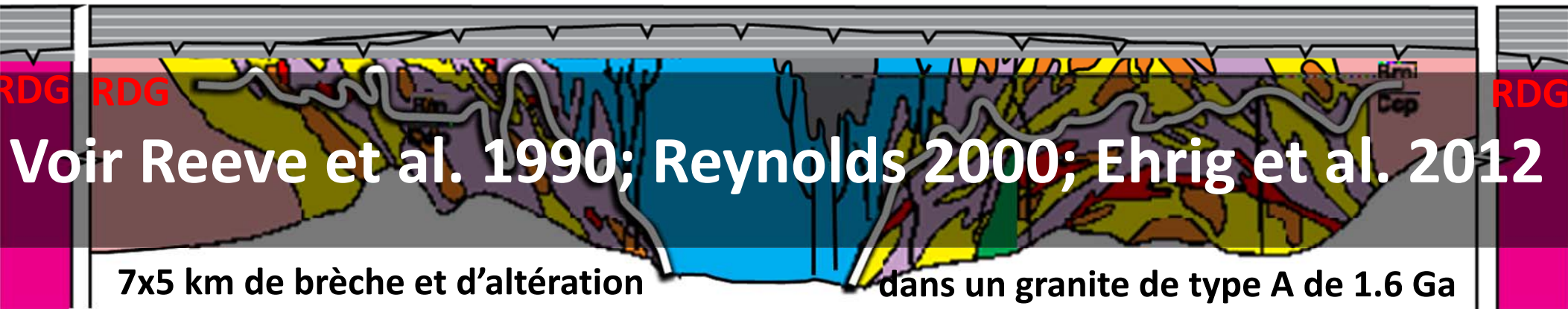
Natural Resources  
Canada

Source **BHP**

Canada 



# Section schématique d'Olympic Dam



 Brèches à fragments granitiques

 Granite/granite bréchifié

 Granite Roxby Downs  
Roches

 volcanoclastiques

 Brèche à hématite-quartz

 Brèche à hématite

 Brèche hétérolitique à hématite

 Brèche à fragments de granite/à matrice d'hématite

Couvert

 phanérozoïque sédimentaire

 Dykes mafiques et felsiques

 Diabase

## Altération

- Na, Ca-Fe de HT (Mag-Ap+Sd-Chl-Qz)
- K-Fe de BT (Hem-Kfs-Ser-Fl\Hem-Qz-Brt)
- Fe-Ba-F de BT (Sd\Fl\Brt)
- Minerais (Sp\Gn\Py\Ccp\Bn\Cct)
- Fe de BT (Hem-Qz-Brt)
- Altération argillique avancée (Ser-Qz± Al-OH)

**RDG:** Granite hôte de Roxby Down

Sulfures Fe-Cu, U, minéraux à ETR



# Olympic Dam: variations chimiques

Granite fortement altéré en Kfs-Ser recoupé par une veine de bornite (RD 2737, 593m)



Signature typique de l'altération épithermale



Signature typique de la progradation de la minéralisation IOCG de K-Fe à Fe



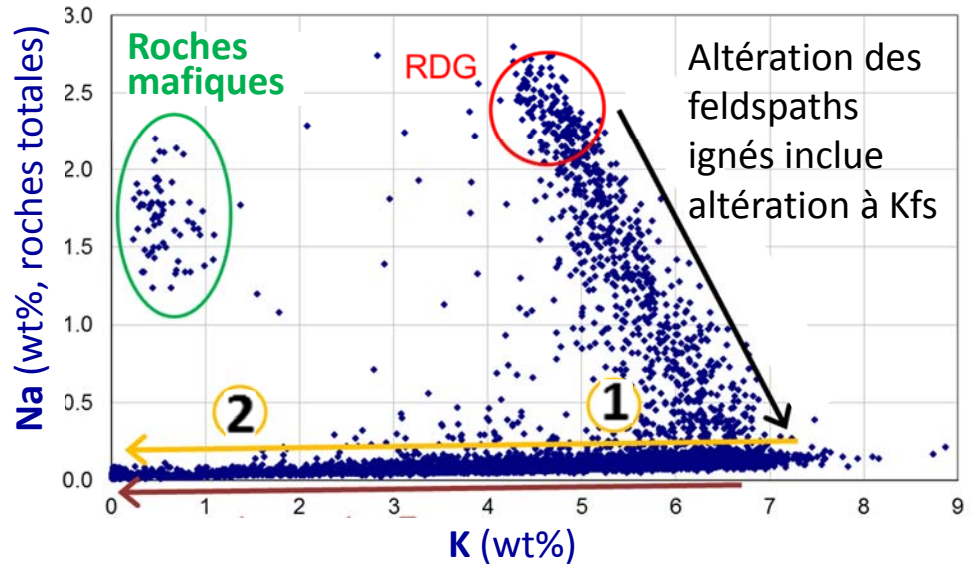
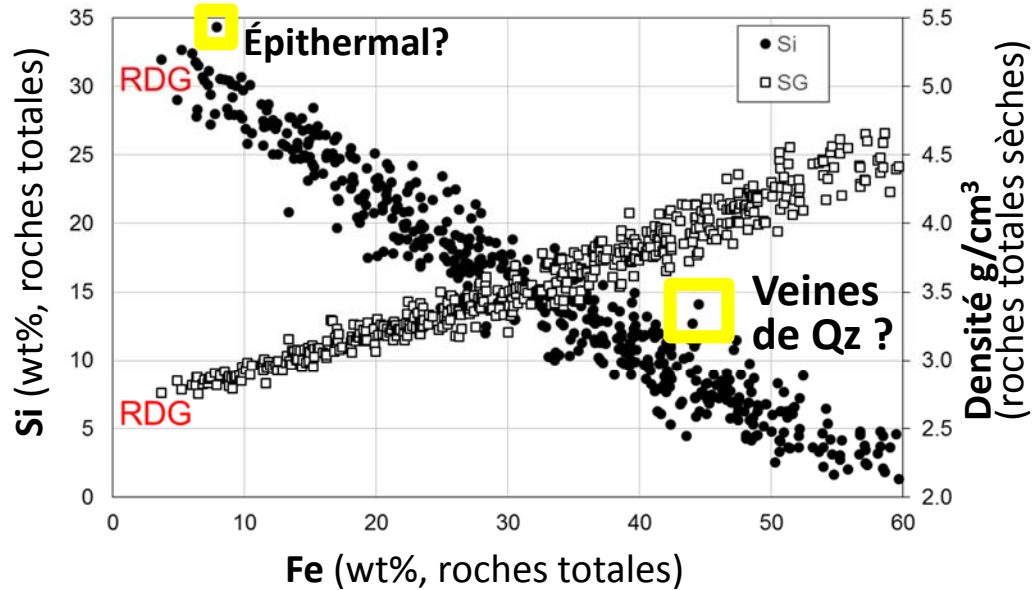
Signature Ca-K-Fe de HT ou K-Fe remplacée par carbonates



Signature Fe + veines de Qz

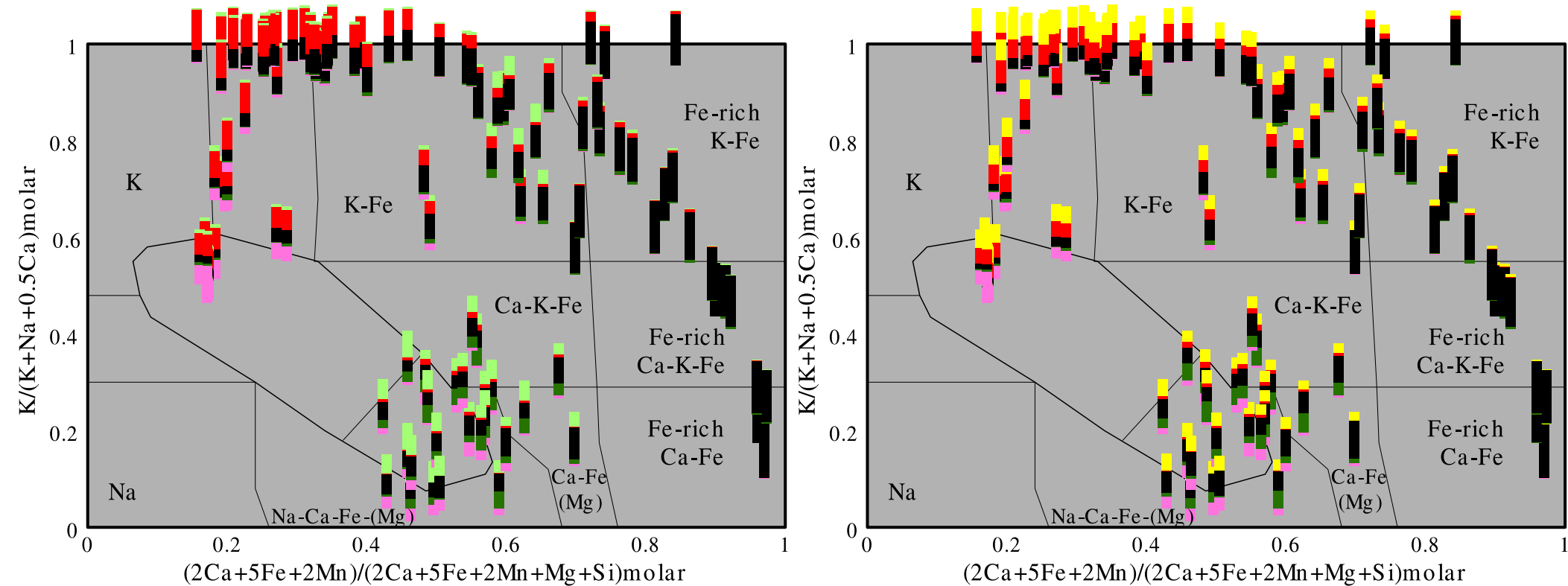


© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



- 1- Transition Kfs-Hem à Ms (Ser)-Hem
- 2- Hem remplace Ms (Ser)

# Olympic Dam: variations chimiques



La variation des proportions cationiques illustrée par les codes-barres au sein du diagramme discriminant enregistre l'évolution du métasomatisme à travers le gîte d'Olympic Dam et son encaissant granitique. Le granite est progressivement altéré en K-Fe puis en K-Fe riche en Fe puis en Fe seulement avec des traces de carbonates. Une autre tendance enregistre l'altération Ca-Fe-Mg de BT à chlorite et séricite.

Données: Ehrig et al. 2012; McPhie et al. 2016; Huang et al. 2016; Diagramme: Montreuil et al. 2013, 2016a

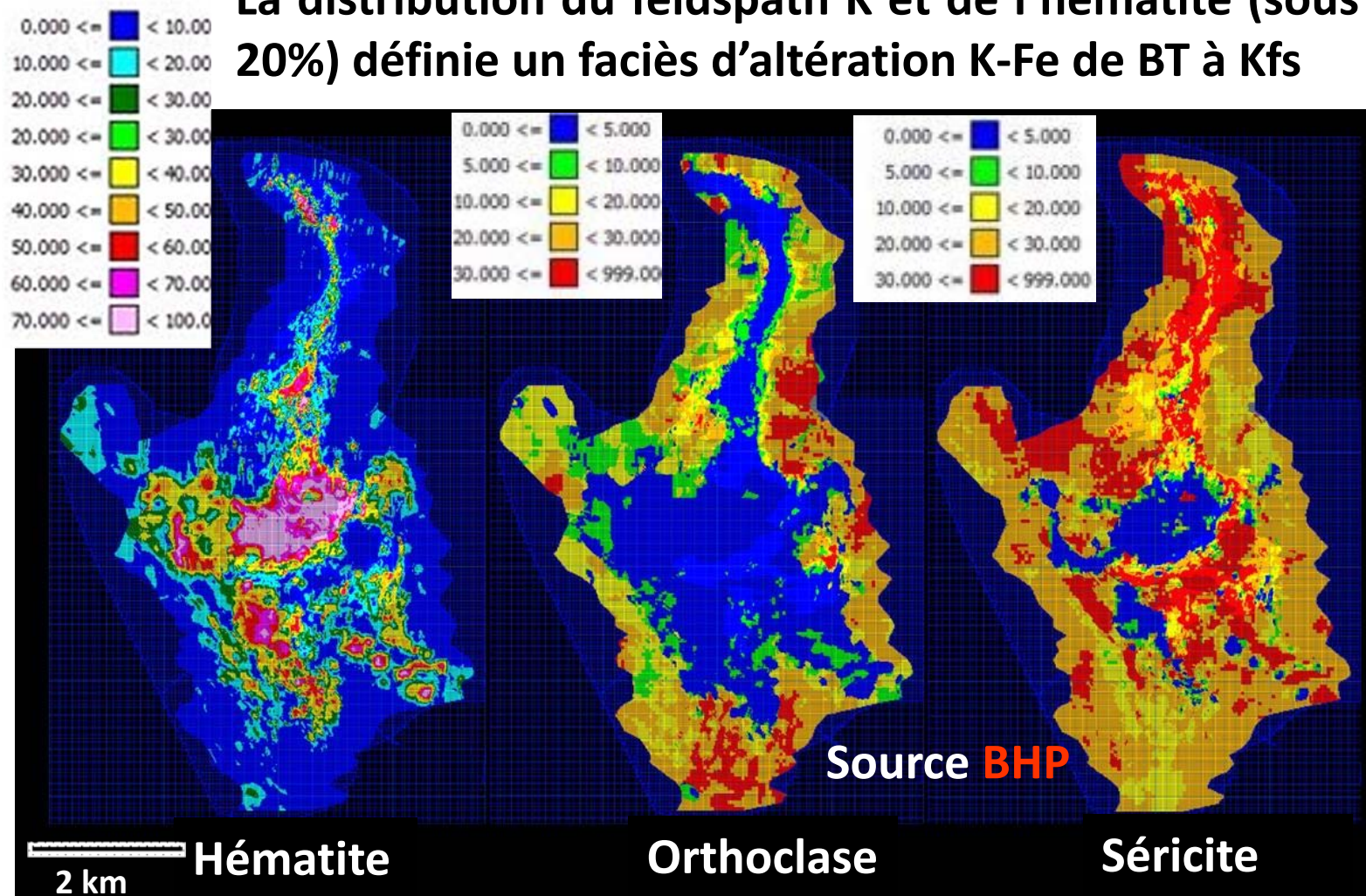
© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





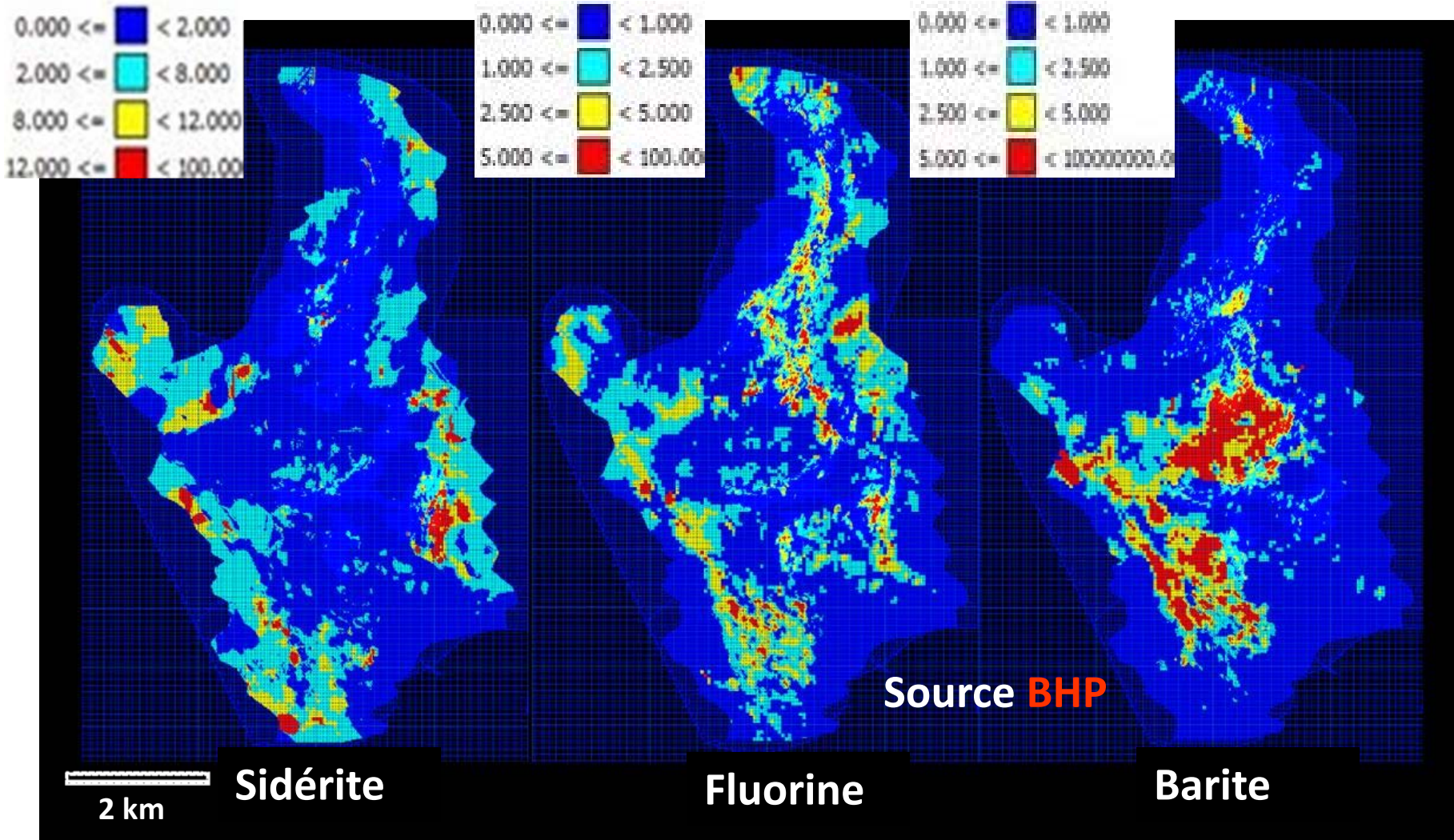
# Contenu en hématite – feldspath K – séricite <sup>(-400mRL)</sup>

La distribution du feldspath K et de l'hématite (sous 20%) définit un faciès d'altération K-Fe de BT à Kfs





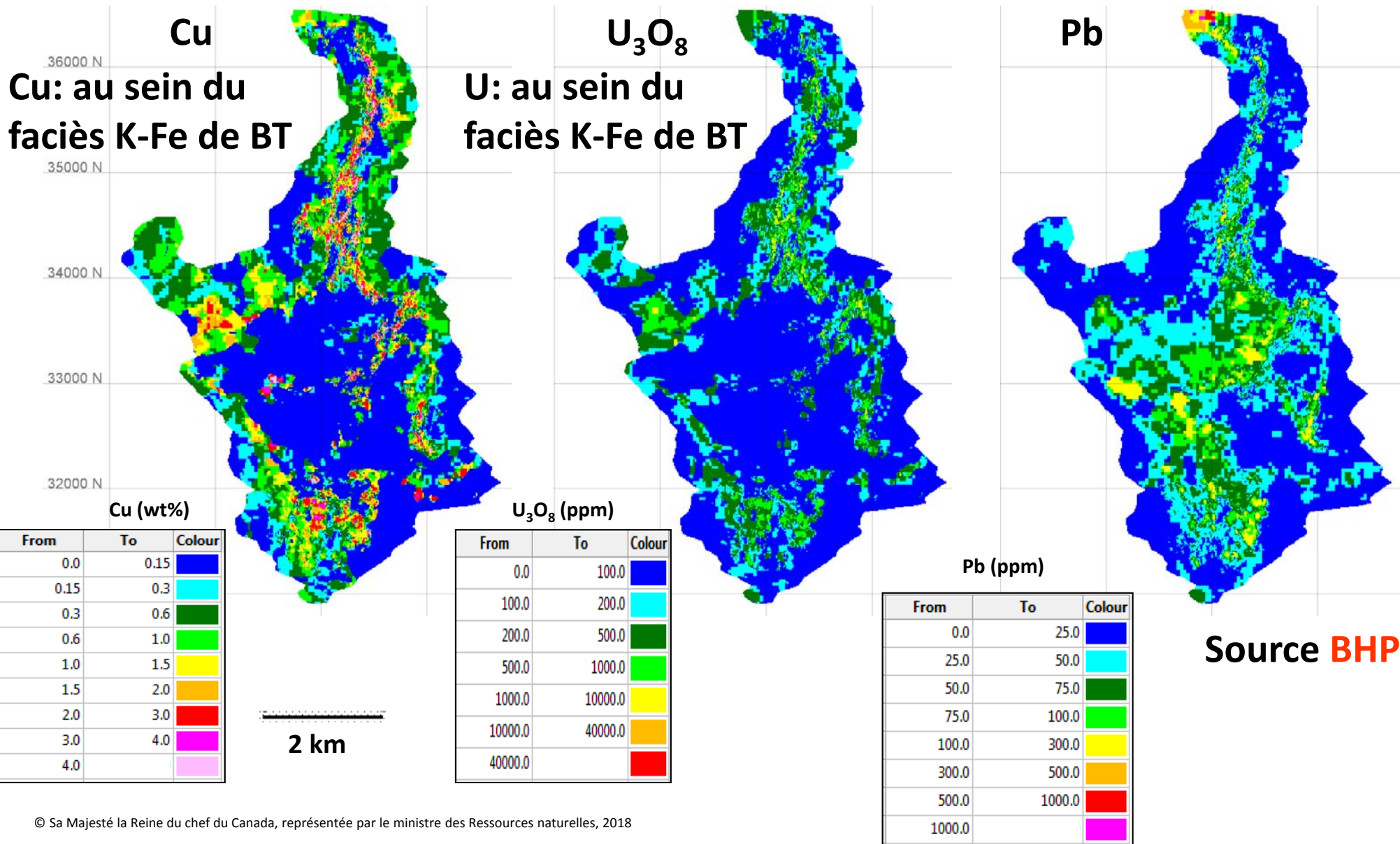
# Contenu en sidérite-fluorine-barite (-400mRL)



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



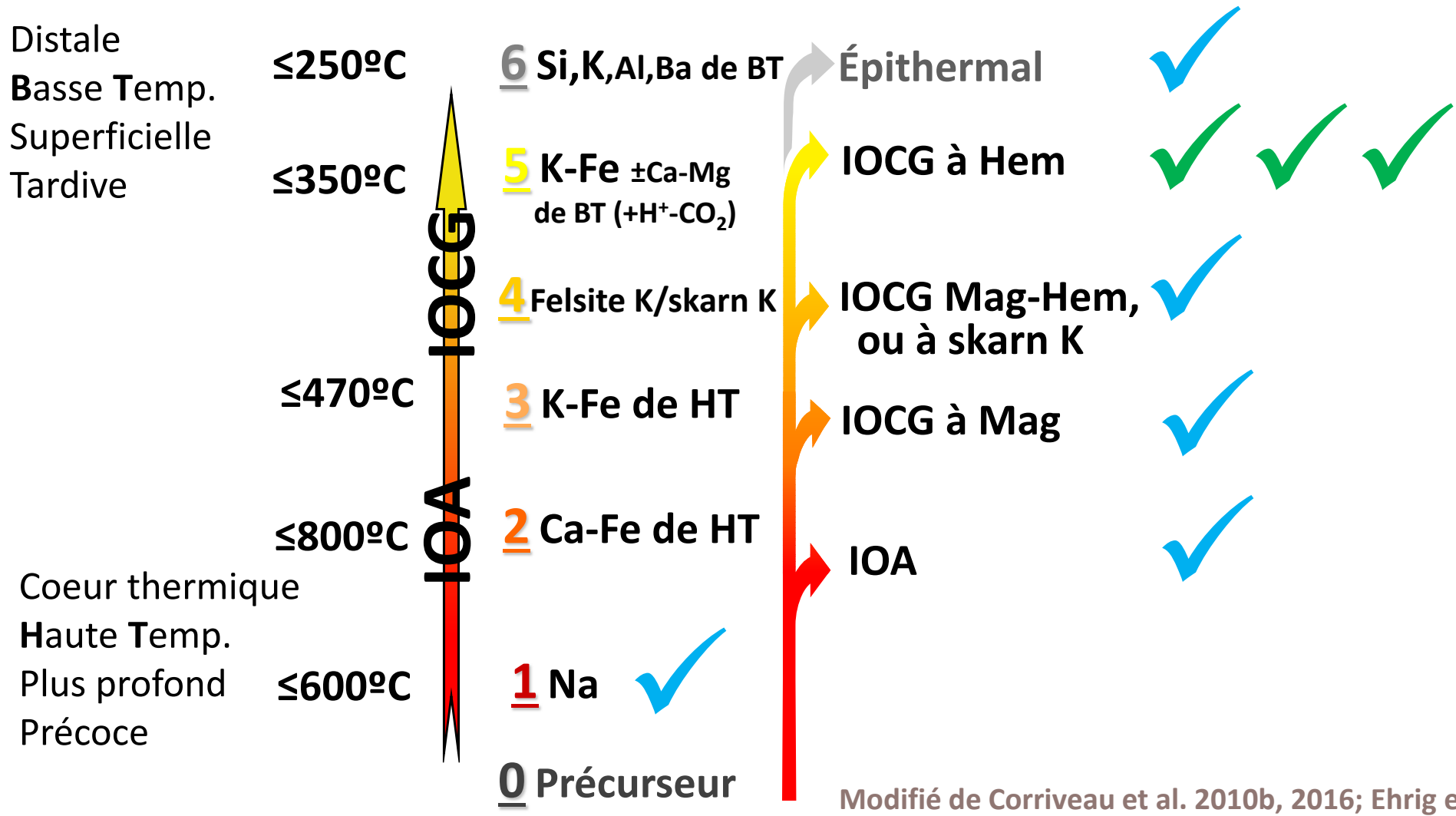
# Distribution Cu-U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>-Pb à ~400m sous la surface



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Faciès d'altération et types de minéralisation à Olympic Dam

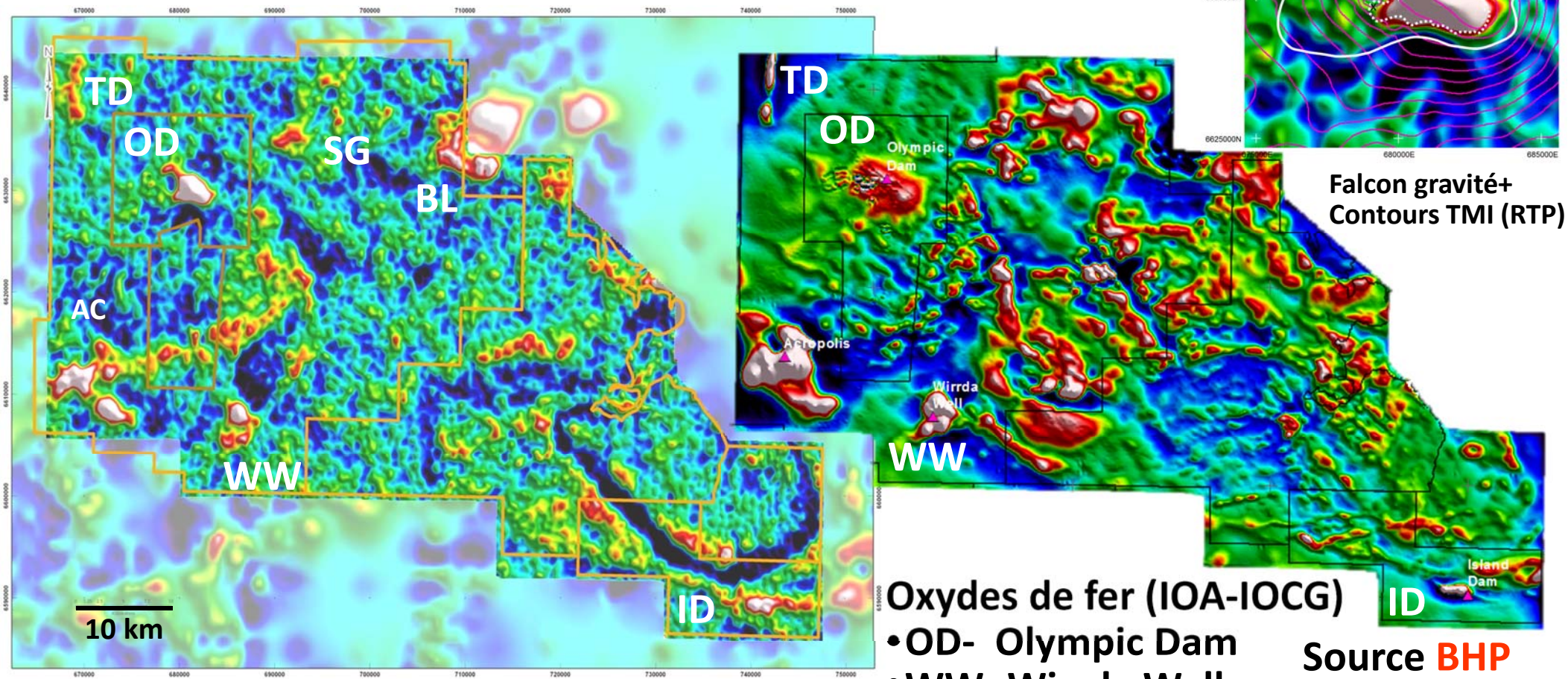


Modifié de Corriveau et al. 2010b, 2016; Ehrig et al. 2017

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Domaine d'Olympic Falcon Gravité et TMI (RTP 1VD)



Oxydes de fer (IOA-IOCG)

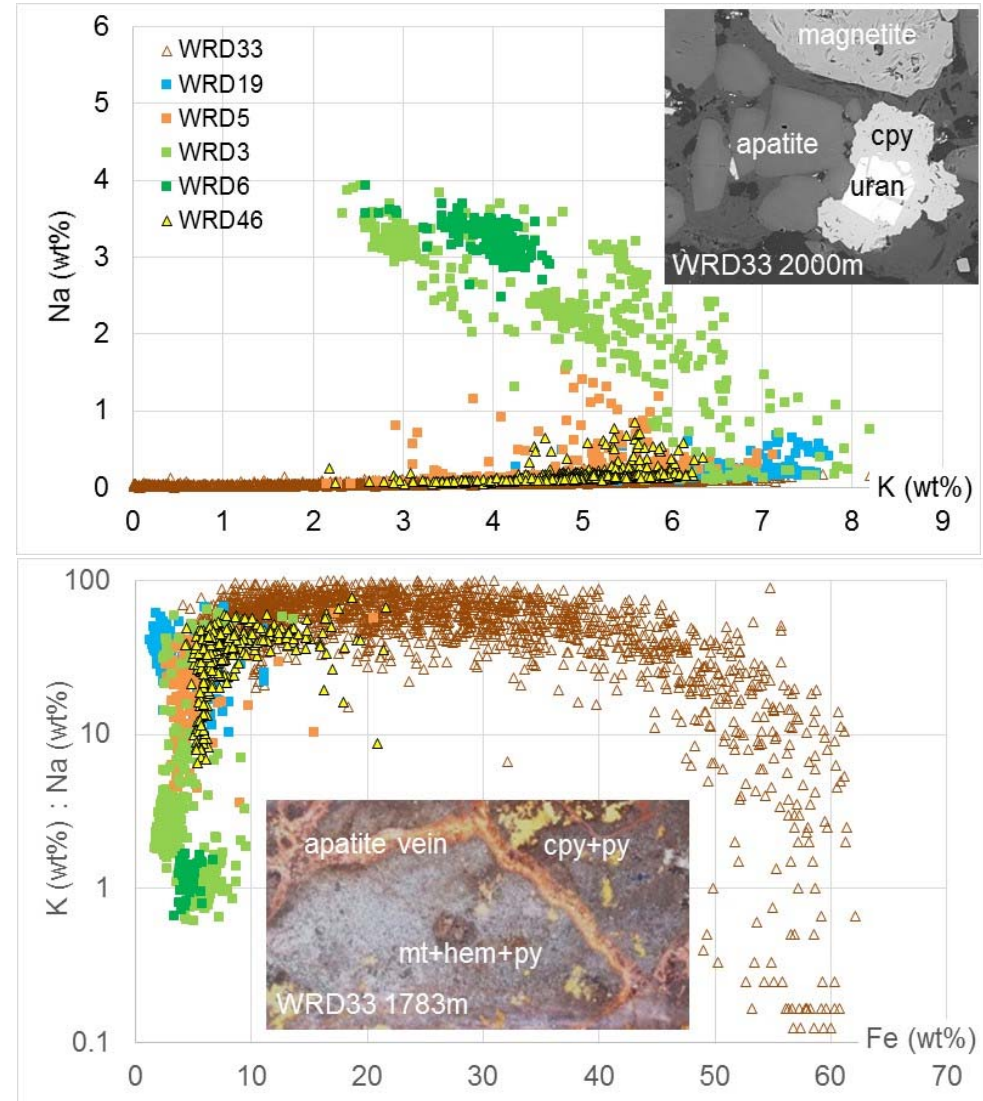
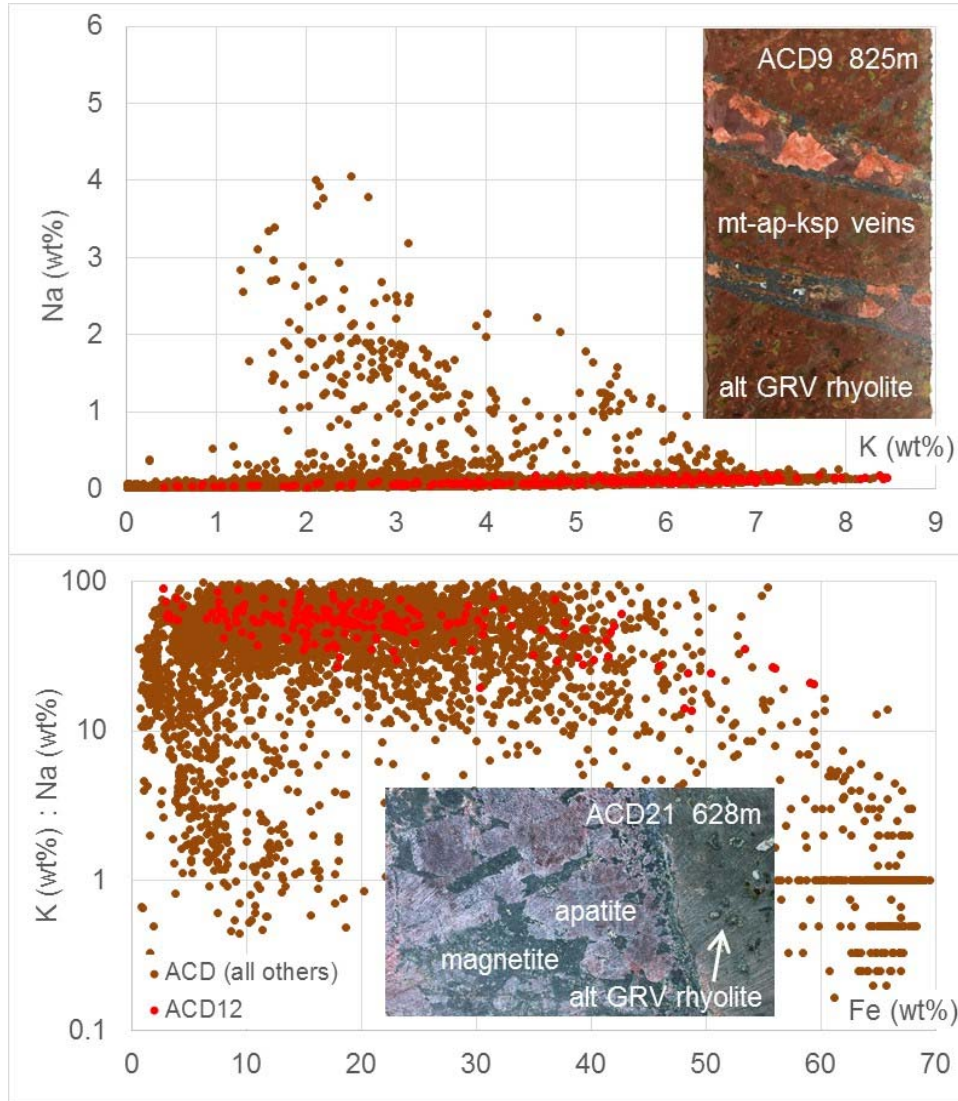
- OD- Olympic Dam
- WW- Wirrda Well
- AC- Acropolis
- SG- Snake Gully
- BL- Bill's Lookout
- ID- Island Dam
- TD- Todd Dam

Source **BHP**

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Acropolis et Wirrda Well

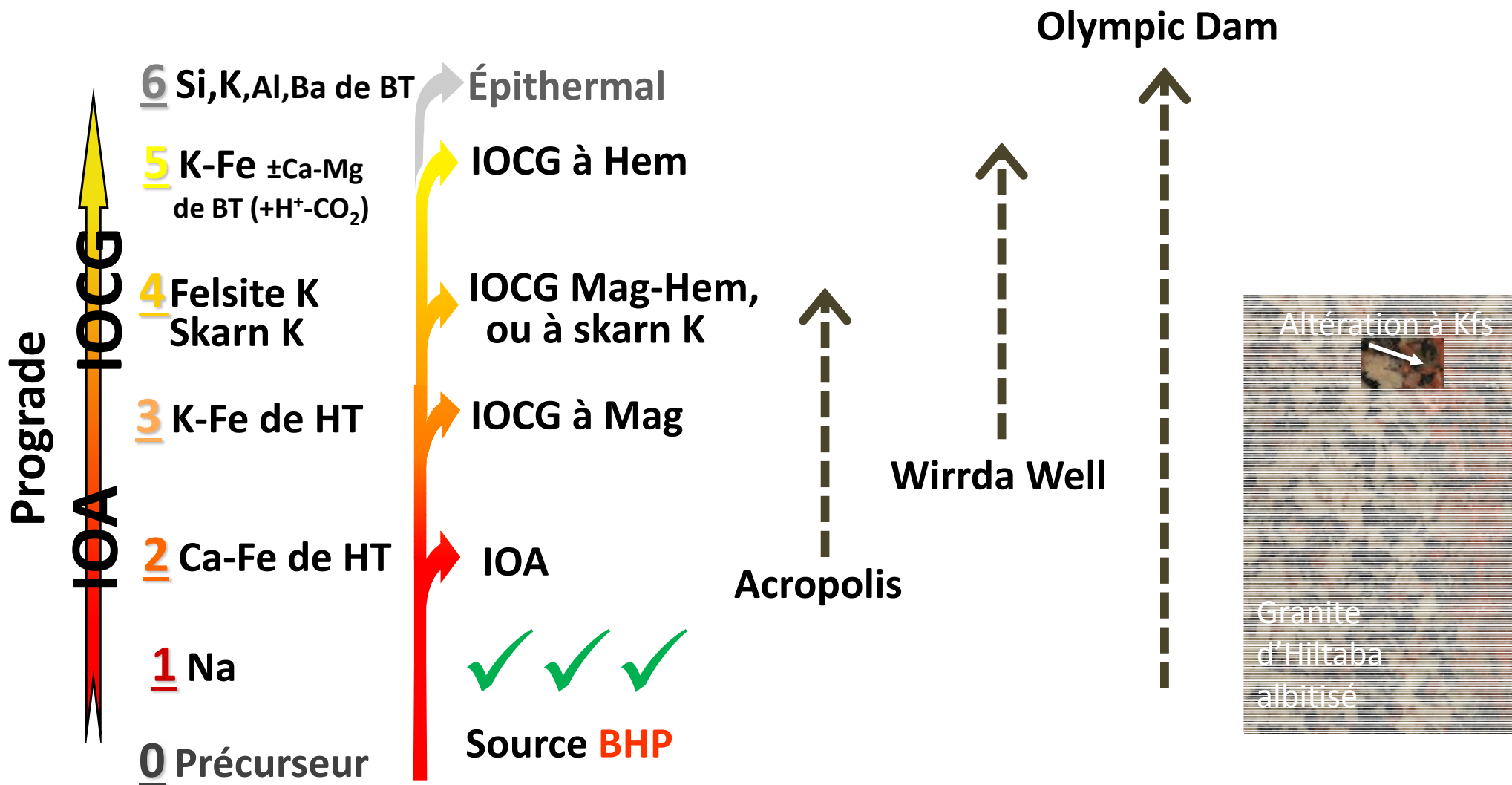


© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

Source **BHP**



# Olympic Dam et prospects avoisinants



Modifié de Corriveau et al. 2016; Krneta et al. 2017

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Éléments clés

Hayward et Skirrow (2010)

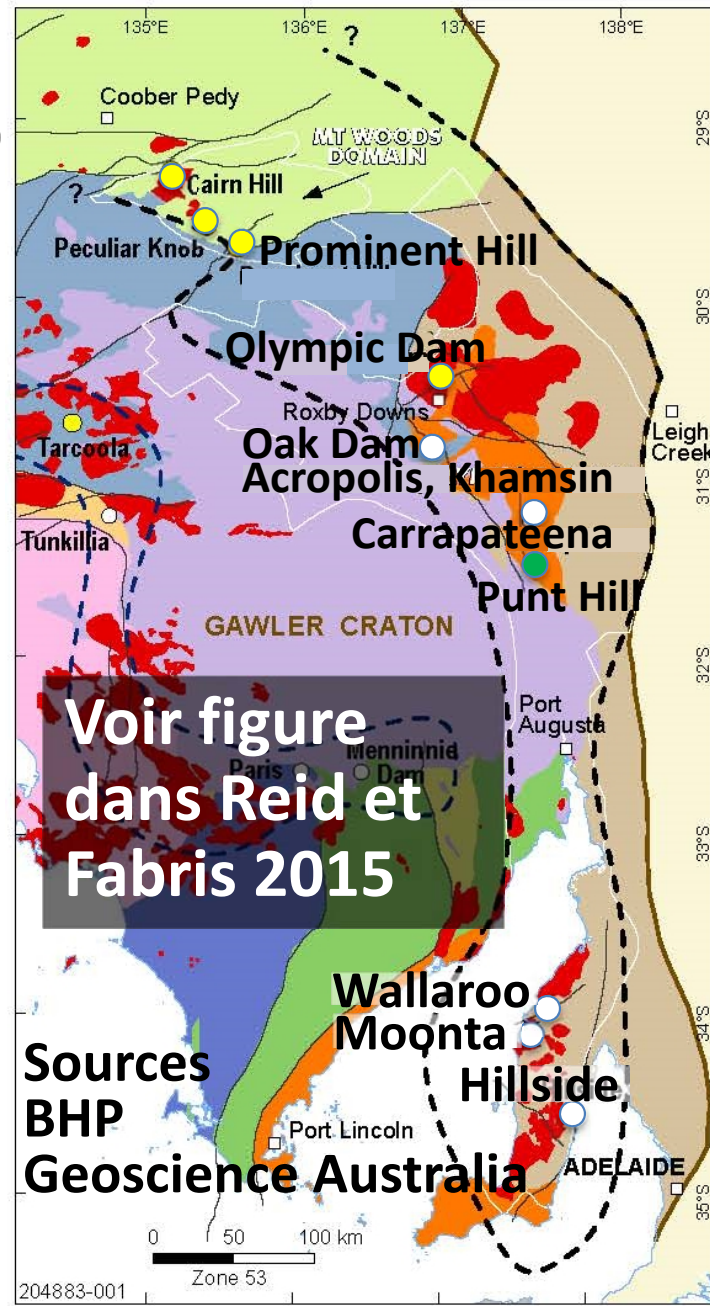
“... reworked lithosphere with **older** [ $> \sim 1590$  Ma] metasomatised SCLM...”

“...high frequency of trans-lithospheric shear zones...”

“...oxidised A-type plutons...”

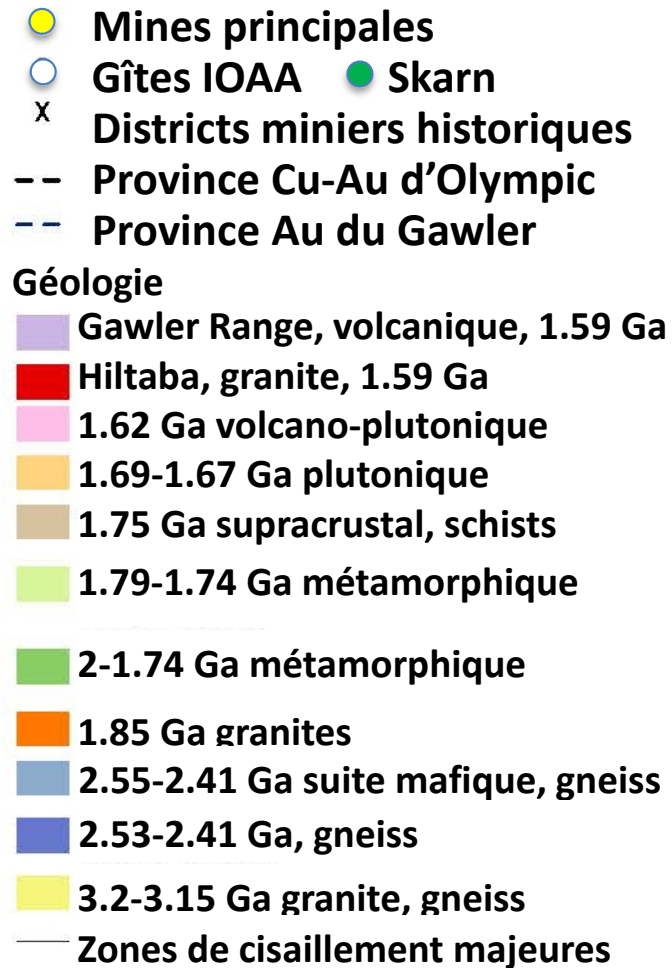
“...juvenile magmatic input manifest in mafic-ultramafic intrusions and basalts...”

“...abundance of mafic volcanics in the lower Gawler Range Volcanics”



Voir figure dans Reid et Fabris 2015

Voir aussi Haynes et al. 1995; Hitzman et Valenta 2005; Groves et al. 2010; Skirrow 2010; Ehrig et al. 2012; Ehrig et al. 2017; Kontonikas-Charos et al. 2017



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



Ressources naturelles  
Canada

Natural Resources  
Canada

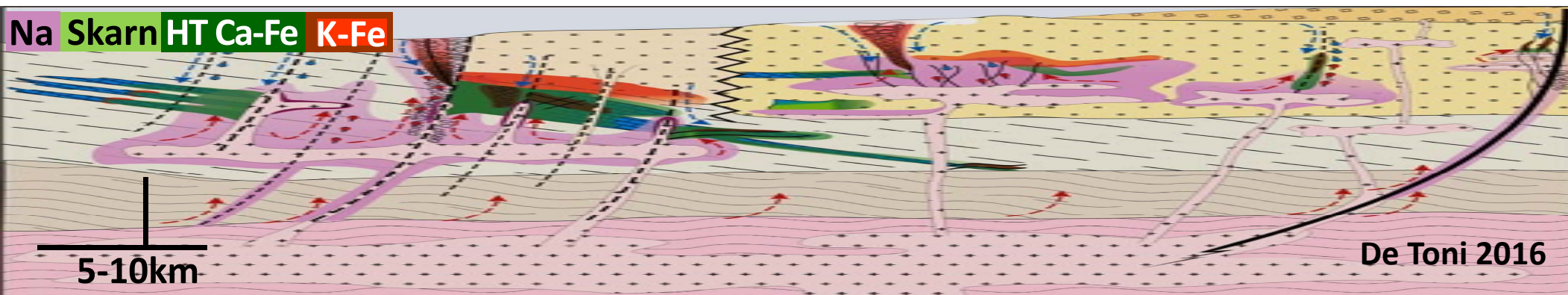
Canada



# État des connaissances

## Modèles métallogéniques

### Impacts pour le renouvellement des ressources canadiennes



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



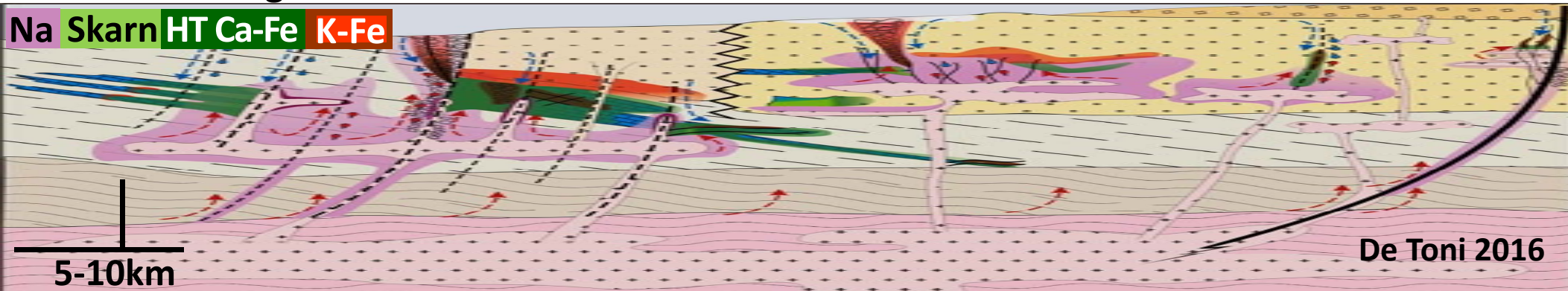
# Les systèmes minéralisateurs IOAA

**Les gîtes IOA, IOCG et affiliés présentent les caractéristiques suivantes:**

- une série régulière de réactions métasomatiques fluides-roches déclenchées par des fluides à haute salinité
- à travers les gradients géothermiques élevés
- dans des contextes tectoniquement actifs

**Les empreintes métasomatiques comprennent des**

- Couloirs régionaux d'albitite le long de zones de faille et au-dessus d'intrusions sub-volcaniques, communément bréchifiés extensivement le long des failles et remplacés par des faciès d'altération fertiles et minéralisés
- Faciès d'altération d'échelle régionale à celle des gîtes Na et Na-Ca-Fe, Ca-Fe et Ca-K-Fe de HT
- Brèches à l'échelle des gîtes avec faciès d'altération K-Fe de HT et BT, K, K-skarn et Ca-Fe-Mg de BT



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# Critères géologiques de prospectivité

**Volcanisme et plutonisme mafiques à felsiques atteignant des compositions de type A communément riches en U (ex. système calco-alcalin de HT)**

**Éruptions volumineuses + mise en place répétée d'intrusions sub-volcaniques et d'essaims de dykes porphyriques (apport thermique et circulation des fluides manteau-surface soutenus)**

**Socle composite, incluant bassins sédimentaires récents**

**Discontinuités structurales d'échelle crustale permettant une remontée efficace des magmas et la circulation des fluides**

**Marge d'un craton archéen**

**Tectonisme actif allant de compressif à extensif au sein de contextes géodynamiques variés (arc continental, bassin d'arrière arc continental, rift intraplaque continental, etc. )**

**Altération à magnétite syn- à post-compression suivi de soulèvement ou exhumation optimisant l'accès à des fluides oxydés (ex. lacs salins de caldéras) et la formation d'altération à hématite au dessus des, ou juxtaposés par rapport aux faciès d'altération à magnétite**

**Écoulement des fluides à travers des encaissants riches en métaux vers des zones de décharges**



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Modèles de gîtes: État des lieux

Une meilleure compréhension des sujets suivants:

- Types, évolution, intensité, paragenèses, compositions, propriétés physiques et étendue latérale, longitudinale et en profondeur des faciès d'altération
- Associations métallifères et types de gîtes en fonction des faciès d'altération (trajectoires métasomatiques progrades, rétrogrades, cycliques et télescopées)
- Rôle des réactions métasomatiques fluides-roches (dissolution-reprécipitation couplée) sur l'évolution de la composition des fluides et l'acquisition de signatures mixtes provenant du mélange de fluides et de métaux de sources multiples ainsi que des recharges et délestage de métaux au fur et à mesure que le fluide réagit avec ses encaissants (c.-à-d. la croûte supérieure)
- Distincts des autres types de gisements (mais les profondeurs peuvent être du même ordre que celles des porphyres, comparer avec Reed et al. 2013)
- Biais dans les informations recueillies par les études des inclusions fluides en raison de leur conservation plus fréquente dans les minéraux à BT (ex., quartz, carbonates)

Encore beaucoup à faire pour pouvoir prédire le contenu en métaux des systèmes IOAA

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# Modèles de gîtes

De nombreux modèles de gîtes sont fortement liés à des contextes géodynamiques spécifiques, ceux des gîtes IOA et IOCG précambriens demeurent incertains malgré la littérature abondante sur le sujet

Les contextes proposés varient grandement, mais tous sont continentaux et génèrent en fin de compte des magmas de type A (haute température)

La plupart des gîtes IOA et IOCG dont le système hôte affleure régionalement ou est foré à une échelle suffisamment grande sont encaissés au sein de la série de faciès d'altération discutés dans ce cours. Leurs paragenèses, composition, évolution, étendue et intensité sont diagnostiques.

Des fluides salins à haute température sont nécessaires pour déclencher les systèmes métasomatiques à l'échelle régionale, mais leurs sources peuvent varier d'un système à l'autre et au sein de ceux-ci.

Les empreintes métasomatiques résultent et témoignent des processus génétiques de minéralisation de la source des métaux et fluides jusqu'à la formation des gîtes

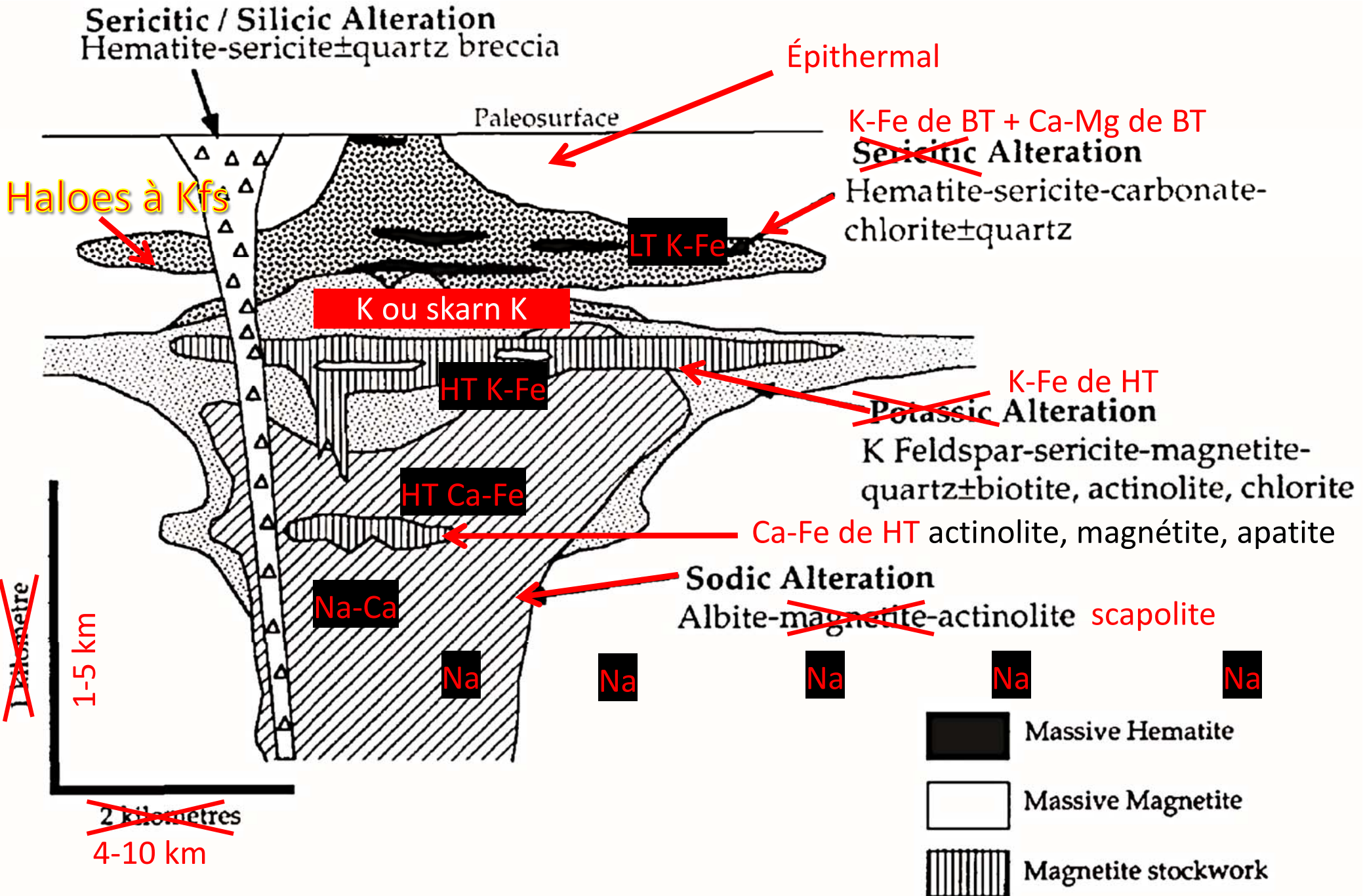
Dans les terranes métamorphiques de haut grade (ex. boucliers précambriens), des évidences de terrain de mise en place répétée d'intrusions sub-volcaniques et d'essaims de dykes porphyriques, de formation de calderas et d'exhumation différentielle peuvent passer inaperçus au sein de complexes de gneiss indifférenciés

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# Revoir le modèle classique de Hitzman et al. 1992

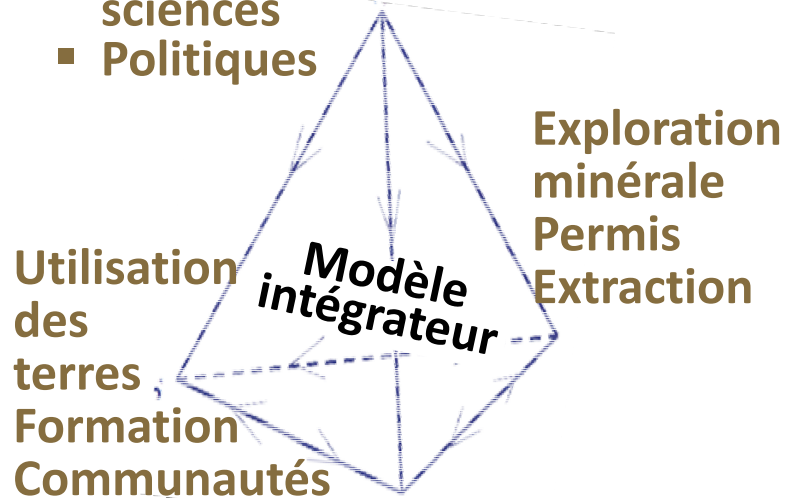




# IOCG: Ressources pour les générations futures

## Géoscience publique

- Cartographie et recherche
- Géologie économique
- Études environnementales
- Décisions de gestion de la sciences
- Politiques



## Sciences du minerais et des mines

- Géométtallurgie
- Résidus miniers
- Drainage minier

- Un nouveau type de gîtes comportant la 1<sup>ère</sup> ressource en U, 3<sup>e</sup> en Au et 5<sup>e</sup> en Cu en un seul gîte (10 100 Mt de ressources = ~1050 milliards CAD \$)
- 80 Mt de ressources connues au Canada
- Gîtes IOCG et affiliés: **LES RESSOURCES POUR LES GÉNÉRATIONS FUTURES!**
- De nouvelles mines IOCG (100-400 Mt de ressources) s'ouvrent presque à chaque année depuis 2000 mais aucune au Canada!
- Haut niveau d'expertise sur les systèmes minéralisateurs requis pour des prises de décisions éclairées par l'industrie et les gouvernements
- Les résultats des programmes GEM et IGC sont applicables globalement et diffusés sous forme de cours intensifs et de publications diverses

Modèle métallogénique géoenvironnemental modifié Kwong 2003

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



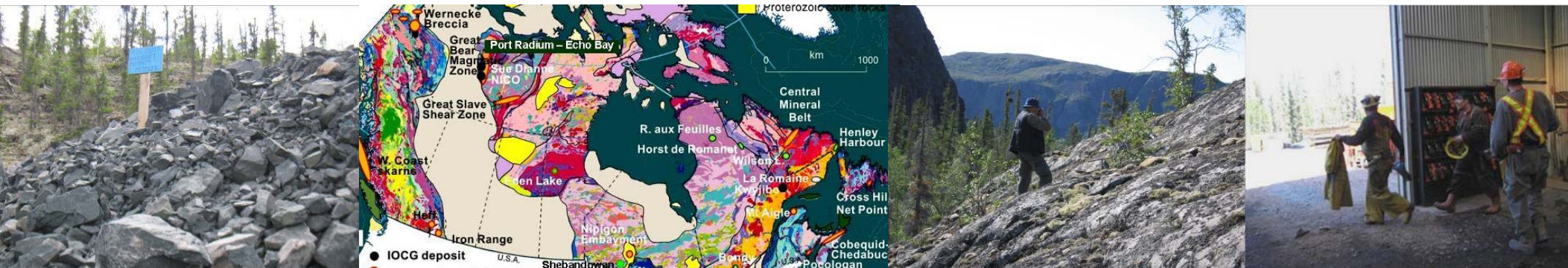


# États des lieux au Canada

- Contextes d'intérêt sous explorés, méconnus et au potentiel mésestimé
- Faciès d'altération fertile et brèches hydrothermales rarement signalés
- Plusieurs districts d'intérêt avec un potentiel pour un large spectre de gîtes (IOCG, IOA, variantes à Au-Co ou à ETR, et U au sein d'albitites) mais plusieurs indices demeurent non valorisés et assignés à des modèles de gîtes disparates et inappropriés considérant leur appartenance à des systèmes IOAA
- Continuum IOA-IOCG-porphyrique-épithermal
- Deux gîtes IOCG et à variante à Au-Co-Bi connus (NICO et Sue Dianne)
- Un gîte IOA à terres rares lourdes en étude de faisabilité (Kwyjibo)
- Ressources largement inexploitées
- Expertise en métamorphisme/métasomatisme essentielle

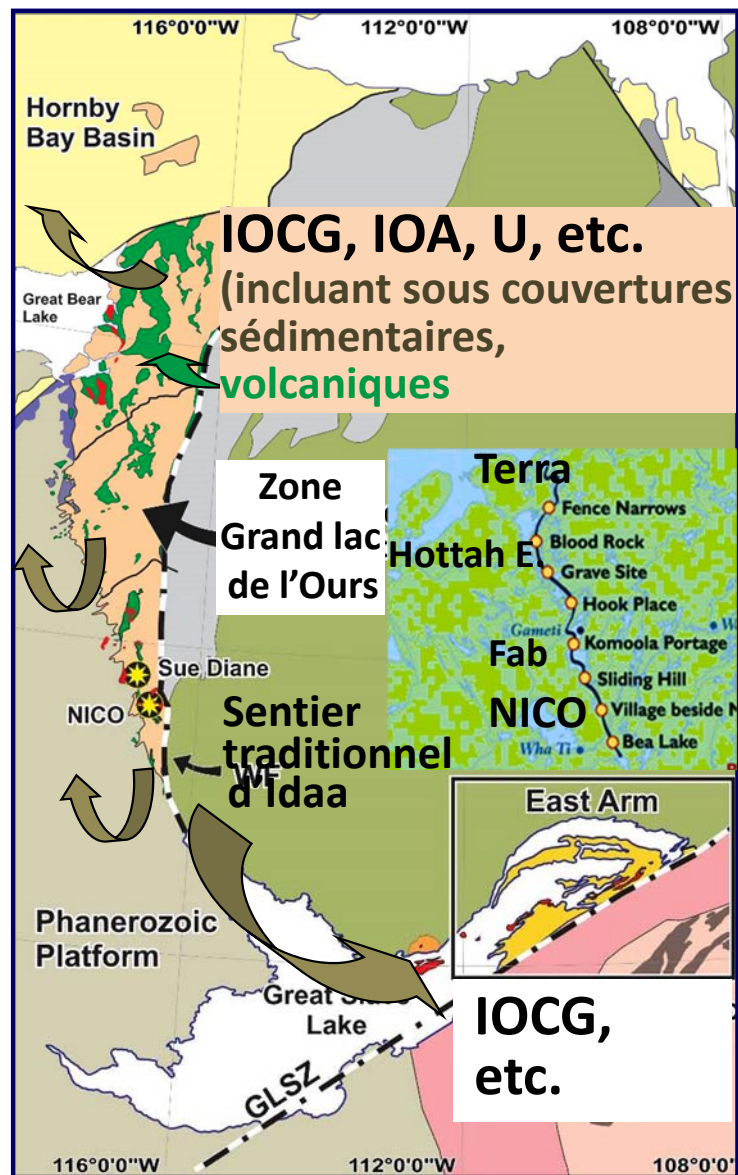
Corriveau 2007; Corriveau et Mumin 2010

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# IOCG: Défis et opportunités canadiens



- Ressources: prometteur et NON EXTRAITES!
- Cadres géoscientifiques et d'exploration trop immatures pour permettre une bonne évaluation du potentiel minéral au Canada ce qui affaiblit la prise de décisions éclairées, entre autres sur l'aménagement du territoire
- Ressources potentielles fortement sous-évaluées
- Physiographie spectaculaire et biodiversité (*conséquence de la géologie atypique des IOCG!*) régulièrement ciblées pour des zones de conservation et des parcs nationaux à travers TOUT le Canada
- Le retrait des contextes IOCG à l'exploration pourrait avoir un impact important sur le renouvellement des ressources minérales canadiennes pour les générations futures

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources





## Les systèmes IOAA de l'Ours: vecteurs vers des gîtes IOCG et affiliés

- Affleurement inégalé et en 3D des systèmes à altération alcali-calcique et à oxydes de fer, de 3 à 10 km de profond jusqu'aux sommets épithermaux
- La cartographie des faciès d'altération relie génétiquement les gîtes IOCG, IOA, skarn, U encaissés dans des albitites et mantos formés au sein des mêmes districts
- Faciès d'altération prograde avec associations métallifères distinctes (métaux usuels, précieux et spécialisés y compris ceux pour l'énergie nucléaire, les technologies d'énergies vertes et l'énergie géothermique)
- Aucune orogénèse ultérieure = remobilisation très limitée (limitée à la mise en place du batholite, aux halos de dykes mafiques et aux failles transverses)
- Nouveaux critères, technologies, méthodologies et études de cas
- Modèle métallogénique, outils de cartographie et d'exploration

Hildebrand 1986; Mumin et al. 2007, 2010; Corriveau et al. 2010a,b, 2011, 2016, 2017, 2018; Montreuil et al. 2013, 2015, 2016a,b,c; Potter et al. 2013, 2017; Hayward et al. 2016; Enkin et al. 2016; Corriveau 2017a, b

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# GEM



**Merci à tous les participants, partenaires et collaborateurs des projets ainsi qu'à leurs gestionnaires et au personnel des laboratoires et administratifs ainsi qu'à ceux des organisations impliquées**

**Commission géologique du Canada**

- **IOCG-Province de l'Ours et Hudson-Ungava** (Géocartographie de l'Énergie et des Minéraux, RNCan)

- **Gîtes profonds et Systèmes métallifères à uranium** (Initiative géoscientifique ciblée)

**Commission géologique des Territoires du Nord-Ouest**

- **South Wopmay Bedrock Mapping** (Commission géologique des T.-N.O.)

**Gouvernements autochtones des nations Tlicho et Sahtu, en particulier de Gamètì**

**Secteur privé: Fortune Minerals, Alberta Star, DEMCO, Diamonds North, Honey Badger Exploration, Energizers, Aurora Geosciences**

**Institut de recherche Aurora, permis 14844, 14639 et 14548**

**Permis d'utilisation des terres Classe A No. W2010J0004 (GEM) et W2009C0001 (Fortune Minerals Limited)**

**Ententes pour jeux de données des sites archéologiques No. DR2010-390, No DR2009-335**

**Programme du plateau continental nordique, projets 010009, 50709 et 00410**

**Lettres d'ententes de collaboration: RNCan-Fortune Minerals, RNCan-Honey Badger Exploration-Energizer Resources, RNCan-Community Government of Gamètì**



# Pour information additionnelle

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

## Exploring for Iron Oxide Copper-Gold Deposits Canada and Global Analogues

Chapitre 1 - Exploring for iron oxide copper-gold (Ag-Bi-Co-U) deposits – the need for case studies, classifications and exploration vectors

Louise Corriveau, Hamid Mumin

Chapitre 2 - Classifying IOCG deposits  
Patrick J. Williams

## Association géologique du Canada Volumes de cours intensifs 20

Chapitre 3 - "Magnetite-group" IOCGs with special reference to Cloncurry and Northern Sweden: settings, alteration, deposit characteristics, fluid sources, and their relationship to apatite-rich iron ores

Patrick J. Williams

Chapitre 4 - "Hematite-group" IOCG±U ore systems: tectonic settings, hydrothermal characteristics, and Cu-Au and U mineralising processes

Roger Skirrow

Chapitre 5 - The IOCG-porphyry-epithermal continuum of deposits types in the Great Bear Magmatic Zone, Northwest Territories, Canada

Hamid Mumin, A.K. Somarin, B. Jones, L. Corriveau, L. Ootes, J. Camier





## Pour information additionnelle

Chapitre 6 - Use of breccias in IOCG(U) exploration

*Michel Jébrak*

Chapitre 7 - Alteration Vectors to IOCG mineralization – from uncharted terranes to deposits

*Louise Corriveau, Patrick Williams, Hamid Mumin*

Chapitre 8 - Iron oxides trace element fingerprinting of mineral deposit type

*Georges Beaudoin, Céline Dupuis*

Chapitre 9 - Alterations in IOCG-type and related deposits in the Manitou Lake area, eastern Grenville Province, Québec

*Tom Clark, André Gobeil, Serge Chevé*

Chapitre 10 - Lower Cambrian iron oxide-apatite-REE (U) deposits of the Bafq District, east-central Iran

*Farahnaz Daliran, Heinz-Günther Stosch, Patrick Williams*

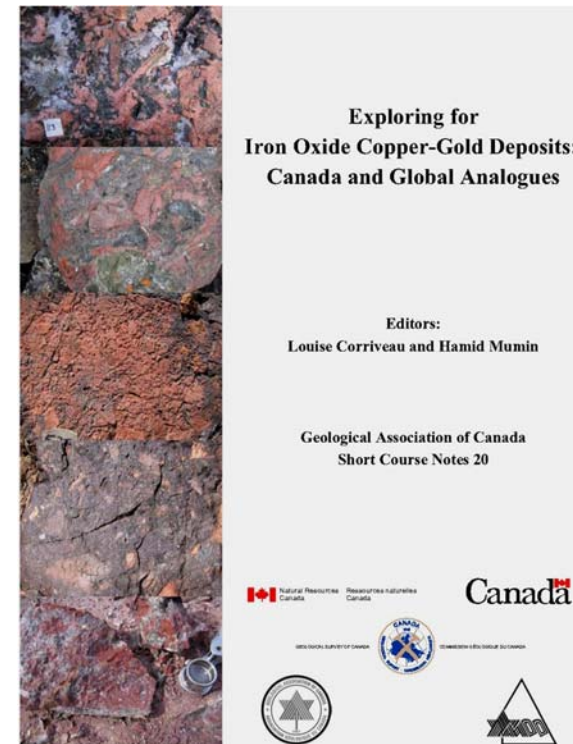
Chapitre 11 - Iron oxide-copper-gold mineralization in the Greater Lufilian Arc, Africa

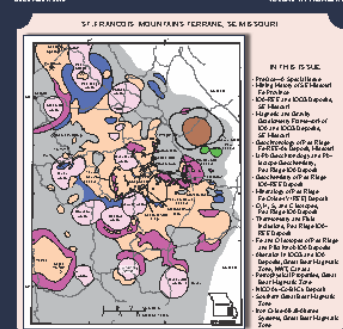
*Alberto Lobo-Guerrero S.*

Chapitre 12 - Alteration processes and impacts on regional-scale element mobility and geochronology, Tamlalt-Menhouhou deposit, Morocco

*Ewan Pelleter, Dominique Gasquet, Alain Cheilletz, Abdellah Mouttaqi*

## Association géologique du Canada Volumes de cours intensifs 20





## Pour information additionnelle Economic Geology, v. 111

### Iron Oxide Copper-Gold and Affiliated Deposits of Southeast Missouri, USA, and the Great Bear Magmatic Zone, Northwest Territories, Canada

Guest Editors: John F. Slack, Louise Corriveau, and Murray W. Hitzman

**A Special Issue Devoted to Proterozoic Iron Oxide-Apatite ( $\pm$ REE) and Iron Oxide Copper-Gold and Affiliated Deposits of Southeast Missouri, USA, and the Great Bear Magmatic Zone, Northwest Territories, Canada: Preface**

**Alteration Facies Linkages Among Iron Oxide Copper-Gold, Iron Oxide-Apatite, and Affiliated Deposits in the Great Bear Magmatic Zone, Northwest Territories, Canada**

**Metasomatic Alteration Control of Petrophysical Properties in the Great Bear Magmatic Zone (Northwest Territories, Canada)**

**Geophysical Signature of the NICO Au-Co-Bi-Cu Deposit and Its Iron Oxide-Alkali Alteration System, Northwest Territories, Canada**

**Tectonomagmatic Evolution of the Southern Great Bear Magmatic Zone (Northwest Territories, Canada): Implications for the Genesis of Iron Oxide-Alkali-Altered Hydrothermal Systems**

**On the Relationship Between Alteration Facies and Metal Endowment of Iron Oxide-Alkali-Altered Systems, Southern Great Bear Magmatic Zone (Canada)**

John F. Slack, Louise Corriveau, 1803  
 and Murray W. Hitzman

L. Corriveau, J.-F. Montreuil, 2045  
 and E. G. Potter

R. J. Enkin, L. Corriveau, 2073  
 and N. Hayward

N. Hayward, L. Corriveau, 2087  
 J. A. Craven, and R. J. Enkin

J.-F. Montreuil, L. Corriveau, 2111  
 and W. J. Davis

J.-F. Montreuil, L. Corriveau, 2139  
 E. G. Potter, and A. F. De Toni



# Références

- Acosta-Góngora, G.P., Gleeson, S.A., Samson, I., Ootes, L., Corriveau, L., 2015a, Gold refining by bismuth melts in the iron oxide-dominated NICO Au-Co-Bi ( $\pm$ Cu $\pm$ W) deposit, NWT, Canada: *Economic Geology*, v. 110, p. 291–314.
- Acosta-Góngora, P., Gleeson, S., Samson, I., Corriveau, L., Ootes, L., Taylor, B.E., Creaser, R.A., Muehlenbachs, K., 2015b, Genesis of the Paleoproterozoic NICO iron-oxide-cobalt-gold-bismuth deposit, Northwest Territories, Canada: Evidence from isotope geochemistry and fluid inclusions: *Precambrian Research*, v. 268, p. 168–193.
- Acosta-Góngora, P., Gleeson, S., Samson, I., Corriveau, L., Ootes, L., Jackson, S.E., Taylor, B.E., Girard, I., 2018, Origin of sulfur and crustal recycling of copper in polymetallic (Cu-Au-Co-Bi-U  $\pm$  Ag) iron-oxide-dominated systems of the Great Bear Magmatic Zone, NWT, Canada: *Mineralium Deposita*, v. 53, p. 353–376.
- Aleinikoff, J.N., Selby, D., Slack, J.F., Day, W.C., Pillers, R.M., Cosca, M.A., Seeger, C.M., Fanning, C.M., Samson, I.M., 2016, U-Pb, Re-Os, and Ar/Ar geochronology of REE-rich breccia pipes and associated host rocks from the Mesoproterozoic Pea Ridge Fe-REE-Au deposit, St. Francois Mountains, Missouri: *Economic Geology*, v. 111, p. 1883–1914.
- Allen, S.R., McPhie, J., 2002, The Eucarro Rhyolite, Gawler Range Volcanics, South Australia; a >675 km<sup>3</sup> compositionally zoned lava of Mesoproterozoic age: *Geological Society of America, Bulletin*, v. 114, p. 1592–1609.
- Austin, J.R., Blenkinsop, T.G., 2009, Local to regional scale structural controls on mineralisation and the importance of a major lineament in the eastern Mount Isa Inlier, Australia: Review and analysis with autocorrelation and weights of evidence: *Ore Geology Reviews*, v. 35, p. 298–316.
- Austin, J.R., Blenkinsop, T.G., 2010, Cloncurry Fault Zone: Strain partitioning and reactivation in a crustal-scale deformation zone, Mt Isa Inlier: *Australian Journal of Earth Sciences*, v. 57, p. 1–21.
- Babo, J., Spandler, C., Oliver, N., Brown, M., Rubenach, M., Creaser, R.A., 2017, The high-grade Mo-Re Merlin deposit, Cloncurry District, Australia: Paragenesis and geochronology of hydrothermal alteration and ore formation: *Economic Geology*, v. 112, p. 397–422.
- Badham, J.P.N., Morton, R.D., 1976, Magnetite–apatite intrusions and calc-alkaline magmatism, Camsell River, N.W.T: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 13, p. 348–354.
- Baker, H., Pattinson, D., Reardon, C., 2011, Technical review of the Kaunisvaara iron project, Sweden: SRK Consulting, National Instrument 43-101 Technical Report, available at [www.sedar.com](http://www.sedar.com).
- Baker, H., MacDougall, C., Pattinson, D., 2014, Technical review of the Hannukainen iron-copper-gold project, Kolari District, Finland: SRK Consulting, National Instrument 43-101 Technical Report, available at [www.sedar.com](http://www.sedar.com).
- Bardina, N.Y., Popov, V.S., 1992, Classification of metasomatic rocks and facies of shallow metasomatism: *International Geology Review*, v. 34, p. 187–196.
- Barton, M.D., 2014, Iron oxide(-Cu-Au-REE-P-Ag-U-Co) systems, in Holland, H.D. and Turekian, K.K., eds., *Treatise on geochemistry*, Second Edition, volume 13: Elsevier, p. 515–541.
- Bastrakov, E.N., Skirrow, R.G., 2007, Fluid evolution and origins of iron oxide–Cu–Au prospects in the Olympic Dam district, Gawler Craton, South Australia: *Economic Geology*, v. 102, p. 1415–1440.
- Belperio, A., Flint, R., Freeman, H., 2007, Prominent Hill: A hematite-dominated, iron oxide copper-gold system: *Economic Geology*, v. 102, p. 1499–1510.



# Références

- Benavides, J., Kyser, T.K., Clark, A.H., 2007, The Mantoverde iron oxide-copper-gold district, III región, Chile: The role of regionally derived, nonmagmatic fluids in chalcopyrite mineralization: *Economic Geology*, v. 102, p. 415–440.
- Benavides, J., Kyser, T.K., Clark, A.C., Stanley, C., Oates, C., 2008a, Application of molar element ratio analysis of lag talus composite sample to the exploration for iron oxide-copper-gold mineralization: Mantoverde area, northern Chile: *Geochemistry: Exploration, Environment Analysis*, v. 8, p. 369–380.
- Benavides, J., Kyser, T.K., Clark, A.C., Stanley, C., Oates, C., 2008b, Exploration guidelines for copper-rich iron oxide-copper-gold deposits in the Mantoverde area, northern Chile: The integration of host-rock molar element ratios and oxygen isotope compositions: *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, v. 8, p. 343–367.
- Betts, P.G., Giles, D., 2006, The 1800-1100 Ma tectonic evolution of Australia: *Precambrian Research*, v. 144, p. 92–125.
- Betts, P.G., Giles, D., Foden, J., Schaefer, B.F., Mark, G., Pankhurst, M.J., Forbes, C.J., Williams, H.A., Chalmers, N.C., Hills, Q., 2009, Mesoproterozoic plume-modified orogenesis in eastern Precambrian Australia: *Tectonics*, v. 28, TC3006, doi:10.1029/2008TC002325.
- Béziat, D., Dubois, M., Debat, P., Nikiéma, S., Salvi, S., Tollon, F., 2008, Gold metallogeny in the Birimian craton of Burkina Faso (West Africa): *Journal of African Earth Sciences*, v. 50, p. 215–233.
- BHP Billiton, 2015, <http://www.bhpbilliton.com/home/investors/annualreporting2015.pdf>.
- BHP, 2017, Annual report: <https://www.bhp.com/-/media/documents/investors/annual-reports/2017/bhpannualreport2017.pdf>
- Bilenker, L.D., Simon, A.C., Reich, M., Lundstrom, C.C., Gajos, N., Bindeman, I., Barra, F., Munizaga, R., 2016, Fe–O stable isotope pairs elucidate a high-temperature origin of Chilean iron oxide-apatite deposits: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 177, p. 94–104.
- Blein, O., Corriveau, L., 2017, Recognizing IOCG alteration facies at granulite facies in the Bondy Gneiss Complex of the Grenville Province: Proceedings of the 14<sup>th</sup> SGA Biennial Meeting, 20-23 August 2017, Québec City, p. 907–911.
- Bonnet, A.-L., Corriveau, L., 2007, Atlas et outils de reconnaissance de systèmes hydrothermaux métamorphisés dans les terrains gneissiques, in Goodfellow, W.D., ed., *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, (DVD), 95 p.
- Bryan, S.E., Ukstins-Peate, I., Peate, D.W., Self, S., Jerram, D.A., 2010, The largest volcanic eruptions on Earth: *Earth-Science Reviews*, v. 102, p. 207–229.
- Burgess, H., Gowans, R.M., Hennessey, B.T., Lattanzi, C.R., Puritch, E., 2014, Technical report on the feasibility study for the NICO gold–cobalt–bismuth–copper deposit, Northwest Territories, Canada: Fortune Minerals Ltd., NI 43-101 Technical Report No. 1335, 385 p. Available at [www.sedar.com](http://www.sedar.com)
- Camprubí, A., González-Partida, E., 2017, Mesozoic magmatic–hydrothermal iron oxide deposits (IOCG ‘clan’) in Mexico: A review: *Ore Geology Reviews*, v. 81, p. 1084–1095.
- Cap, 2013, Annual operating summary: Available at [http://eng.cap.cl/wp-content/uploads/2014/08/cap\\_annual\\_report\\_2013.pdf](http://eng.cap.cl/wp-content/uploads/2014/08/cap_annual_report_2013.pdf)
- Capstone Mining Corp, 2014, Santo Domingo project, Region III, Chile: NI 43-101 Technical Report on Feasibility Study, 394 p. Available at [www.sedar.com](http://www.sedar.com)
- Carriedo, J., Tornos, F., 2010, The iron oxide copper-gold belt of the Ossa Morena Zone, Southwest Iberia: Implications for IOCG genetic models, in Porter, T.M., (ed.), *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective, volume 4, - Advances in the understanding of IOCG deposits*: Porter Geoscience Consultancy Publishing, Adelaide, p. 441–460.

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# Références

- Chen, H., 2013, External sulphur in IOCG mineralization: Implications on definition and classification of the IOCG clan: *Ore Geology Reviews*, v. 51, p. 74–78.
- Chen, H., Clark, A.H., Kyser, T.K., Ullrich, T.D., Baxter, R., Chen, Y., Moody, T.C., 2010, Evolution of the giant Marcona-Mina Justa iron oxide-copper-gold district, south-central Peru: *Economic Geology*, v. 105, p. 155–185.
- Chen, H., Kyser, T.K., Clark, A.H., 2011, Contrasting fluids and reservoirs in the contiguous Marcona and Mina Justa iron oxide–Cu(–Ag–Au) deposits, south-central Perú: *Mineralium Deposita*, v. 46, p. 677–706.
- Chen, H., Cooke, D.R., Baker, M.J., 2013, Mesozoic iron oxide copper-gold mineralization in the Central Andes and the Gondwana supercontinent breakup: *Economic Geology*, v. 108, p. 37–44.
- Chen, W.T., Zhou, M.-F., 2012, Paragenesis, stable isotopes, and molybdenite Re-Os isotope age of the Lala iron-copper deposit, southwest China: *Economic Geology*, v. 107, p. 459–480.
- Cherry, A., Kamenetsky, V., McPhie, J., Kamenetsky, M., Ehrig, K., Keeling, J., 2017, Post-1590 Ma modification of the supergiant Olympic Dam deposit: Links with regional tectonothermal events: *Proceedings of the 14<sup>th</sup> SGA Biennial Meeting, 20-23 August 2017, Québec City*, p. 847–850.
- Chinalco Yunnan Copper Resources, 2010, Inferred resource estimate – Elaine-Dorothy uranium – rare earth element (REE): ASX/Media Announcement 24 March 2010
- Chinalco Yunnan Copper Resources, 2012a, 26.1Mt inferred jorc resource estimate Elaine 1 copper-gold deposit: ASX/Media Announcement 29 June 2012.
- Chinalco Yunnan Copper Resources, 2012b, CYU and GSE update on high grade uranium in NW Queensland: ASX/Media Announcement 25 October 2012.
- Chinova Resources, 2014, Merlin molybdenum / rhenium project, 2014: Available at [http://www.inovaresources.com/images/pdf/Merlin\\_Project\\_%20Brisb\\_Mining\\_Conv\\_2014\\_v9.pdf](http://www.inovaresources.com/images/pdf/Merlin_Project_%20Brisb_Mining_Conv_2014_v9.pdf)
- Chinova Resources, 2017, Mount Elliott Swan Resource estimation update summary. Available at [www.chinovaresources.com](http://www.chinovaresources.com)
- Clark, T., Gobeil, A., David, J., 2005, Fe oxide-Cu-Au-type and related deposits in the Manitou Lake area, eastern Grenville Province, Quebec: *Variations in setting, composition and style: Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 42, p. 1829–1847.
- Clark, T., Gobeil, A., Chev , S., 2010, Alterations in IOCG-type and related deposits in the Manitou Lake area, Eastern Grenville Province, Québec, in Corriveau, L. and Mumin, A.H., eds., *Exploring for iron oxide copper–gold deposits: Canada and global analogues: Geological Association of Canada, Short Course Notes 20*, p. 127–146.
- Corona-Esquivel, R., Tritlla, J., Levresse, G., 2011, Formation ages of the two Phanerozoic IOCG belts in México: *Society for Geology Applied to Mineral Deposits, 11<sup>th</sup>, Antofagasta, Chile, Extended Abstracts*, p. 473–475.
- Corriveau, L., 2007, Iron oxide copper–gold deposits: A Canadian perspective, in Goodfellow, W.D., ed., *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*, v. 5, p. 307–328.
- Corriveau, L., 2013, Architecture de la ceinture métasédimentaire centrale au Québec, Province de Grenville : Un exemple de l’analyse de terrains de métamorphisme élevé: *Geological Survey of Canada, Bulletin 586*, 264 p., doi:10.4095/226449.

  Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Références

- Corriveau, L., 2017a, Iron-oxide and alkali-calcic alteration ore systems and their polymetallic IOA, IOCG, skarn, albitite-hosted U±Au±Co, and affiliated deposits: A short course series. Part 1: Introduction: Geological Survey of Canada, Scientific Presentation 56, 1 ppt file, 80 p. doi:10.4095/300241.
- Corriveau, L., 2017b, Les systèmes minéralisateurs à oxydes de fer et altération à éléments alcalins (±calciques) et leurs gîtes IOA, IOCG, skarns, U±Au±Co (au sein d'albitites) et affiliés: Une série de cours intensifs. Partie 1: Introduction: Geological Survey of Canada, Scientific Presentation 57, 1 ppt file, 67 p. doi:10.4095/300242.
- Corriveau, L., Mumin, A.H., 2010, Exploring for iron oxide copper–gold deposits: The need for case studies, classifications and exploration vectors, in Corriveau, L. and Mumin, A.H., eds., Exploring for iron oxide copper-gold deposits: Canada and global analogues: Geological Association of Canada, Short Course Notes 20, p. 1–12.
- Corriveau, L., Spry, P., 2014, Metamorphosed hydrothermal ore deposits, in Holland, H.D. and Turekian, K.K., eds., Treatise on Geochemistry, Second Edition: Elsevier, v. 13, p. 175–194.
- Corriveau, L., Perreault, S., Davidson, A., 2007, Prospective metallogenic settings of the Grenville Province, in Goodfellow, W.D., ed., 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, p. 819–848.
- Corriveau, L., Mumin, A.H., Setterfield, T., 2010a, IOCG environments in Canada: Characteristics, geological vectors to ore and challenges, in Porter, T.M., ed., Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective, volume 4–advances in the understanding of IOCG deposits: Porter Geoscience Consultancy Publishing, Adelaide, p. 311–344.
- Corriveau, L., Williams, P.J., Mumin, A.H., 2010b, Alteration vectors to IOCG mineralisation – from uncharted terranes to deposits, in Corriveau, L. and Mumin, A.H., eds., Exploring for iron oxide copper-gold deposits: Canada and global analogues: Geological Association of Canada, Short Course Notes 20, p. 89–110.
- Corriveau, L., Mumin, A.H., Montreuil, J.-F., 2011, The Great Bear magmatic zone (Canada): The IOCG spectrum and related deposit types: Society for Geology Applied to Mineral Deposits, 11<sup>th</sup>, Antofagasta, Chile, Extended Abstracts, p. 524–526.
- Corriveau, L., Nadeau, O., Montreuil, J.-F., Desrochers, J.-P., 2014, Report of activities for the Core Zone: Strategic geomapping and geoscience to assess the mineral potential of the Labrador Trough for multiple metals IOCG and affiliated deposits, Canada: Geological Survey of Canada, Open File 7714.
- Corriveau, L., Lauzière, K., Montreuil, J.-F., Potter, E.G., Hanes, R., Prémont, S., 2015, Dataset of geochemical data from iron oxide alkali-altered mineralizing systems of the Great Bear magmatic zone (NWT): Geological Survey of Canada, Open File 7643, 19 p., 6 geochemical datasets.
- Corriveau, L., Montreuil, J.-F., Potter, E.G., 2016, Alteration facies linkages among IOCG, IOA and affiliated deposits in the Great Bear magmatic zone, Canada, in Slack, J., Corriveau, L. and Hitzman, M., eds., Proterozoic iron oxide-apatite (± REE) and iron oxide-copper-gold and affiliated deposits of Southeast Missouri, USA, and the Great Bear magmatic zone, Northwest Territories, Canada: Economic Geology, v. 111, p. 2045–2072.
- Corriveau, L., Potter, E.G., Acosta-Góngora, P., Blein, O., Montreuil, J.-F., De Toni, A.F., Day, W., Slack, J.F., Ayuso, R.A., Hanes, R., 2017, Petrological mapping and chemical discrimination of alteration facies as vectors to IOA, IOCG, and affiliated deposits within Laurentia and beyond: Proceedings of the 14<sup>th</sup> SGA Biennial Meeting, 20-23 August 2017, Québec City, p. 851–855.

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# Références

- Corriveau, L., Potter, E.G., Montreuil, J.-F., Blein, O., Ehrig, K., De Toni, A., 2018, Iron-oxide and alkali-calcic alteration ore systems and their polymetallic IOA, IOCG, skarn, albitite-hosted U±Au±Co, and affiliated deposits: A short course series. Part 2: Overview of deposit types, distribution, ages, settings, alteration facies, and ore deposit models: Geological Survey of Canada, Scientific Presentation 81, 154 p. doi: 10.4095/306560.
- Corriveau, L., Blein, O., Gervais, F., Trapy, P.H., De Souza, S., Fafard, D. sous presse, Iron oxide and alkali-calcic alteration, skarn and epithermal mineralising systems of the Grenville Province, Canada: The Bondy gneiss complex in the Central Metasedimentary Belt as a case example – 14<sup>th</sup> SGA Biennial Meeting, Excursion Guidebook FT-02: Geological Survey of Canada, Open File 8349, 110 p.
- Couture, J.-F., Cole, G., Poxleitner, G., Nilsson, J., Dance, A., Scott, C.C., 2014, Technical report for the Candelaria and Ojos del Salado copper projects, Chile: SRK Consulting, National Instrument 43-101 Technical Report prepared for Lundin Mining Corporation, 134 p., available at [www.sedar.com](http://www.sedar.com).
- Creaser, R.A., 1996, Petrogenesis of a Mesoproterozoic quartz latite-granitoid suite from the Roxby Downs area, South Australia: *Precambrian Research*, v. 79, p. 371–394.
- Cudeco, 2017, Annual Rocklands resource update – 2017: Market release 31 October 2017.
- Cuney, M., Kyser, K., 2008, Deposits related to Na-metamorphism and high-grade metamorphism, in Cuney, M., Kyser, K., eds. *Recent and not-so-recent developments in uranium deposits and implications for exploration: Mineralogical Association of Canada, Short Course Series*, 39, p. 97–116.
- Cuney, M., Emetz, A., Mercadier, J., Mykchaylov, V., Shunko, V., Yuslenko, A., 2012, Uranium deposits associated with Na-metasomatism from central Ukraine: A review of some of the major deposits and genetic constraints: *Ore Geology Reviews*, v. 44, p. 82–106.
- Daliran, F., Stosch, H.-G., Williams, P.J., Jamali, H., Dorri, M.-B., 2010, Early Cambrian iron oxide-apatite-REE (U) deposits of the Bafq district, east-central Iran, in Corriveau, L. and Mumin, A.H., eds., *Exploring for iron oxide copper–gold deposits: Canada and global analogues: Geological Association of Canada, Short Course Notes 20*, p. 147–159.
- Davidson, G.J., Paterson, H., Meffre, S., Berry, R.F., 2007, Characteristics and origin of the Oak Dam East breccia-hosted, iron oxide-Cu-U-(Au) deposit: Olympic Dam region, Gawler Craton, South Australia: *Economic Geology*, v. 102, p. 1471–1498.
- Davis, W.D., Corriveau, L., van Breemen, O., Bleeker, W., Montreuil, J.-F., Potter, E., Pelleter, E., 2011, Timing of IOCG mineralising and alteration events within the Great Bear magmatic zone, in Fischer B.J., and Watson D.M. (compilers), *39<sup>th</sup> Annual Yellowknife Geoscience Forum Abstracts*. NWT Geological Survey, Yellowknife, NT, YKGSF Abstracts Volume 2011, p. 97.
- Day, W.C., Slack, J.F., Ayuso, R.A., Seeger, C.M., 2016, Regional geologic and petrologic framework for iron oxide ± apatite ± rare earth element and iron oxide copper-gold deposits of the Mesoproterozoic St. Francois Mountains Terrane, Southeast Missouri, USA, in Slack, J., Corriveau, L. and Hitzman, M., eds., *Proterozoic iron oxide-apatite (± REE) and iron oxide-copper-gold and affiliated deposits of Southeast Missouri, USA, and the Great Bear magmatic zone, Northwest Territories, Canada: Economic Geology*, v. 111, p. 1825–1858.
- Day, W.C., Aleinikoff, J.N., du Bray, E., Ayuso, R.A., 2017, Constraints on age of magmatism and iron oxide-apatite (IOA) and iron oxide copper-gold (IOCG) mineral deposit formation in the Mesoproterozoic St. Francois Mountains terrane of southeast Missouri, USA: *Proceedings of the 14<sup>th</sup> SGA Biennial Meeting, 20-23 August 2017, Québec City*, p. 855–857.



# Références

- Decrée, S., Marignac, C., De Putter, T., Yans, J., Clauer, N., Dermech, M., Aloui, K., Baele, J.-M., 2013, The Oued Belif hematite-rich breccia: A Miocene iron oxide Cu-Au-(U-REE) deposit in the Nefza mining district, Tunisia: *Economic Geology*, v. 108, p. 1425–1457.
- Desrochers, J.-P., 2014, Technical report on the Sagar property, Romanet Horst, Labrador Trough, Québec, Canada (latitude, 56°22'N and longitude 68°00'W; NTS Map sheets 24B/05 and 24C/08): National Instrument 43–101 Technical Report prepared for Honey Badger Exploration Inc., available at [www.sedar.com](http://www.sedar.com).
- De Toni, A.F., 2016, Les paragénèses à magnétite des altérations associées aux systèmes à oxydes de fer et altérations en éléments alcalins, zone magmatique du Grand lac de l'Ours: Unpublished M.Sc. thesis, Institut National de la Recherche Scientifique, Quebec, Canada, 529 p.
- Doeblich, J.L., Al-Jehani, A.M., Siddiqui, A.A., Hayes, T.S., Wooden, J.L., Johnson, P.R., 2007, Geology and metallogeny of the Ar Rayn terrane, eastern Arabian shield: Evolution of a Neoproterozoic continental-margin arc during assembly of Gondwana within the East African orogeny: *Precambrian Research*, v. 158, p. 17–50.
- Domingos, F., 2009, The structural setting of the Canaã dos Carajás region and Sossego-Sequeirinho deposits, Carajás, Brazil: Durham PhD theses, Durham University, 483 p. Available at Durham E-Theses Online: <http://etheses.dur.ac.uk/144/>
- Dragon Mining, 2012, Resource update for the Hangaslampi deposit, Kuusamo gold project: ASX announcement June 2012.
- Dragon Mining, 2014, Resource updates lift Kuusamo ounces: ASX announcement, March 2014.
- Drummond, B., Lyons, P., Goleby, B., Jones, J., 2006, Constraining models of the tectonic setting of the giant Olympic Dam iron oxide–copper–gold deposit, South Australia, using deep seismic reflection data: *Tectonophysics*, v. 420, p. 91–103.
- Duncan, R.J., Hitzman, M.W., Nelson, E.P., Togtokhbayar, O., 2014, Structural and lithological controls on iron oxide copper-gold deposits of the southern Selwyn-Mount Dore corridor, Eastern Fold Belt, Queensland, Australia: *Economic Geology*, v. 109, p. 419–456.
- Ehrig, K., McPhie, J., Kamenetsky, V.S., 2012, Geology and mineralogical zonation of the Olympic Dam iron oxide Cu-U-Au-Ag deposit, South Australia, in Hedenquist, J.W., Harris, M., Camus, F., eds. *Geology and genesis of major copper deposits and districts of the world: A tribute to Richard H. Sillitoe*: *Economic Geology Special Publication 16*, p. 237–267.
- Ehrig, K., Kamenetsky, V.S., McPhie, J., Apukhtina, O., Ciabanu, C.L., Cook, N., Kontonikas-Charos, A., Krneta, S., 2017, The IOCG-IOA Olympic Dam Cu-U-Au-Ag deposit and nearby prospects, South Australia: *Proceedings of the 14<sup>th</sup> SGA Biennial Meeting, 20-23 August 2017, Québec City*, p. 823–827.
- Enkin, R., Corriveau, L., Hayward, N., 2016, Metasomatic alteration control of petrophysical properties in the Great Bear magmatic zone (Northwest Territories, Canada): *Economic Geology*, v. 111, p. 2073–2085.
- Evans, L., 2014, Grängesberg iron ab - technical report on the Grängesberg iron mine resource estimate, Bergslagen, Sweden: NI 43-101 Report, 173 p.
- Fan, H.R., Hu, F.F., Yang, K.F., Pirajno, F., Liu, X., Wang, K.Y., 2014, Integrated U-Pb and Sm-Nd geochronology for a REE-rich carbonatite dyke at the giant Bayan Obo REE deposit, Northern China: *Ore Geology Reviews*, v. 63, p. 510–519.
- Fan, H.R., Yang, K.F., Hu, F.F., Liu, S., Wang, K.Y., 2015, The giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, China: Controversy and ore genesis: *Geoscience Frontiers*, [doi:10.1016/j.gsf.2015.11.005](https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.11.005)



# Références

- First Quantum Minerals, 2013, Guelb Moghrein mineral reserves: Available at: [www.first-quantum.com/Our-Business/operating-mines/Guelb-Moghrein/Reserves--Resources/default.aspx](http://www.first-quantum.com/Our-Business/operating-mines/Guelb-Moghrein/Reserves--Resources/default.aspx)
- Forslund, N., 2012, Alteration and fluid characterization of the Hamlin Lake IOCG occurrence, Northwestern Ontario, Canada: Unpublished M.Sc. Thesis, Lakehead University, Thunder Bay, 285 p.
- Gandhi, S.S., 1978, Geological setting and genetic aspects of uranium occurrences in the Kaipokok Bay-Big River area, Labrador: *Economic Geology*, v. 73, p. 1492–1522.
- Gandhi, S.S., Mortensen, J.K., Prasad, N., van Breemen, O., 2001, Magmatic evolution of the southern Great Bear continental arc, northwestern Canadian Shield: Geochronological constraints: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 38, p. 767–785.
- Gauthier, L., Hall, G., Stein, H., Schaltegger, U., 2001, The Osborne deposit, Cloncurry district: a 1595 Ma Cu-Au skarn deposit, in Williams, P.J., ed., *A hydrothermal odyssey. Extended conference abstracts*, Townsville, 17–19 May, p. 58–59.
- Gauthier, M., Chartrand, F., Cayer, A., David, J., 2004, The Kwijibo Cu-REE-U-Au-Mo-F property, Quebec: A Mesoproterozoic polymetallic iron oxide deposit in the Northeastern Grenville Province: *Economic Geology*, v. 99, p. 1177–1196.
- Gelcich, S., Davis, D.W., Spooner, E.T.C., 2005, Testing the apatite-magnetite geochronometer: U-Pb and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of plutonic rocks, massive magnetite-apatite tabular bodies, and IOCG mineralization in Northern Chile: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 69, p. 3367–3384.
- Goad, R.E., Mumin, A.H., Duke, N.A., Neale, K.L., Mulligan, D.L., 2000, Geology of the Proterozoic iron oxide-hosted, NICO cobalt-gold-bismuth, and Sue Dianne copper-silver deposits, southern Great Bear magmatic zone, Northwest Territories, Canada, in Porter, T.M., ed., *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits. A global perspective, volume 1*: Porter Geoscience Consultancy Publishing, Adelaide, p. 249–267.
- Graupner, T., Mühlbach, C., Schwarz-Schampera, U., Henjes-Kunst, F., Melcher, F., Terblanche, H., 2015, Mineralogy of high-field-strength elements (Y, Nb, REE) in the world-class Vergenoeg fluorite deposit, South Africa: *Ore Geology Reviews*, v. 64, p. 583–601.
- Griffin, W.L., Begg, G.C., O'Reilly, S.Y., 2013, Continental-root control on the genesis of magmatic ore deposits: *Nature Geoscience*, v. 6, p. 905–910.
- Groves, D.I., Bierlein, F.P., Meinert, L.D., Hitzman, M.W., 2010, Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through Earth history. Implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits: *Economic Geology*, v. 105, p. 641–654.
- GTK, 2015, Hannukainen deposit: GTK (Geological Survey of Finland), Mineral Deposit Report, v. 462, p. 1.
- Harlov, D.E., Andersson, U.B., Förster, H.-J., Nyström, J.O., Dulski, P., Broman, C., 2002, Apatite–monazite relations in the Kiirunavaara magnetite–apatite ore, northern Sweden: *Chemical Geology*, v. 191, p. 47–72.
- Harlov, D.E., Meighan, C.J., Kerr, I.D., Samson, I.M., 2016, Mineralogy, chemistry, and fluid-aided evolution of the Pea Ridge Fe oxide- (Y + REE) deposit, southeast Missouri, USA: *Economic Geology*, v. 111, p. 1963–1984.
- Haynes, D.W., Cross, K.C., Bills, R.T., Reed, M.H., 1995, Olympic Dam ore genesis: A fluid mixing model: *Economic Geology*, v. 90, p. 281–307.
- Hayward, N., Enkin, R.J., Corriveau, L., Montreuil, J-F., Kerswill, J., 2013, The application of rapid potential field methods for the targeting of IOCG mineralisation based on physical property data, Great Bear Magmatic Zone, Canada: *Journal of Applied Geophysics*, v. 94, p. 42–58.





# Références

- Hayward, Na., Corriveau, L., Craven, J., Enkin, R., 2016, Geophysical signature of alteration and mineralisation envelope at the Au-Co-Bi-Cu NICO deposit, NT, Canada, in Slack, J., Corriveau, L. and Hitzman, M., eds., Proterozoic iron oxide-apatite ( $\pm$  REE) and iron oxide-copper-gold and affiliated deposits of Southeast Missouri, USA, and the Great Bear magmatic zone, Northwest Territories, Canada: *Economic Geology*, v. 111, p. 2087–2110.
- Hayward, Ni., Skirrow, R.G., 2010, Geodynamic setting and controls on iron oxide Cu-Au ( $\pm$ U) ore in the Gawler craton, South Australia, in Porter, T.M., ed., *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits. A global perspective: Adelaide, Australia: Porter Geoscience Consultancy Publishing*, v. 3, p. 119–146.
- Hennessey, B.T., Puritch, E., 2008, A technical report on a mineral resource estimate for the Sue-Dianne deposit, Mazenod Lake area, Northwest Territories, Canada: Fortune Minerals Limited, NI 43-101 Technical Report, 125 p. Available at [www.sedar.com](http://www.sedar.com)
- Hildebrand, R.S., 1986, Kiruna-type deposits: Their origin and relationship to intermediate subvolcanic plutons in the Great Bear magmatic zone, Northwestern Canada: *Economic Geology*, v. 81, p. 640–659.
- Hitzman, M.W., 2000, Iron oxide-Cu-Au deposits. What, where, when, and why?, in Porter, T.M., ed., *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits. A global perspective, volume 1: Porter Geoscience Consultancy Publishing, Adelaide*, p. 9–25.
- Hitzman, M.W., Valenta, R.K., 2005, Uranium in iron oxide-copper-gold (IOCG) systems: *Economic Geology*, v. 100, p. 1657–1661.
- Hitzman, M.W., Oreskes, N., Einaudi, M.T., 1992, Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits: *Precambrian Research*, v. 58, p. 241–287.
- Hofstra, A., Aleinikoff, J., Ayuso, R., Bennett, M., Day, W., du Bray, E., Johnson, C., McCafferty, A., Meighan, C., Mercer, C., Neymark, L., Slack, J., Watts, K., 2017, Magmatic-hydrothermal origin of the Mesoproterozoic Pea Ridge IOA-REE deposit, southeast Missouri, USA: *Proceedings of the 14<sup>th</sup> SGA Biennial Meeting, 20-23 August 2017, Québec City*, p. 863–866.
- Huang, Q.-Y., Kamenetsky, V.S., Ehrig, K., McPhie, J., Maas, R., Kamenetsky, M.B., Apukhtina, O.B., Chambefort, I., 2016, Olivine-phyric basalt at the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag deposit: Insights into the mantle source and petrogenesis of the Gawler silicic large igneous province, South Australia: *Precambrian Research*, v. 281, p. 185–199.
- Huang, X.-W., Qi, L., Gao, J.-F., Zhou, M.-F., 2013, First reliable Re–Os ages of pyrite and stable isotope compositions of Fe(-Cu) deposits in the Hami region, Eastern Tianshan orogenic belt, NW China: *Resource Geology*, v. 63, p. 166–187.
- Huston, D.L., Hussey, K., 2001. Regional geology and metallogeny of the eastern Arunta: 2004 Chief Government Geologists Conference field excursion guide: *Geoscience Australia, Record 2004/07*.
- Intrepid Mines, 2014, Kitumba mineral resources update and ore reserve: Intrepid Mines website, available at [intrepidmines.com.au](http://intrepidmines.com.au)
- Ismail, R., Ciobanu, C.L., Cook, N.J., Giles, D., Schmidt-Mumm, A., Wade, B., 2014, Rare earths and other trace elements in minerals from skarn assemblages, Hillside iron oxide–copper–gold deposit, Yorke Peninsula, South Australia: *Lithos*, v. 184–187, p. 456–477.
- Jébrak, M., 2010, Use of breccias in IOCG(U) exploration, in Corriveau, L. and Mumin, A.H., eds., *Exploring for iron oxide copper–gold deposits: Canada and global analogues: Geological Association of Canada, Short Course Notes 20*, p. 79–88.
- Jones, J.K., 1974, Notes on the Boss copper deposit, Dent County, Missouri: Unpublished report for Essex International, Inc., 3 p. (cited in Day et al. 2016)



# Références

- Kerr, A., Sparkes, G.W., 2009, Uranium: Mineral commodities of Newfoundland and Labrador, No 5.
- Kish, L., Cuney, M., 1981, Uraninite–albite veins from the Mistamisk valley of the Labrador Trough, Québec: *Mineralogical Magazine*, v. 44, p. 471–483.
- Knight, J., Joy, S., Cameron, J., Merrillees, J., Nag, S., Shah, N., Dua, G., Jhala, K., 2002, The Khetri copper belt, Rajasthan, in Porter, T.M., ed., *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits. A global perspective, volume 2: Porter Geoscience Consultancy Publishing, Adelaide*, p. 321–341.
- Knipping, J.L., Bilenker, L.D., Simon, A.C., Reich, M., Barra, F., Deditius, A.P., Lundstrom, C., Bindeman, I., Munizaga, R., 2015, Giant Kiruna-type deposits form by efficient flotation of magmatic magnetite suspensions: *Geology*, v. 43, p. 591–594, doi: 10.1130/G36650.1.
- Kolb, J., Meyer, F.M., Vennemann, T., Sindern, S., Prantl, S., Böttcher, M.E., Sakellaris, G.A., 2010, Characterisation of the hydrothermal fluids of the Guelb Moghrein iron oxide-cu-au-co deposit, Mauritania: Ore mineral chemistry, fluid inclusions and isotope geochemistry, in Porter, T.M., ed., *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective, volume 4—advances in the understanding of IOCG deposits: Porter Geoscience Consultancy Publishing, Adelaide*, p. 553–572.
- Kontonikas-Charos, K., Ciobanu, C.L., Cook, N.J., 2014, Albitization and redistribution of REE and Y in IOCG systems: Insights from Moonta-Wallaroo, Yorke Peninsula, South Australia: *Lithos*, v. 208–209, p. 178–201.
- Kontonikas-Charos, K., Ciobanu, C.L., Cook, N.J., Ehrig, K., Krneta S., Kamenetsky, V.S., 2017, Feldspar evolution in the Roxby Downs Granite, host to Fe-oxide Cu-Au-(U) mineralisation at Olympic Dam, South Australia: *Ore Geology Reviews*, v. 80, p. 838–859.
- Kositcin, N., 2010, Geodynamic synthesis of the Gawler Craton and Curnamona Province: *Geoscience Australia, Record*, 2010/27, 113 p.
- Kreiner, D., Barton, M.D., 2011, High-level alteration in iron-oxide (-Cu–Au) (IOCG) vein systems, examples near Copiapó, Chile: *Proceedings of the 11<sup>th</sup> Biennial SGA meeting, Antofagasta, Chile*, p. 497–499.
- Krneta, S., Cook, N.J., Ciobanu, C.L., Ehrig, K., Kontonikas-Charosa, A., 2017, The Wirrda Well and Acropolis prospects, Gawler Craton, South Australia: Insights into evolving fluid conditions through apatite chemistry: *Journal of Geochemical Exploration*, v. 181, p. 276–291.
- Kuşcu, İ., Yilmazer, E., Demirela, G., Gençaliolu-Kuşcu, G., Güleç, N., 2010, Iron oxide-(copper±gold) mineralisation in the Turkish Tethyan collage, in Porter, T.M., ed., *hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective, volume 4 - Advances in the understanding of IOCG deposits: Porter Geoscience Consultancy Publishing, Adelaide*, p. 573–600.
- Kwong, Y.T.J. 2003, Comprehensive environmental ore deposit models as an aid for sustainable development: *Exploration and Mining Geology*, v. 12, p. 31–36.
- Y.T. JOHN KWONG Lafrance, B., 2009, La filière plutonique comme outil d'exploration pour les IOCG: Application en Abitibi. *Projet CONSOREM 2009-05*, 64 p.
- Li, W., Audétat, A., Zhang, J., 2015, The role of evaporites in the formation of magnetite–apatite deposits along the Middle and Lower Yangtze River, China: Evidence from LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions: *Ore Geology Reviews*, v. 67, p. 264–278.
- Li, X., Zhao, X., Zhou, M.-F., Chen, W. T., Chu, Z., 2015, Fluid inclusion and isotopic constraints on the origin of the Paleoproterozoic Yinachang Fe-Cu-(REE) deposit, southwest China: *Economic Geology*, v. 110, p. 1339–1369.
- L.K.A.B., 2013, *Annual report: Luleå, Sweden: Luleå Grafiska*, 138 p.



# Références

- Lobo-Guerrero, S.A., 2010, Iron oxide–copper–gold mineralization in the greater Lufilian arc, Africa, in Corriveau, L. and Mumin, A.H., eds., Exploring for iron oxide copper-gold deposits: Canada and global analogues: Geological Association of Canada, Short Course Notes 20, p. 161–175.
- Lopez, G.P., Hitzman, M.W., Nelson, E.P., 2014, Alteration patterns and structural controls of the El Espino IOCG mining district, Chile: *Mineralium Deposita*, v. 49, p. 235–259.
- Lyons, J.I., 1988, Volcanogenic iron-oxide deposits, Cerro de Mercado and vicinity, Durango, Mexico: *Economic Geology*, v. 83, p. 1886–1906.
- Macmillan, E., Cook, N.J., Ehrig, K., Ciobanu, C.L., Pring, A., 2016, Uraninite from the Olympic Dam IOCG-U-Ag deposit: Linking textural and compositional variation to temporal evolution: *American Mineralogist*, v. 101, p. 1295–1320.
- Madeisky, H.E., 1996, A lithochemical and radiometric study of hydrothermal alteration and metal zoning at the Cinola epithermal gold deposit, Queen Charlotte Islands, British Columbia, in Coyner, A.R. and Fahey, P.L., eds., *Geology and ore deposits of the American Cordillera: Geological Society of Nevada, USA*, v. 3, p. 1153–1185.
- Mao, J., Xie, G., Duan, C., Pirajno, F., Ishiyama, D., Chen, Y., 2011, A tectono-genetic model for porphyry–skarn–stratabound Cu–Au–Mo–Fe and magnetite–apatite deposits along the Middle–Lower Yangtze River Valley, Eastern China: *Ore Geology Reviews*, v. 43, p. 294–314.
- Mark, G., Oliver, N.H.S., Williams, P.J., Valenta, R.K., Crookes, R.A., 2000, The evolution of the Ernest Henry Fe-oxide-(Cu–Au) hydrothermal system, in Porter, T.M., ed., *Hydrothermal iron oxide copper–gold and related deposits: A global perspective, volume 1: Porter Geosciences Consultancy Publishing*, Adelaide, p. 123–136.
- Mark, G., Oliver, N.H.S., Williams, P.J., 2006, Mineralogical and chemical evolution of the Ernest Henry Fe oxide-Cu-Au ore system, Cloncurry district, northwest Queensland, Australia: *Mineralium Deposita*, v. 40, p. 769–801.
- Marschik, R., Fontboté, L., 2001, The Candelaria–Punta del Cobre iron oxide Cu–Au (–Zn–Ag) deposits, Chile: *Economic Geology*, v. 96, p. 1799–1826.
- Marschik, R., Chiaradia, M., Fontboté, L., 2003, Implications of Pb isotope signatures of rocks and iron oxide Cu–Au ores in the Candelaria-Punta del Cobre district, Chile: *Mineralium Deposita*, v. 38, p. 900–912.
- Martinsson, O., Billström, K., Broman, C., Weihed, P., Wanhainen, C., 2016, Metallogeny of the Northern Norrbotten Ore Province, northern Fennoscandian Shield with emphasis on IOCG and apatite-iron ore deposits: *Ore Geology Reviews*, v. 78, p. 447–492.
- Mathur, R., Marschik, R., Ruiz, J., Munizaga, F., Leveille, R.A., Martin, W., 2002, Age of mineralization of the Candelaria Fe oxide Cu-Au deposit and the origin of the Chilean iron belt, based on Re-Os isotopes: *Economic Geology*, v. 97, p. 59–71.
- McPhie, J. Orth, K. Kamenetsky, V., Kamenetsky, M., Ehrig, K., 2016, Characteristics, origin and significance of Mesoproterozoic beddedclastic facies at the Olympic Dam Cu–U–Au–Ag deposit, South Australia: *Precambrian Research*, v. 276, p. 85–100.
- Metal X, 2016, [https://www.metalsx.com.au/system/assets/89/original/Metals\\_X\\_2016\\_Annual\\_Report.pdf](https://www.metalsx.com.au/system/assets/89/original/Metals_X_2016_Annual_Report.pdf)
- Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Carvalho, E.R., Hitzman, M.W., Johnson, C.A., Souza Filho, C.R., Torresi, I., 2008, Space and temporal zoning of hydrothermal alteration and mineralization in the Sossego iron oxide-copper-gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: Paragenesis and stable isotope constraints: *Mineralium Deposita*, v. 43, p. 129–159.





# Références

- Montreuil, J.-F., Corriveau, L., Grunsky, E.C., 2013, Compositional data analysis of IOCG systems, Great Bear magmatic zone, Canada: To each alteration types its own geochemical signature: *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, v. 13, p. 229–247.
- Montreuil, J.-F., Corriveau, L., Potter, E.G., 2015, Formation of albitite-hosted uranium within IOCG systems: The Southern Breccia, Great Bear magmatic zone, Northwest Territories, Canada: *Mineralium Deposita*, v. 50, p. 293–325.
- Montreuil, J.-F., Corriveau, L., Davis, W., 2016a, Tectonomagmatic evolution of the southern Great Bear magmatic zone (Northwest Territories, Canada) – Implications on the genesis of iron oxide alkali-altered hydrothermal systems, in Slack, J., Corriveau, L. and Hitzman, M., eds., *Proterozoic iron oxide-apatite ( $\pm$  REE) and iron oxide-copper-gold and affiliated deposits of Southeast Missouri, USA, and the Great Bear magmatic zone, Northwest Territories, Canada: Economic Geology*, v. 111, p. 2111–2138.
- Montreuil, J.-F., Corriveau, L., Potter, E.G., De Toni, A.F., 2016b, On the relation between alteration facies and metal endowment of iron oxide–alkali –altered systems, southern Great Bear Magmatic Zone (Canada), in Slack, J., Corriveau, L. and Hitzman, M., eds., *Proterozoic iron oxide-apatite ( $\pm$  REE) and iron oxide-copper-gold and affiliated deposits of Southeast Missouri, USA, and the Great Bear magmatic zone, Northwest Territories, Canada: Economic Geology*, v. 111, p. 2139–2168.
- Montreuil, J.-F., Potter, E., Corriveau, L., Davis, W.J., 2016c, Element mobility patterns in magnetite-group IOCG systems: The Fab IOCG system, Northwest Territories, Canada: *Ore Geology Reviews*, v. 72, p. 562–584.
- Moreto, C.P.N., Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Creaser, R.A., DuFrane, S.A., Melo, G.H.C., 2015, Timing of multiple hydrothermal events in the iron oxide–copper–gold deposits of the Southern Copper Belt, Carajás Province, Brazil: *Mineralium Deposita*, v. 50, p. 517–546.
- Mumin, A.H., Corriveau, L., 2004, The Eden deformation corridor and polymetallic mineral belt: Trans Hudson Orogen, Leaf Rapids District, Manitoba: Manitoba Geological Survey, Report of Activities 2004, p. 69–91.
- Mumin, A.H., Corriveau, L., Somarin, A.K., Ootes, L., 2007, Iron oxide copper-gold-type polymetallic mineralisation in the Contact Lake Belt, Great Bear Magmatic Zone, Northwest Territories, Canada: *Exploration and Mining Geology*, v. 16, p. 187–208.
- Mumin, A.H., Somarin, A.K., Jones, B., Corriveau, L., Ootes, L., Camier, J., 2010, The IOCG-porphyry-epithermal continuum of deposits types in the Great Bear magmatic zone, Northwest Territories, Canada, in Corriveau, L. and Mumin, A.H., eds., *Exploring for iron oxide copper-gold deposits: Canada and global analogues: Geological Association of Canada, Short Course Notes 20*, p. 59–78.
- Mumin, A.H., Phillips, A., Katsuragi, C.J., Mumin, A., Ivanov, G., 2014, Geotectonic interpretation of the Echo Bay stratovolcano complex, northern Great Bear magmatic zone, NWT, Canada: NWT Geoscience Office, NWT Open File 2014-04.
- N9GBYBGM (No. 9 Geological Brigade of the Yunnan Bureau of Geology and Mineral Resources), 1983, Report of exploration and prospecting of the Dahongshan iron and copper deposits, Xiping County, Yunnan Province: Unpublished report, p. 377 (en chinois cité dans Zhao et al. 2017b).
- Naranjo, J.A., Henríquez, F., Nyström, J.O., 2010, Subvolcanic contact metasomatism at El Laco Volcanic Complex, Central Andes: *Andean Geology*, v. 37, p. 110–120.



# Références

- Neymark, L.A., Holm-Denoma, C.S., Pietruszka, A.J., Aleinikoff, J.N., Fanning, C.M., Pillers, R.M., Moscati, R.J., 2016, High spatial resolution U-Pb geochronology and Pb isotope geochemistry of magnetite-apatite ore from the Pea Ridge iron oxide-apatite deposit, St. Francois Mountains, southeast Missouri, USA: *Economic Geology*, v. 111, p. 1915–1933.
- Nold, J.L., Davidson, P., Dudley, M.A., 2013, The Pilot Knob magnetite deposit in the Proterozoic St. Francois Mountains Terrane, southeast Missouri, USA: A magmatic and hydrothermal replacement iron deposit: *Ore Geology Reviews*, v. 53, p. 446–469.
- Nold, J.L., Dudley, M.A., Davidson, P., 2014, The Southeast Missouri (USA) Proterozoic iron metallogenic province—Types of deposits and genetic relationships to magnetite–apatite and iron oxide–copper–gold deposits: *Ore Geology Reviews*, v. 57, p. 154–171.
- Normandeau, P.X., Harlov, D.E., Corriveau, L., Paquette, J., McMartin, I., 2018, Characterization of fluorapatite within iron oxide alkali-calcic alteration systems of the Great Bear magmatic zone: A potential metasomatic process record: *The Canadian Mineralogist*, v. 56, p. 1–21.
- Nyström, J.O., Henríquez, F., 1994, Magmatic features of iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden: Ore textures and magnetite geochemistry: *Economic Geology*, v. 89, p. 820–839.
- Oliver, N.H.S., Bons, P.D., 2001, Mechanisms of fluid flow and fluid–rock interaction in fossil metamorphic hydrothermal systems inferred from vein–wallrock patterns, geometry and microstructure: *Geofluids*, v. 1, p. 137–162.
- Oliver, N.H.S., Mark, G., Pollard, P.J., Rubenach, M.J., Bastrakov, E., Williams, P.J., Marshall, L.C., Baker, T., Nemchin, A.A., 2004, The role of sodic alteration in the genesis of iron oxide-copper–gold deposits: Geochemistry and geochemical modelling of fluid-rock interaction in the Cloncurry district, Australia: *Economic Geology*, v. 99, p. 1145–1176.
- Oliver, N.H.S., Rubenach, M.J., Baker, B.F., Blenkinsop, T.G., Cleverley, J.S., Marshall, L.J., Ridd, P.J., 2006, Granite-related overpressure and volatile release in the mid crust: Fluidized breccias from the Cloncurry district, Australia: *Geofluids*, v. 6, p. 346–358.
- Oliver, N.H.S., Rusk, B.G., Long, R., Zhang, D., 2009, Copper- and iron-oxide-Cu-Au deposits, and their associated alteration and brecciation, Mount Isa block: SGA post-conference trip field guide: Mt Isa Cu, IOCG and breccias. EGRU/JCU, 40 p.
- Oliver, N.H.S., McLellan, J.G., Cleverley, J., Babo, J., Marshall, L.J., Brown, M.C., 2017, Chaos and control: The interplay between discordant IOCG-related breccias and their bounding fault and shear arrays, Cloncurry District, northern Australia: *Proceedings of the 14th SGA Biennial Meeting, 20-23 August 2017, Québec City*, p. 875–878.
- Ootes, L., Snyder, D., Davis, W.J., Acosta-Góngora, P., Corriveau, L., Mumin, A.H., Montreuil, J.-F., Gleeson, S.A., Samson, I.A., Jackson, V.A., 2016, A Paleoproterozoic Andean-type iron oxide copper-gold environment, the Great Bear magmatic zone, Northwest Canada: *Ore Geology Reviews*, v. 81, p. 123–139.
- Oyarzun, R., Oyarzún, J., Ménard, J.J., Lillo, J., 2003, The Cretaceous iron belt of northern Chile: Role of oceanic plates, a superplume event, and a major shear zone: *Mineralium Deposita*, v. 38, p. 640–646.
- Oz Minerals, 2013, Annual Carrapateena Resource Update – 2013: ASX Release, 28 November 2013, 25 p.
- Oz Minerals, 2014a, Initial 202 Mt at 0.6% copper resource for Khamsin: ASX Release 26 May 2014, 20 p.

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Références

- Oz Minerals, 2014b, Annual resource and reserve update for Prominent Hill: ASX Release 20 November 2014, 50 p.
- Oz Minerals, 2017, Carrapateena project mineral resource restatement and ore reserve statement: Available at: <https://www.ozminerals.com/media/oz-minerals-carrapateena-mineral-resource-and-ore-reserve-statement/>
- Paladin Energy, 2015a, Michelin deposit, geology and resources: Accessed February 2015, <http://www.paladinenergy.com.au/default.aspx?MenuID=197>
- Paladin Energy, 2015b, Valhalla uranium deposit, mineral resources: Accessed February 2015, <http://www.paladinenergy.com.au/default.aspx?MenuID=35>
- Perreault, S., Lafrance, B., 2015, Kwyjibo, a REE-enriched iron oxides-copper-gold (IOCG) deposit, Grenville Province, Québec, in Simandl, G.J. and Neetz, M., eds., Symposium on strategic and critical materials proceedings, November 13-14, 2015, Victoria, British Columbia: British Columbia Ministry of Energy and Mines, British Columbia Geological Survey Paper 2015-3, p. 139–145.
- Polito, P.A., Kyser, T.K., Stanley, C., 2009, The Proterozoic, albitite-hosted, Valhalla uranium deposit, Queensland, Australia: A description of the alteration assemblage associated with uranium mineralization in diamond drill hole V39: *Mineralium Deposita*, v. 44, p. 11–40.
- Porter, T.M., 2000, Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits. A global perspective, volume 1: Porter Geoscience Consultancy Publishing, Adelaide, 349 p.
- Porter, T.M., 2002, Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits. A global perspective, volume 2: Porter Geoscience Consultancy Publishing, Adelaide, 377 p.
- Porter, T.M., 2010a, Current understanding of iron oxide associated-alkali altered mineralised systems. Part 1 - An overview, in Porter, T.M., ed., Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits. A global perspective, volume 3: Porter Geoscience Consultancy Publishing, Adelaide, p. 5–32.
- Porter, T.M., 2010b, The Carrapateena iron oxide copper-gold deposit, Gawler Craton, South Australia: A review, in Porter, T.M., ed., Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits. A global perspective, volume 3: Porter Geoscience Consultancy Publishing, Adelaide, p. 191–200.
- Porto da Silveira, C.L., Schorscher, H.D., Miekeley, N., 1991, The geochemistry of albitization and related uranium mineralization, Espinharas, Paraiba (PB), Brazil: *Journal Geochemistry Exploration*, v. 40, p. 329–347.
- Potter, E.G., Corriveau, L., Kerswill, J.K., 2013, Potential for iron oxide-copper-gold and affiliated deposits in the proposed national park area of the East Arm, Northwest Territories: Insights from the Great Bear magmatic zone and global analogs, in Wright, D.F., Kjarsgaard, B.A., Ambrose, E.J., and Bonham-Carter, G.F., eds., Mineral and energy resource assessment for the proposed Thaidene Nene National Park reserve, East Arm of Great Slave Lake, Northwest Territories: Geological Survey of Canada, Open File 7196, Chapter 19, p. 477–493.
- Puritch, E., Ewert, W., Armstrong, T., Brown, F., Orava, D., Pearson, J.L., Hayes, T., Duggan, T., Holmes, G., Uceda, D., Sumners, W., Mackie, D., Rougier, M., Bocking, K., Mezei, A., Horne, B., 2012a, Technical report and updated mineral reserve estimate and front-end engineering and design (FEED) study on the NICO gold-cobalt-bismuth-copper deposit, Mazonod Lake area, Northwest Territories, Canada: NI 43–101 Technical Report No. 247 prepared for Fortune Minerals Ltd., 307 p.
- Puritch, E., Rodgers, K., Pearson, J.L., Burga, D., Orava, D., Hayden, A., 2012b, Technical report and preliminary economic assessment of the Upper Beaver gold-copper deposit, Kirkland Lake, Ontario, Canada: NI 43–101 Technical Report No. 239, 178 p.





# Références

- Ray, G.E., Lefebure, D.V., 2000, A synopsis of iron oxide  $\pm$  Cu  $\pm$  Au  $\pm$  P  $\pm$  REE deposits of the Candelaria-Kiruna-Olympic Dam family: British Columbia Ministry of Energy and Mines, Geological Fieldwork 1999, Paper 2000-1, p. 267–272.
- Reed, M., Rusk, R., Palandri, J., 2013, The Butte magmatic-hydrothermal system: One fluid yields all alteration and veins: *Economic Geology*, v. 108, p. 1379–1396.
- Reeve, J.S., Cross, K.C., Smith, R.N., Oreskes, N., 1990, The Olympic Dam copper-uranium-gold-silver deposit, South Australia, in Hughes, F., ed., *Geology of mineral deposits of Australia and Papua New Guinea: Australian Institute of Mining and Metallurgy Monograph 14*, p. 1009–1035.
- Reid, A.J., Fabris, A., 2015, Influence of preexisting low metamorphic grade sedimentary successions on the distribution of iron oxide copper-gold mineralization in the Olympic Cu-Au province, Gawler craton: *Economic Geology*, v. 110, p. 2147–2157.
- Reid, A., Thiel, S., McAnaney, S., Wade, C., 2017, Evidence for a cryptic paleo-suture zone: Implications for IOCG mineralisation in the Gawler Craton: *Proceedings of the 14<sup>th</sup> Biennial SGA meeting*, p. 883–886.
- Reischmann, T., 1995, Precise U/Th age determination with baddeleyite (ZrO<sub>2</sub>), a case study from the Phalaborwa Igneous Complex, South Africa: *South African Journal of Geology*, v. 98, p. 1–4.
- Requia, K., Stein, H., Fontboté, L., Chiaradia, M., 2003, Re–Os and Pb–Pb geochronology of the Archean Salobo iron oxide copper–gold deposit, Carajás mineral province, northern Brazil: *Mineralium Deposita*, v. 38, p. 727–738.
- Rex Minerals Ltd., 2015, Hillside project, mineral resources and ore reserves: Accessed at [www.rexminerals.com.au](http://www.rexminerals.com.au)
- Reynolds, L.J., 2000, Geology of the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag-REE deposit, in Porter, T.M., ed., *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective, volume 1: Porter Geoscience Consultancy Publishing, Adelaide*, p. 93–104.
- Richards, J.P., López, G.P., Zhu, J.-J., Creaser, R.A., Locock, A.J., Mumin, A.H., 2017, Contrasting tectonic settings and sulfur contents of magmas associated with cretaceous porphyry Cu  $\pm$  Mo  $\pm$  Au and intrusion-related iron oxide cu-au deposits in Northern Chile: *Economic Geology*, v. 112, p. 295–318.
- Rieger, A.A., Marschik, R., Díaz, M., 2010, The Mantoverde district, northern Chile: An example of distal portions of zoned IOCG systems, in Porter, T.M., ed., *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective, volume 3: Porter Geoscience Consultancy Publishing, Adelaide, Australia*, p. 273–284.
- Romer, R.L., Martinsson, O., Perdahl, J.-A., 1994, Geochronology of the Kiruna iron ores and hydrothermal alterations: *Economic Geology*, v. 89, p. 1249–1261.
- Rubenach, M., 2012, Chapter 4 - Structural controls of metasomatism on a regional scale, in Harlov, D.E. and Austrheim, H., eds., *Metasomatism and the chemical transformation of rock: Lecture Notes in Earth System Sciences, Springer*, p. 93–140.
- Rusk, B., Oliver, N., Blenkinsop, T., Zhang, D., Williams, P., Cleverley, J., Habermann, P., 2010, Physical and chemical characteristics of the Ernest Henry iron oxide copper gold deposit, Cloncurry, Queensland, Australia; Implications for IOCG genesis, in Porter, T.M., ed., *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective, volume 4–advances in the understanding of IOCG deposits: Porter Geoscience Consultancy Publishing, Adelaide*, p. 201–218.



# Références

- Rusk, B., Emsbo, P., Xavier, R.P., Corriveau, L., Oliver, N., Zhang, D., 2015, A comparison of fluid origins and compositions in iron oxide-copper-gold and porphyry-Cu (Mo-Au) deposits: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, PACRIM 2015 Congress, Proceedings, p. 271–280.
- Sangster, P.J., Le Baron, P.S., Charbonneau, S.J., Laidlaw, D.A., Wilson, A.C., Carter, T.R., Fortner, L. 2012, Report of activities 2011, resident geologist program, southern Ontario regional resident geologist report: Southeastern and Southwestern Ontario Districts and Petroleum Resources Centre, Ontario Geological Survey, Open File Report 6277, 72 p.
- Schofield, A., 2012, An assessment of the uranium and geothermal prospectivity of the southern Northern Territory: Geoscience Australia, Record 2012/51, 214 p.
- Selleck, B., McLelland, J., Hamilton, M.A., 2004, Magmatic-hydrothermal leaching and origin of late- to post-tectonic quartz-rich rocks, Adirondack Highlands, New York, in Tollo, R.P., Corriveau, L., McLelland, J., and Bartholomew, M, eds., Proterozoic tectonic evolution of the Grenville Orogen in North America: Geological Society of America Memoir, No 197, p. 379–390.
- Seo, S., Choi, S.G., Kima, D.W., Park, J.W., Oh, C.W., 2015, A new genetic model for the Triassic Yangyang iron-oxide-apatite deposit, South Korea: Constraints from in situ U–Pb and trace element analyses of accessory minerals: Ore Geology Reviews, v. 70, p. 110–135.
- Sidder, G.B., Day, W.C., Nuelle, L.M., Seeger, C.M., Kisvarsanyi, E.B., 1993, Mineralogic and fluid-inclusion studies of the Pea Ridge iron-rare-earth-element deposit, southeast Missouri: U.S. Geological Survey Bulletin 2039, p. 205–216.
- Sillitoe, R.H., 2003, Iron oxide–copper–gold deposits: An Andean view: Mineralium Deposita, v. 38, p. 787–812.
- Skirrow, R.G., 2000, Gold-copper-bismuth deposits of the Tennant Creek district, Australia: A reappraisal of diverse high-grade systems, in Porter, T.M., ed., Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective, volume 1: Porter Geoscience Consultancy Publishing, Adelaide, p. 149–160.
- Skirrow, R.G., Walshe, J.L., 2002, Reduced and oxidised Au-Cu-Bi iron oxide deposits of the Tennant Creek Inlier, Australia: An integrated geologic and chemical model: Economic Geology, v. 97, p. 1167–1202.
- Skirrow, R., 2010, "Hematite-group" IOCG±U ore systems. Tectonic settings, hydrothermal characteristics, and Cu-Au and U mineralizing processes, in Corriveau, L. and Mumin, A.H., eds., Exploring for iron oxide copper-gold deposits: Canada and global analogues: Geological Association of Canada, Short Course Notes 20, p. 39–58.
- Skirrow, R.G., Jaireth, S., Huston, D.L., Bastrakov, E.N., Schofield, A., van der Wielen, S.E., Barnicoat, A.C., 2009, Uranium mineral systems: Processes, exploration criteria and a new deposit framework: Geoscience Australia Record 2009/20, 44 p.
- Slack, J., 2013, Descriptive and geoenvironmental model for cobalt–copper–gold deposits in metasedimentary rocks: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5070–G, 218 p.
- Somarin, A.K., Mumin, A.H., 2014, P–T-composition and evolution of paleofluids in the Paleoproterozoic Mag Hill IOCG hydrothermal system, Contact Lake belt, Northwest Territories, Canada: Mineralium Deposita, v. 49, p. 199–215.
- Sparkes, G.W., 2017, Uranium mineralization within the Central Mineral Belt of Labrador: A summary of the diverse styles, settings and timing of mineralization. Government of Newfoundland and Labrador: Department of Natural Resources, Geological Survey, St. John's, Open File LAB/1684, 198 p.



# Références

- Spratt, J.E., Jones, A.G., Jackson, V.A., Collins, L., Avdeeva, A., 2009, Lithospheric geometry of the Wopmay orogen Orogen from a Slave craton to Bear Province magnetotelluric transect: *Journal of Geophysical Research*, v. 114, 18 p.
- Stosch, H.G., Romer, R.L., Daliran, F., Rhede, D., 2011, Uranium–lead ages of apatite from iron oxide ores of the Bafq District, East-Central Iran: *Mineralium Deposita*, v. 46, p. 9–21.
- Sun, W., Yuan, F., Jowitt, S.M., Zhou, T., Hollings, P., Liu, G., Li, X., 2017, Geochronology and geochemistry of the Fe ore-bearing Zhonggu intrusions of the Ningwu Basin: Implications for tectonic setting and contemporaneous Cu-Au mineralization in the Middle–Lower Yangtze Metallogenic Belt: *Ore Geology Reviews*, v. 84, p. 246–272.
- Tallarico, F.H.B., McNaughton, N.J., Groves, D.I., Fletcher, I.R., Figueiredo, B.R., Carvalho, J.B., Rego, J.L., Nunes, A.R., 2004, Geological and SHRIMP II U–Pb constraints on the age and origin of the Breves Cu-Au-(W-Bi-Sn) deposit, Carajás, Brazil: *Mineralium Deposita*, v. 39, p. 68–86.
- Thiel, S., Heinson, G., 2013, Electrical conductors in Archean mantle—Result of plume interaction? *Geophysical Research Letters*, v. 40, p. 2947–2952
- Thiel, S., Heinson, G., Reid, A., Robertson, K., 2016, Insights into lithospheric architecture, fertilisation and fluid pathways from AusLAMP MT: ASEG Extended Abstracts 2016, p. 1–6.
- Thorkelson, D.J., Mortensen, J.K., Creaser, R.A., Davidson, G.J., Abbott, J.G., 2001, Early Proterozoic magmatism in Yukon, Canada: Constraints on the evolution of northwestern Laurentia: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 38, p. 1479–1494.
- Torab, F.M., Lehmann, B., 2007, Magnetite-apatite deposits of the Bafq district, Central Iran: Apatite geochemistry and monazite geochronology: *Mineralogical Magazine*, v. 71 (3), p. 347–363.
- Tornos, F., Velasco, F., Hanchar, J.M., 2016, Iron-rich melts, magmatic magnetite, and superheated hydrothermal systems: The El Laco deposit, Chile: *Geology*, v. 44 (6), p. 427–430.
- Tornos, F., Velasco, F., Hanchar, J.M., Velasco, F., Muñizaga, R., Levresse, G., 2017, The roots and tops of magnetite-apatite mineralization: Evolving magmatic-hydrothermal systems: *Proceedings of the 14<sup>th</sup> Biennial SGA meeting*, p. 831–835.
- Turner, D., 2012, Independent technical report on the Kiyuk Lake property, Nunavut Territory, Canada: National Instrument 43-101 report available on [www.sedar.com](http://www.sedar.com).
- Valley, P.M., Hanchar, J.M., Whitehouse, M.J., 2009, Direct dating of Fe oxide-(Cu-Au) mineralization by U/Pb zircon geochronology: *Geology*, v. 37, p. 223–226, doi: 10.1130/G25439A.1.
- Valley, P.M., Hanchar, J.M., Whitehouse, M.J., 2011, New insights on the evolution of the Lyon Mountain granite and associated Kiruna-type magnetite-apatite deposits, Adirondack Mountains, New York State: *Geosphere*, v. 7, p. 357–389, doi: 10.1130/GES00624.1.
- Vanhanen, E., 2001, Geology, mineralogy and geochemistry of the Fe-Co-Au-(U) deposits in the Paleoproterozoic Kuusamo Schist Belt, northeastern Finland: *Geological Survey of Finland Bulletin*, v. 399, 229 p.
- Verbaas, J., Thorkelson, D.J., Crowley, J., Davis, W.J., Foster, D.A., Gibson, H.D., Marshall, D.D., Milidragovic, D., 2018, A sedimentary overlap assemblage links Australia to northwestern Laurentia at 1.6 Ga: *Precambrian research*, v. 305, p. 19–39.

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018





# Références

- Verissimo, C.U.V., Santos, R.V., Parente, C.V., de Oliveira, C.G., Cavalcanti, J.A.D., Neto, J.A.N., 2016, The Itataia phosphate-uranium deposit (Ceara, Brazil) new petrographic, geochemistry and isotope studies: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 70, p. 115–144.
- Wade, B.P., Barovich, K.M., Hand, M., Scrimgeour, I.R., Close, D.F., 2006, Evidence for early Mesoproterozoic arc magmatism in the Musgrave Block, central Australia: Implications for Proterozoic crustal growth and tectonic reconstructions of Australia: *Journal of Geology*, v. 114, p. 43–63.
- Waller, C.G., Robertson, M.J., Witley, J.C., Carthew, G.H., Morgan, D.J.T., 2014, Kitumba copper project, optimised pre-feasibility study: NI 43-101 Technical Report, prepared for Intrepid Mines Limited by Lycopodium Minerals Pty Ltd, 279 p.
- Wang, S., Williams, P.J., 2001, Geochemistry and origin of Proterozoic skarns at the Mount Elliott Cu-Au(-Co-Ni) deposit, Cloncurry district, NW Queensland, Australia: *Mineralium Deposita*, v. 36, p. 109–124.
- Wanhainen, C., Broman, C., Martinsson, O., 2003, The Aitik Cu–Au–Ag deposit in northern Sweden: A product of high salinity fluids: *Mineralium Deposita*, v. 38, p. 715–726.
- Whitney, D.L., Evans, B.W., 2010, Abbreviations for names of rock-forming minerals: *American Mineralogist*, v. 95, p. 185–187.
- Wilde, A., 2013, Towards a model for albitite-type uranium: *Minerals*, v. 3, p. 36–48.
- Williams, P.J., 2010a, Classifying IOCG deposits, in Corriveau, L. and Mumin, A.H., eds., *Exploring for iron oxide copper-gold deposits: Canada and global analogues: Geological Association of Canada, Short Course Notes 20*, p. 13–22.
- Williams, P.J., 2010b, "Magnetite-group" IOCGs with special reference to Cloncurry (NW Queensland) and Northern Sweden. Settings, alteration, deposit characteristics, fluid sources, and their relationship to apatite-rich iron ores, in Corriveau, L. and Mumin, A.H., eds., *Exploring for iron oxide copper-gold deposits: Canada and global analogues: Geological Association of Canada, Short Course Notes 20*, p. 23–38.
- Williams, P.J., Skirrow, R.G., 2000, Overview of IOCG deposits in the Curnamona Province and Cloncurry district (eastern Mount Isa block), Australia, in Porter, T.M., ed., *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective: Adelaide, Australian Mineral Foundation*, p. 105–122.
- Williams, P.J., Barton, M.D., Johnson, D.A., Fontbote, L., de Haller, A., Mark, G., Oliver, N.H.S., Marschik, R., 2005, Iron oxide copper-gold deposits; geology, space-time distribution, and possible modes of origin: *Economic Geology 100<sup>th</sup> Anniversary Volume*, p. 371–406.
- Williams, P.J., Kendrick, M., Xavier, R.P., 2010, Sources of ore fluid components in IOCG deposits, in Porter, T.M., ed., *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective, volume 3—Advances in the understanding of IOCG deposits: Porter Geoscience Consultancy Publishing, Adelaide*, p. 107–116.
- Wise, T., Reid, A., Jakica, S., Fabris, A. van der Wielen, S., Ziramov, S., Pridmore, D., Heinson, G., Soeffky, P., 2016, Olympic Dam seismic revisited: Reprocessing of deep crustal seismic data using partially preserved amplitude processing: *ASEG Extended Abstracts 2016, 25<sup>th</sup> International Geophysical Conference and Exhibition*, p. 607–613.
- Woolrych, T.R.H., Christensen, A.N., McGill, D.L., Whiting, T., 2015, Geophysical methods used in the discovery of the Kitumba iron oxide copper gold deposit: *Interpretation*, v. 3, p. SL15–SL25.
- Wu, C., 2008, Bayan Obo controversy: Carbonatites versus iron oxide-Cu-Au(REE-U): *Resources Geology*, v. 58, p. 348–354.

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



# Références

- Xavier, R.P., Monteiro, L.V.S., de Souza Filho, C.R., Torresi, I., de Resende Carvalho, E., Dreher, A.M., Wiedenbeck, M., Trumbull, R.B., Pestilho, A.L.S., Moreto, C.P.N., 2010, The iron oxide copper-gold deposits of the Carajás mineral province, Brazil: An updated and critical review, in Porter, T.M., ed., Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective, volume 3—Advances in the understanding of IOCG deposits: Porter Geoscience Consultancy Publishing, Adelaide, p. 285–306.
- Yilmazer, E., Güleç, N., Kuşcu, I., Lentz, D.R., 2014, Geology, geochemistry, and geochronology of Fe-oxide Cu ( $\pm$ Au) mineralization associated with Şamlı pluton, western Turkey: *Ore Geology Reviews*, v. 57, p. 191–215.
- Yu, J., Chen, Y., Mao, J., Pirajno, F., Duan, C., 2011, Review of geology, alteration and origin of iron oxide-apatite deposits in the Cretaceous Ningwu basin, Lower Yangtze River Valley, eastern China: Implications for ore genesis and geodynamic setting: *Ore Geology Reviews*, v. 43, p. 170–181.
- Zeng, L.-P., Zhao, X.-F., Li, X.-C., Hu, H., McFarlane, C., 2016, In situ elemental and isotopic analysis of fluorapatite from the Taocun magnetite-apatite deposit, Eastern China: Constraints on fluid metasomatism: *American Mineralogist*, v. 101, p. 2468–2483.
- Zhao, X.-F., Zeng, L.-P., Hu, H., Li, X.-C., 2016, Iron-oxide apatite deposits in eastern China formed by accumulation of magmatic hydrosaline chloride liquids: 34<sup>th</sup> IGC abstract, Paper 2293, Cape Town
- Zhao, X.-F., Su, Z.-K., Zeng, L.-P., 2017a, Genetic models of IOCG and IOA deposits from China: Implications for ore genesis and their possible links: Proceedings of the 14<sup>th</sup> SGA Biennial Meeting, 20-23 August 2017, Québec City, p. 835–839.
- Zhao, X.-F., Zhou, M.-F., Su, Z.-K., Li, X.-C., Chen, W.-T., Li, J.-W., 2017b, Geology, geochronology, and geochemistry of the Dahongshan Fe-Cu-(Au-Ag) deposit, Southwest China: Implications for the formation of iron oxide copper-gold deposits in intracratonic rift settings: *Economic Geology*, v. 112, p. 603–628.
- Zhou, T., Fan, Y., Yuan, F., Zhang, L., Qian, B., Ma, L., Yang, X., 2013, Geology and geochronology of magnetite-apatite deposits in the Ning-Wu volcanic basin, Eastern China: *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 66, p. 90–107.
- Zhu, Z., Tan, H., Liu, Y., Li, C., 2017, Multiple episodes of mineralization revealed by Re-Os molybdenite geochronology in the Lala Fe-Cu deposit, SW China: *Mineralium Deposita*, doi.org/10.1007/s00126-017-0740-x
- Zulinski, N., Osmani, I.A., 2011, Assessment report on the 2010 exploration programs Coldstream property Burchell Lake area and Moss Township district of Thunder Bay, Northwestern Ontario, NTS Map Sheet 52B10: Foundation Resources Inc., Assessment report available at [www.sedar.com](http://www.sedar.com).



## Pour plus d'informations

Louise Corriveau – [Louise.Corriveau@canada.ca](mailto:Louise.Corriveau@canada.ca), Ressources naturelles Canada, CGC-Québec

Eric Potter – [Eric.Potter@canada.ca](mailto:Eric.Potter@canada.ca), Ressources naturelles Canada, CGC-Ottawa

Philippe Normandeau – [philippe\\_normandeau@gov.nt.ca](mailto:philippe_normandeau@gov.nt.ca), Commission géologique des T.-N.O.



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018



Ressources naturelles  
Canada

Natural Resources  
Canada

Canada





Corriveau et al.



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2018

