



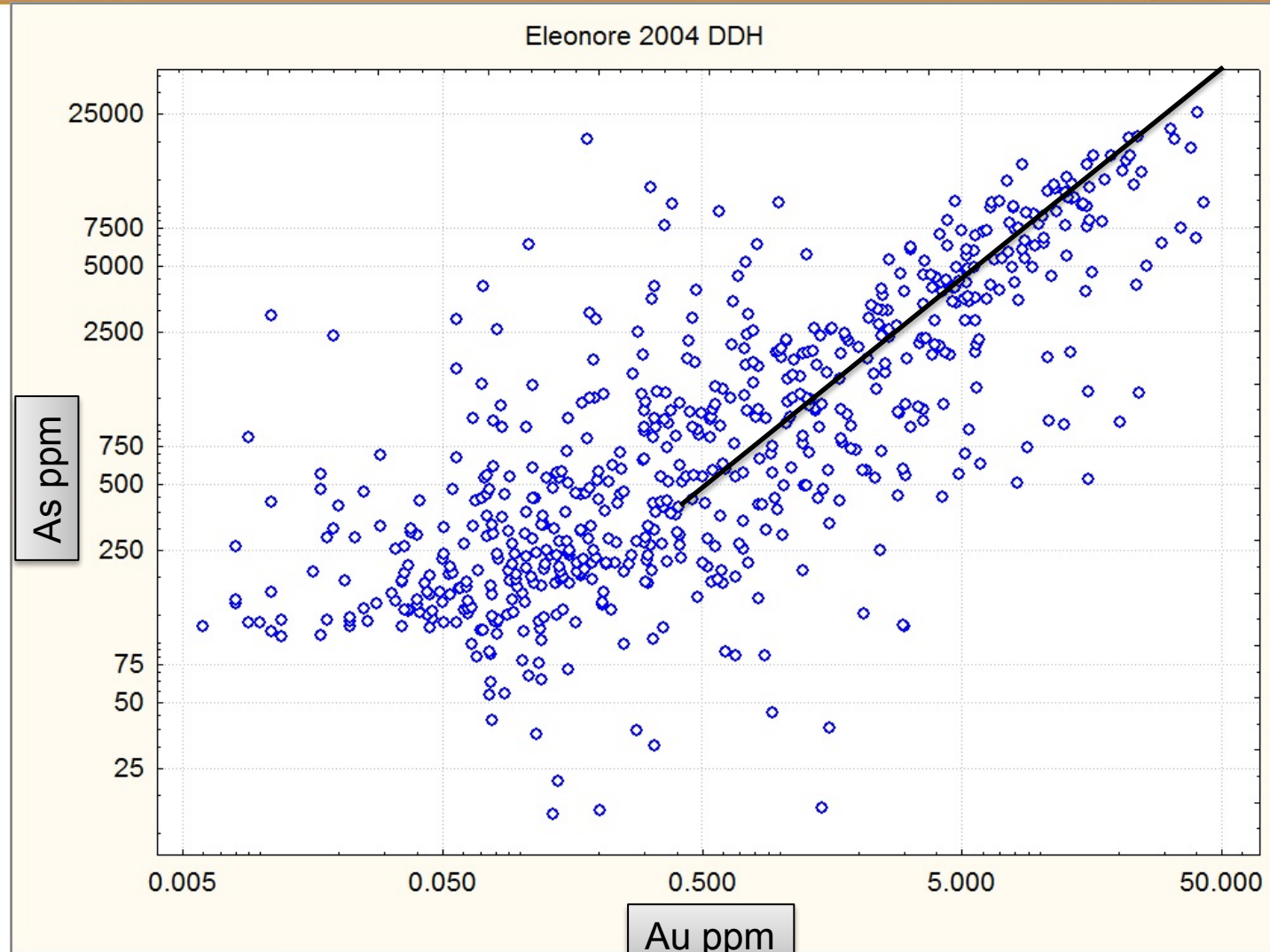
## Métamorphisme et fusion des minéraux d'arsenic : implications pour l'exploration à la Baie-James

Sylvain Trépanier Géo., M.Sc. |  
Géologue de recherche



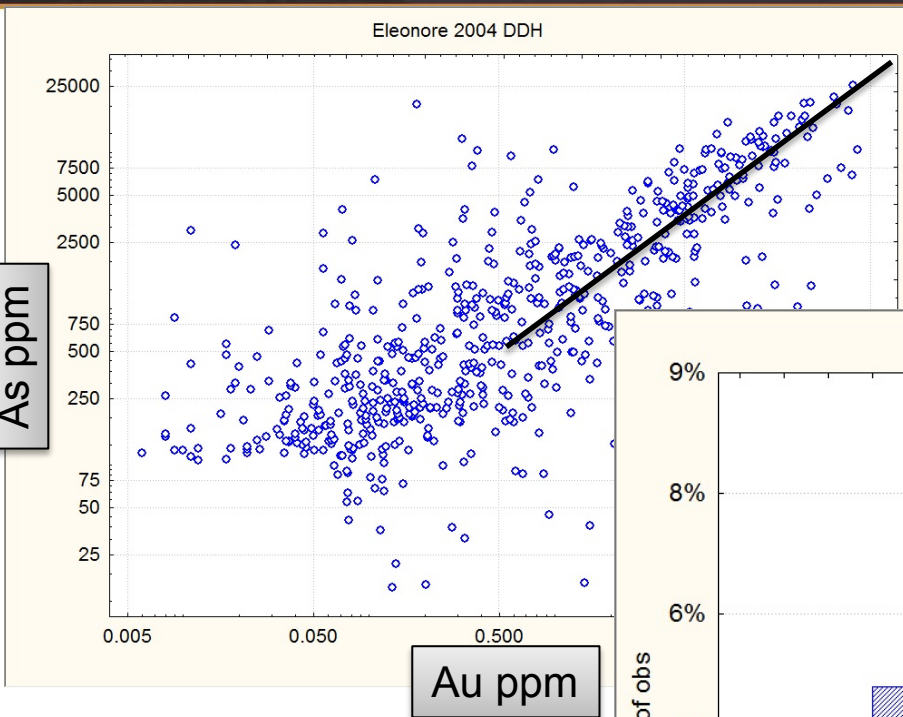
- **Cette présentation soulève beaucoup de questions, mais ne contient que peu de réponses...!**

# Eleonore Forages 2004

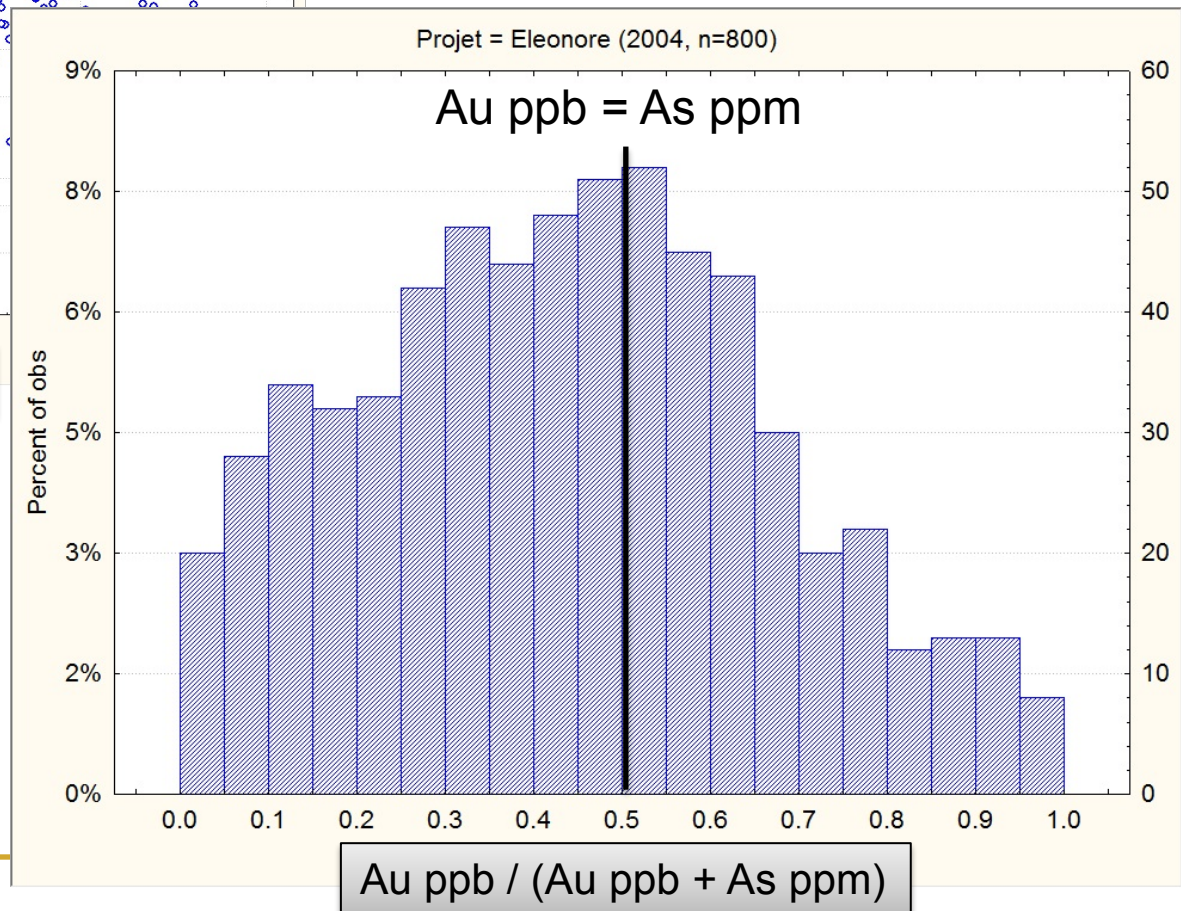


- Association Au-As presque parfaite pour teneurs Au >1 g/t Au
- 500 ppb Au = 500 ppm As
- 5000 ppb Au = 5000 ppm As

# Eleonore Forages 2004

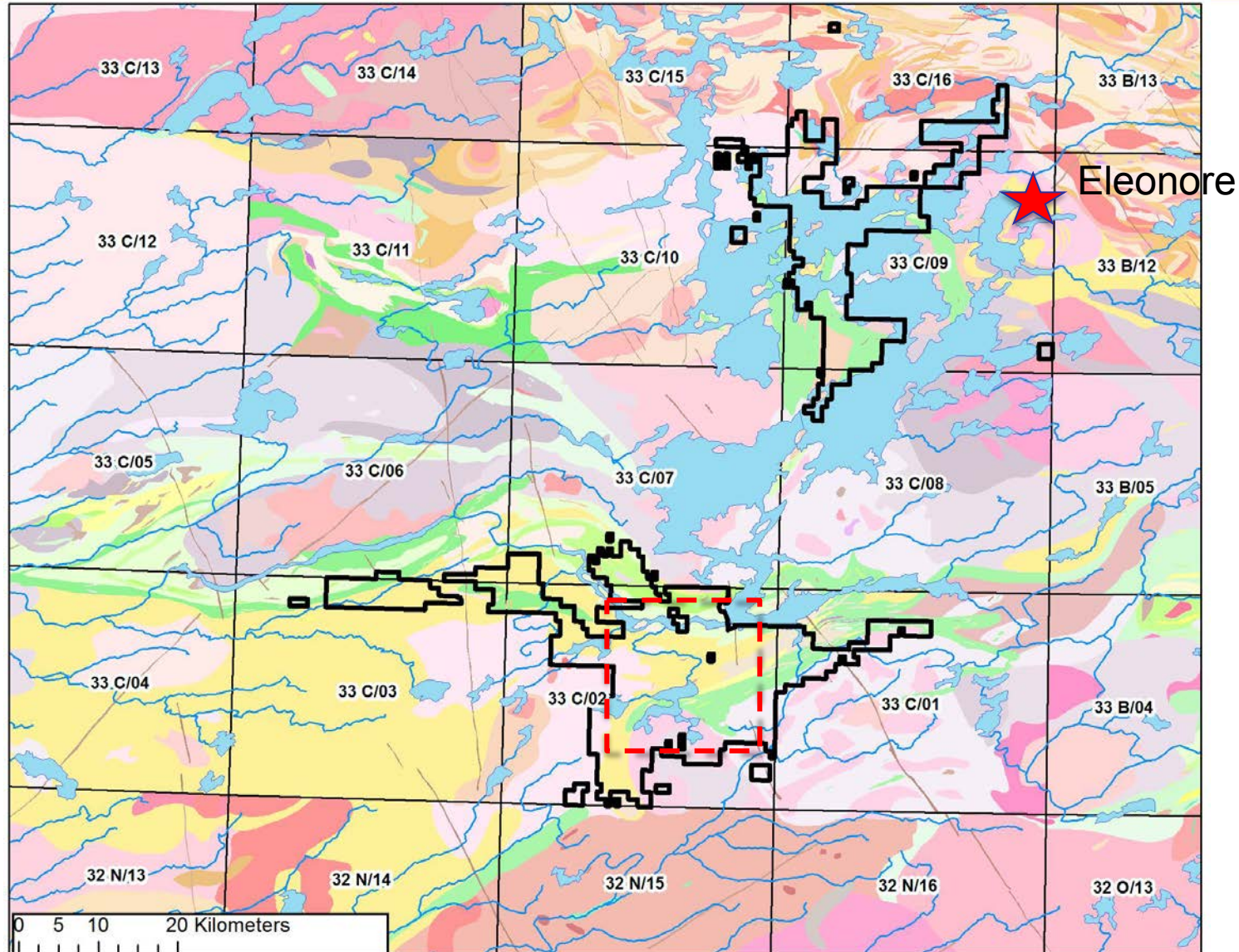


Pour Au > 30 ppb ou As > 100 ppm



- As souvent associé à Au
- Prospection
  - Arsénopyrite est facile à voir dans la roche, contrairement à Au → utile pour prospection
- Environnement secondaire
  - Au/As → comportements très différents dans l'environnement secondaire
    - Au très peu soluble en surface; As au contraire très mobile → As très utile dans sédiments de lacs, moins Au
    - As: transport hydromorphique par eaux de surface ou souterraines possible, beaucoup moins pour Au
  - Au très affecté par effet pépète dans sédiments de lacs/tills, pas As
  - As est donc à priori un “pathfinder” utile pour l’or à la Baie-James, en particulier dans les sédiments de lacs et dans une moindre mesure dans les tills
  - Baie-James: couverture complète de sédiments de lacs par le MRNF (densité entre 1 éch par 3 km<sup>2</sup> et 1 par 13 km<sup>2</sup>)

# Projet Osisko Wabamisk



# Projet Wabamisk: indices Au/As vs métamorphisme

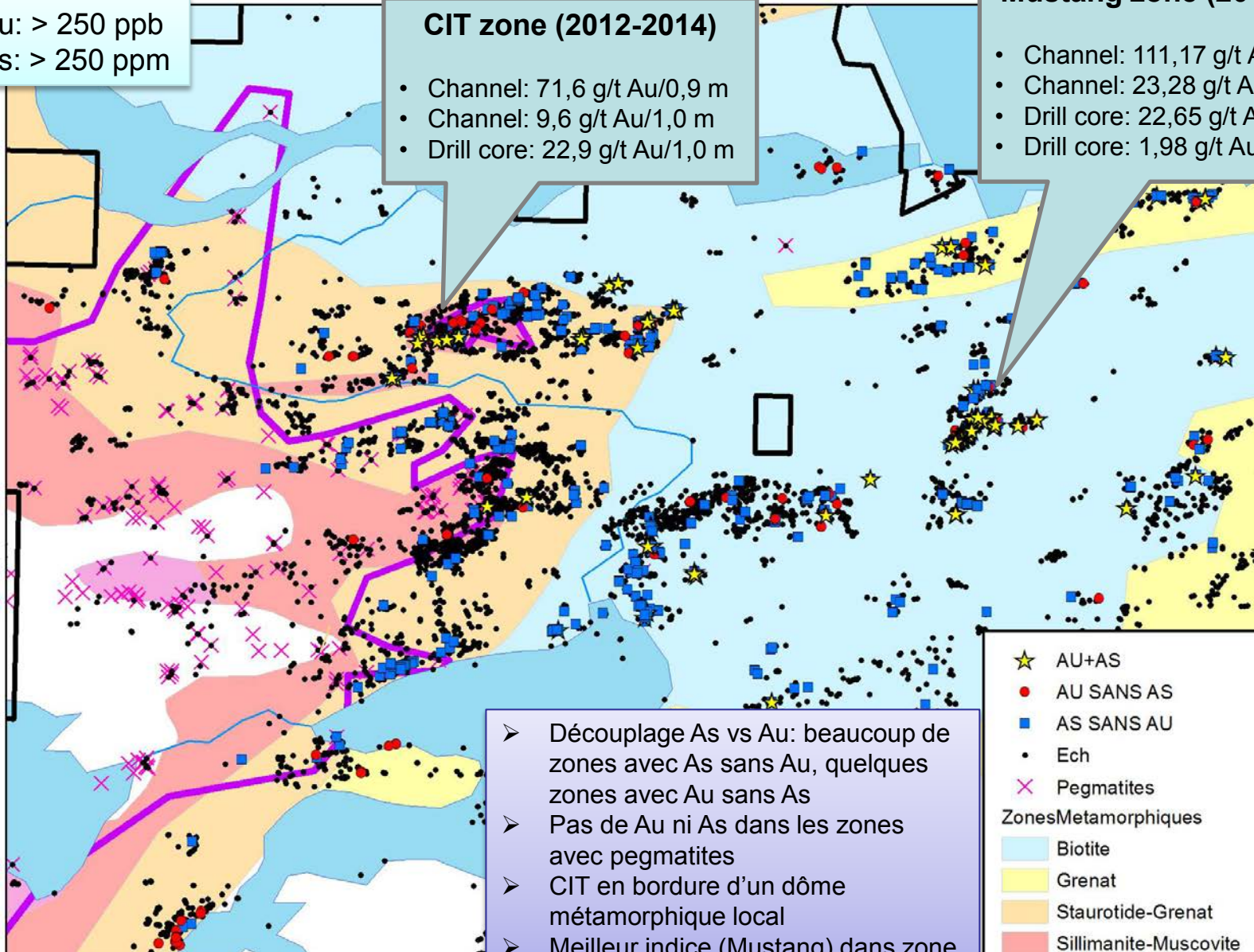
Seuil Au: > 250 ppb  
Seuil As: > 250 ppm

## CIT zone (2012-2014)

- Channel: 71,6 g/t Au/0,9 m
- Channel: 9,6 g/t Au/1,0 m
- Drill core: 22,9 g/t Au/1,0 m

## Mustang zone (2012-2014)

- Channel: 111,17 g/t Au/2,6 m
- Channel: 23,28 g/t Au /4,6 m
- Drill core: 22,65 g/t Au/2,25 m
- Drill core: 1,98 g/t Au/2.0m



- Découplage As vs Au: beaucoup de zones avec As sans Au, quelques zones avec Au sans As
- Pas de Au ni As dans les zones avec pegmatites
- CIT en bordure d'un dôme métamorphique local
- Meilleur indice (Mustang) dans zone de plus bas métamorphisme

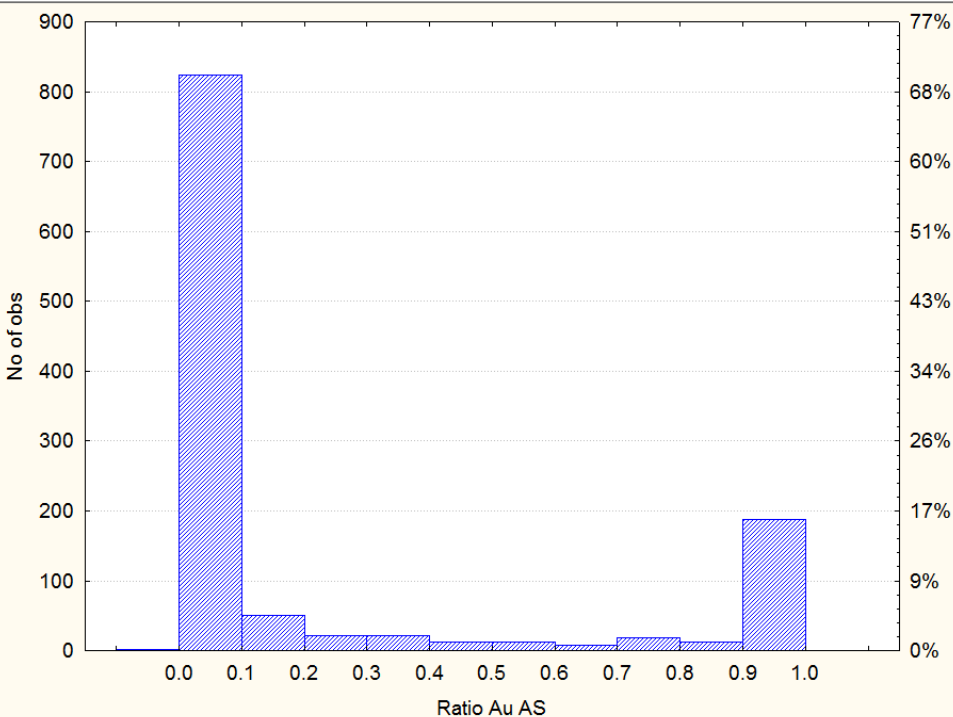
- ★ AU+AS
  - AU SANS AS
  - AS SANS AU
  - Ech
  - × Pegmatites
- ZonesMetamorphiques
- Biotite
  - Grenat
  - Staurotite-Grenat
  - Sillimanite-Muscovite
  - Sillimanite

0 1 2 4 Kilometers

# Wabamisk: échantillons choisis

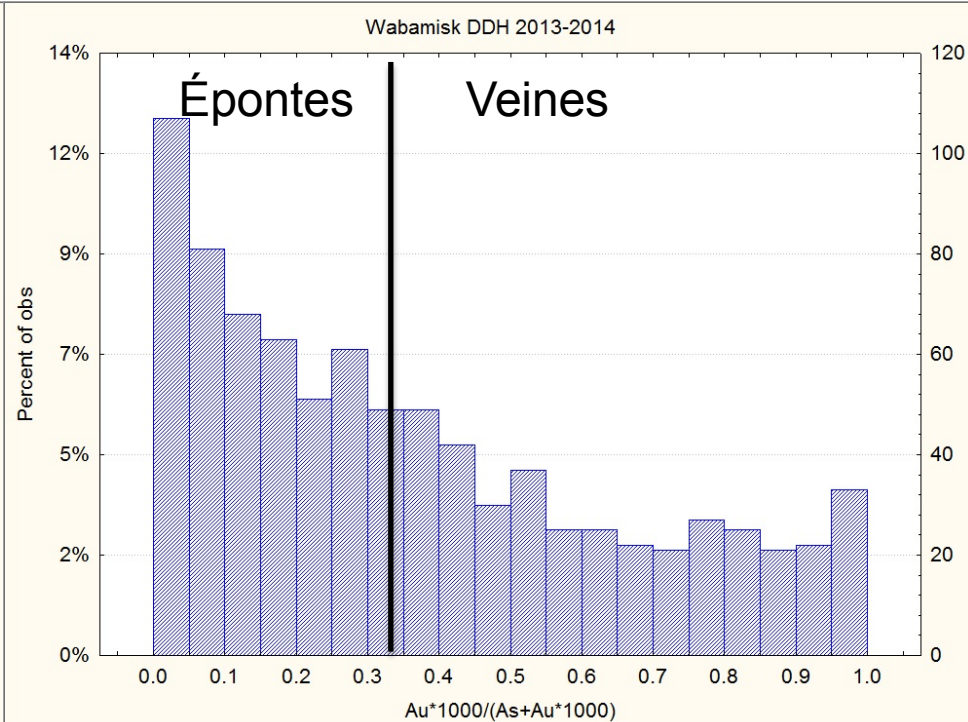
Au > 250 ppb OU  
As > 250 ppm

Wabamisk – Prospection Total



$Au \text{ ppb} / (Au \text{ ppb} + As \text{ ppm})$

Wabamisk – Forages Mustang



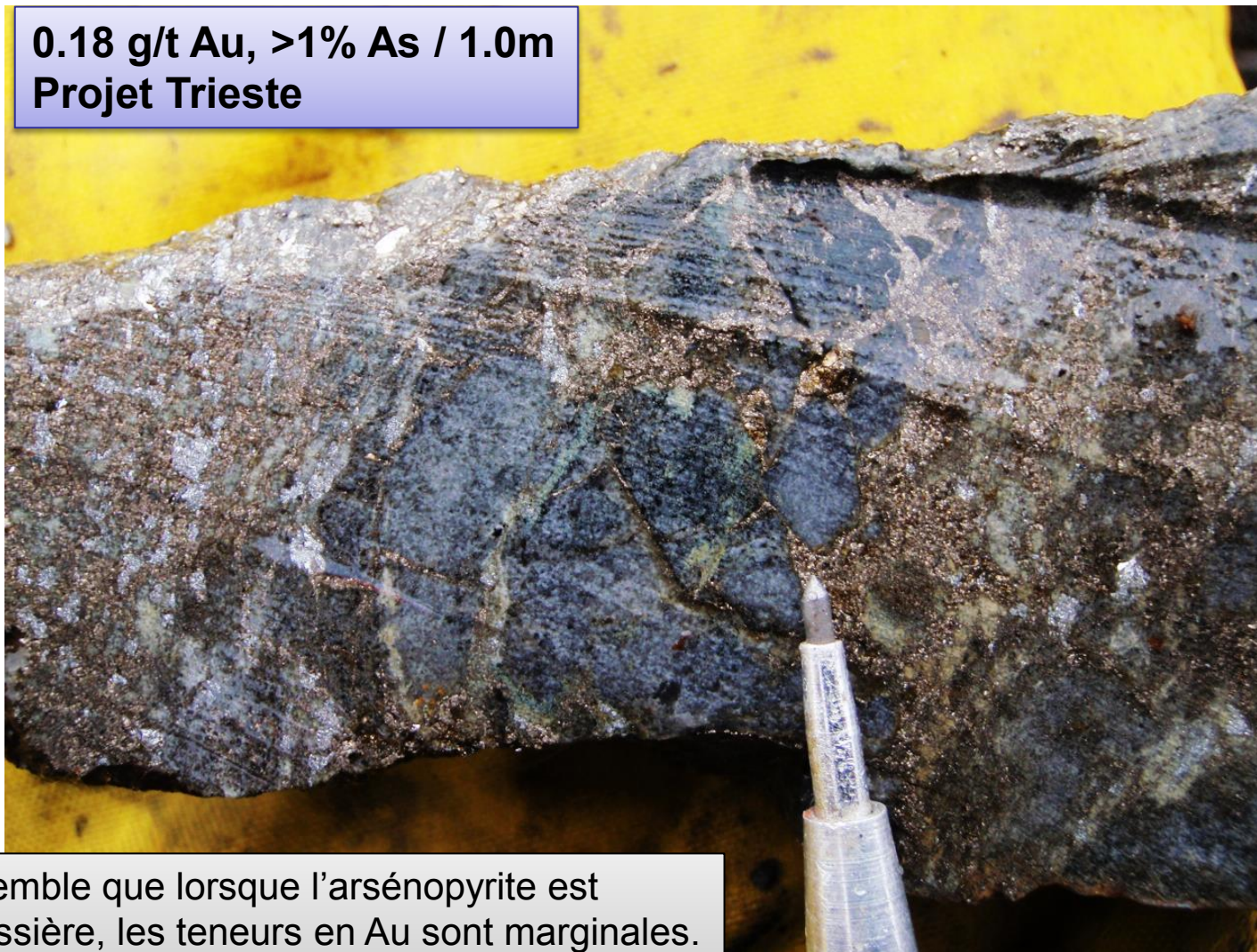
$Au \text{ ppb} / (Au \text{ ppb} + As \text{ ppm})$

- Beaucoup de mx As sans Au
- Plus d'or dans veines et plus d'As dans épontes à Mustang → découplage As-Au local



# As mineralization with low Au

0.18 g/t Au, >1% As / 1.0m  
Projet Trieste

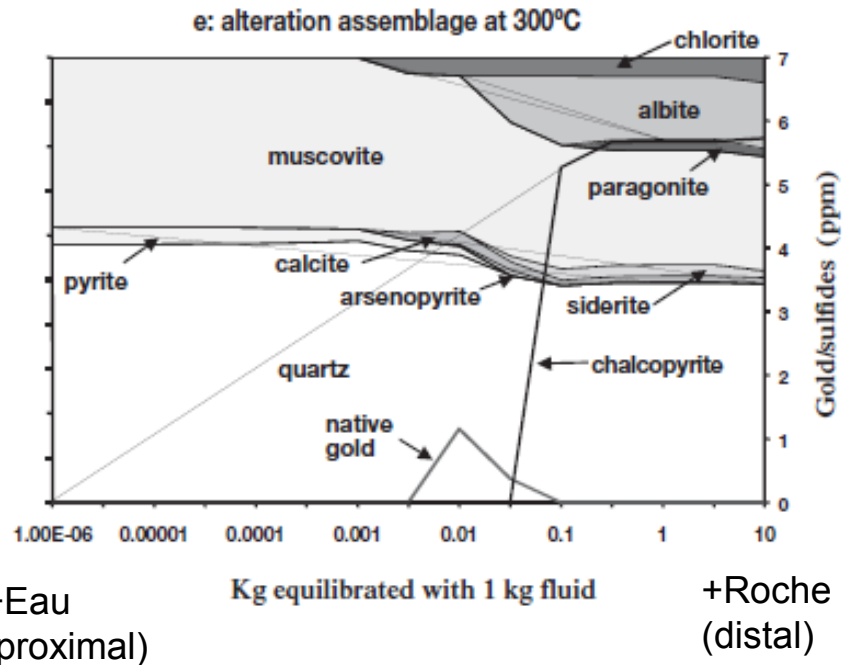
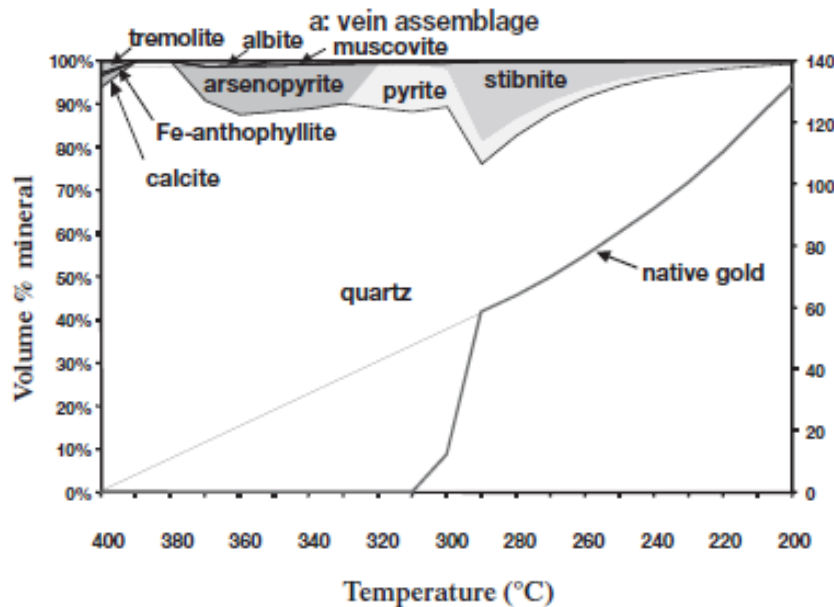


- Il semble que lorsque l'arsénopyrite est grossière, les teneurs en Au sont marginales. A l'inverse, une arsénopyrite fine donne souvent de meilleures teneurs en Au..?

- **Comment interpréter les zones de minéralisation avec As sans Au?**
  1. Seul As a précipité initialement, sans Au? (fluide initial de plus haute température?)
  2. La minéralisation est zonée, avec un centre en Au et halos en As (ex: zone Mustang) → on tombe plus souvent sur le halo?
  3. **Au était présent au départ (pré-) mais a été évacué de la roche durant le métamorphisme alors que As est resté?**
- Il semble que lorsque l'arsénopyrite est grossière, les teneurs en Au sont marginales. A l'inverse, une arsénopyrite fine donne souvent de meilleures teneurs en Au (observation empirique des nos géologues de la Baie-James)
- Cette observation empirique suggère que le métamorphisme pourrait avoir joué un rôle dans l'absence d'or avec plusieurs minéralisations en As... comment?

# Précipitation Au-As-Sb dans turbidites

## Run 1: CO<sub>2</sub>-rich fluid, phase separation



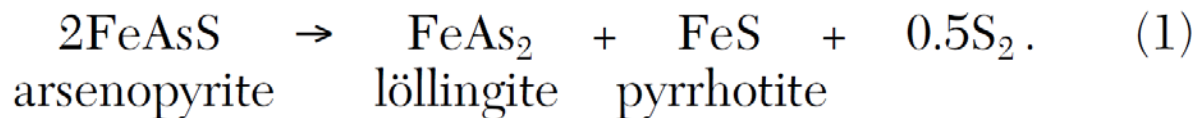
- Modélisation géochimique avec logiciel
- Roche hôte turbidite
- Fluide riche en CO<sub>2</sub>
  - Max Au avec Sb at < 300 C
  - As à > 320C
  - Dissociation As-Au pour T, un peu pour eau/roche (Au à rapport eau/roche un peu plus haut que As)

(Rapport eau/roche)  
Altération prox à séricite-pyrite, distal à chl-albite

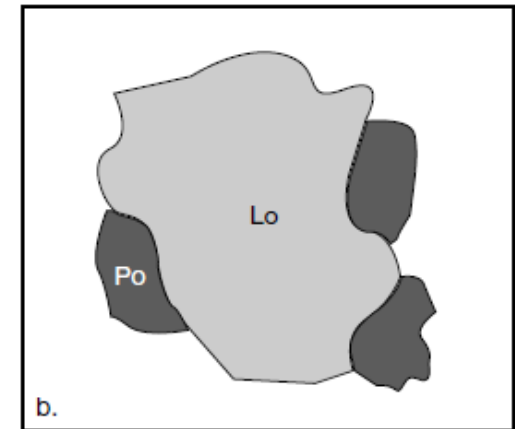
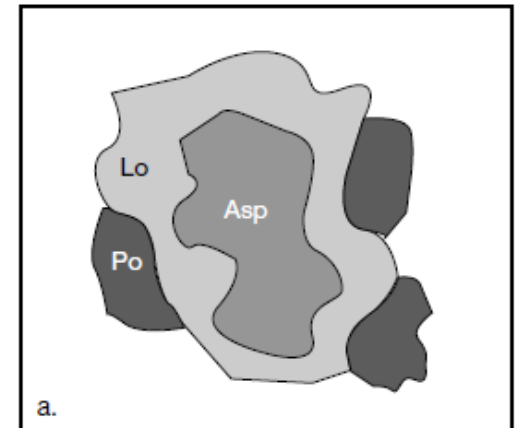
- Supposons Asp (arsénopyrite) aurifère au départ (Au “invisible» dans Asp), formé schiste vert – amphibolite inférieure

1. Avec augmentation température, Au expulsé de Asp → or natif en exsolution dans Asp

2. Puis, si température augmente encore (a), Asp → Lo (Lollingite)  
Au est absorbé dans Lo comme Au “invisible” →



Transformation prograde de l'arsénopyrite en löllingite

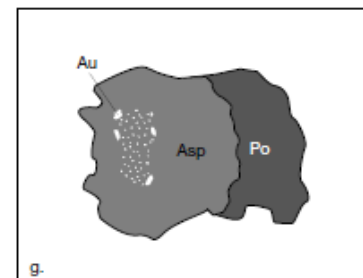
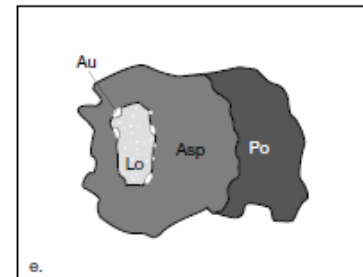
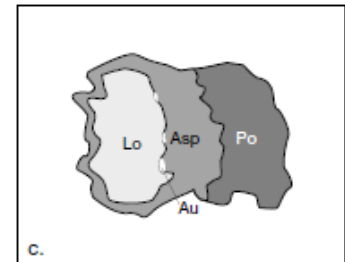
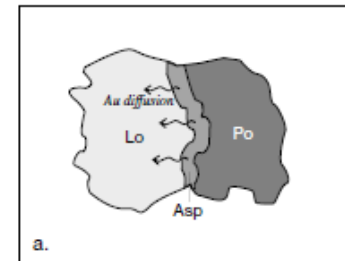
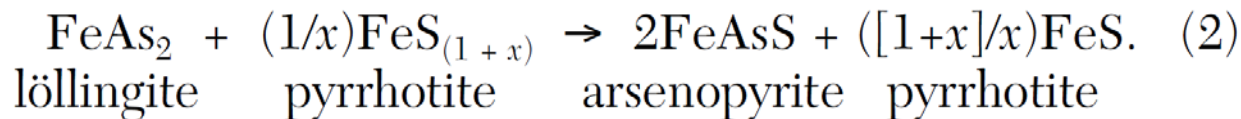


# Redistribution Au dans Asp-Lo durant le métamorphisme régional

Retransformation rétrograde  
löllingite → arsenopyrite

3. Si métamorphisme rétrograde → Réaction progressive  
 $Lo + Po \rightarrow Asp + Po$

- Au se concentre initialement vers Lo
- Puis Au exsolvé des grains Lo
- Finalement laisse deux Asp (une riche en grains Au exsolvés) et une pauvre en Au



- Utile pour comprendre le timing de mise en place de l'or
- Mais à l'échelle de l'échantillon, l'association Au-As reste → (peut-être problèmes de récupération si Au est invisible dans Lo....)

Outre ces processus métamorphiques de changements Asp – Lo – Po à l'état solide, on sait maintenant que l'arsénopyrite peut fondre à partir du faciès amphibolite moyen, sous certaines conditions

*The Canadian Mineralogist*  
Vol. 44, pp. 1045-1062 (2006)

## ARSENOPYRITE MELTING DURING METAMORPHISM OF SULFIDE ORE DEPOSITS

ANDREW G. TOMKINS<sup>§</sup>

*Department of Geology and Geophysics, University of Calgary, Calgary, Alberta T2N 1N4, Canada*

B. RONALD FROST

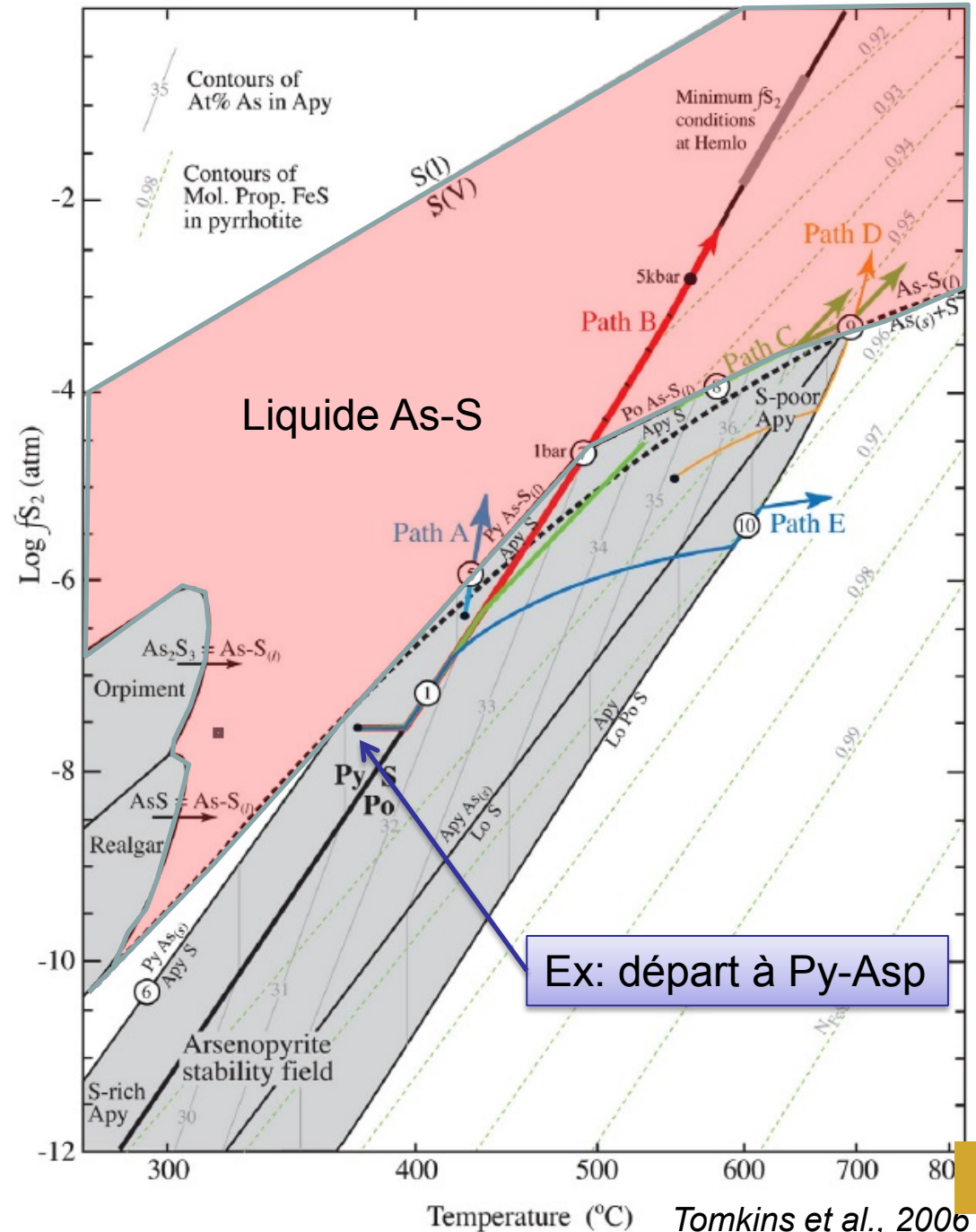
*Department of Geology and Geophysics, University of Wyoming, Laramie, Wyoming 82071, USA*

DAVID R.M. PATTISON

*Department of Geology and Geophysics, University of Calgary, Calgary, Alberta T2N 1N4, Canada*

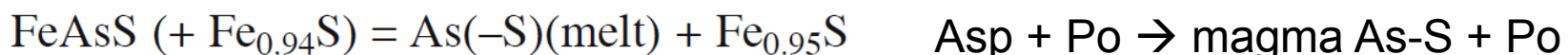
- Fusion arsénopyrite (stable zone bleu-gris) dépend de température (X) et de fugacité du soufre (Y) durant le métamorphisme (zone de fusion en rouge sur la figure de droite)
- **Fusion favorisée si  $f(S_2)$  élevée**
- Parcours sur le graphique dépend de la quantité et types minéraux de Fe, As, S (sulfures, oxydes, silicates) présents initialement dans la roche

1. Asp disparaît selon  $Asp \rightarrow Po + Lo$ , pas de fusion (path E)
2. Asp fusionne. Plusieurs possibilités, mais commence typiquement à partir de 520°C à une pression 5 kbar (amphibolite moyen)  $\rightarrow$  atteint à beaucoup d'endroits à la Baie-James



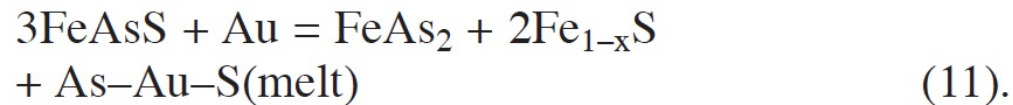


- Fusion favorisée si conditions de fugacité du soufre élevée durant le métamorphisme
- Soufre peut être formé par transformation Py en Po à partir de ~ 400C
- Mais le soufre formé peut réagir avec oxides/silicates de fer de la roche pour former de la pyrrhotite (sulfurisation des silicates) → alors fugacité du soufre n'augmente plus → la fusion de l'arsénopyrite est alors moins probable → si peu de soufre dans la roche (ex: minéralisation non-massive)
- En présence de sulfures de Fer, plus la roche hôte est riche en silicates/oxydes de fer, moins la probabilité de fusion de l'arsénopyrite est grande
  - Fusion peu probable dans formations de fer, amphibolites, shales → alors on a la réaction solide
    - Asp → Po + Lo
  - Plus probable dans granitoides, grès quartzitiques (roches + pauvres en oxydes-silicates de Fe)



- La fusion de l'arsénopyrite entraîne l'or dans le magma..! (note: fusion or 1038 C)

Clark (1960a) found that where gold and arsenopyrite occur together, an Au–As–S melt forms by a modification of reaction (9):



Reaction (11) occurs at slightly lower temperatures than reaction (9). The  $f(\text{S}_2)$  stability limits of this reaction are unknown. Given that Roland (1968) found 2 vol.% gold in Pb–As–S melt at 549°C, it is probable that some or all of the other arsenopyrite melting reactions are capable of incorporating gold in the melt if it is present.

**Fusion forme un magma As-Au-S. Laisse derrière un résidu de ±Lo±Po!!**


**0% de Au reste dans le solide**

**66% de As reste dans le solide**

**66% de S reste dans le solide**

**Résidu appauvri en Au, mais pas trop en As et S**

**Tableau 3: Répartition des minéralisations aurifères du Moyen et Grand-Nord du Québec selon le métamorphisme et la présence de formations de fer associées.**

Secteur	Sans formation de fer	Avec formation de fer	Total	% avec formation de fer	Métamorphisme des roches supracrustales	 <p>--% Formation de fer ++ - Métamorphisme ++</p>
Eastmain	76	14	90	15%	Schiste vert à amphibolite moyen	
La Grande	108	40	148	27%	Schiste vert supérieur à amphibolite moyen	
Grand Nord	24	25	49	48%	Amphibolite moyen à supérieur	
Ashuanipi	11	38	49	78%	Granulite	

- Artéfact de la méthode d'exploration Virginia?
- Est-ce que les formations de fer sont les seules lithologies à pouvoir retenir l'or pré-métamorphique dans les roches de haut grade métamorphique (amp-moyen et plus) et que les autres lithologies l'ont perdu?

**L'or dans les roches de haut grade métamorphique**

PROJET 2003-2A

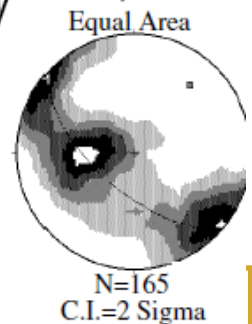
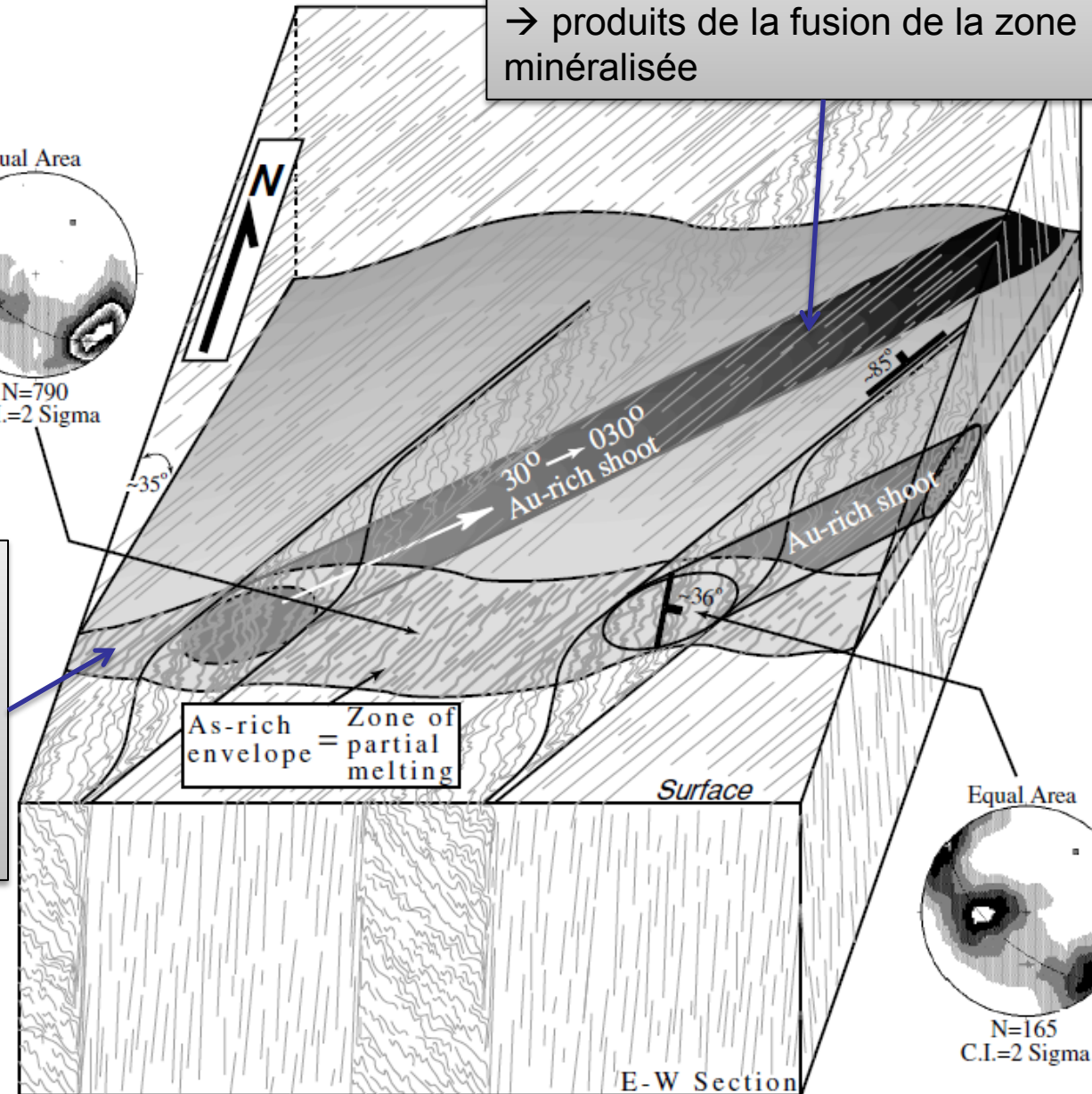
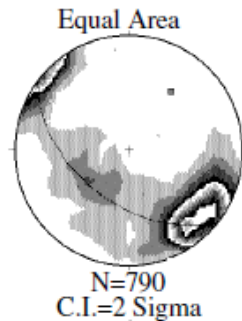
# Challenger, Australie

Au-shoots: 8 g/t Au

NE-SW

Leucosomes dans charnières de plis  
→ produits de la fusion de la zone minéralisée

Produit  
~800 000  
Oz Au



As-rich envelope:  
>200 ppm As,  
0.1 – 1.0 g/t Au  
E-W  
Résidu de fusion partielle →  
zone minéralisée initiale  
Maintenant subéconomique

- Pour que le magma Au-As-S se sépare de la roche initiale, il faut avoir mobilisation du magma Au-As
- Peut se produire si la roche encaissante silicatée est elle-même migmatisée → ex: gisement de Challenger en Australie
  - Le magma Au-As-S a été emporté dans les leucosomes silicatés, qui ont migré vers des charnières de plis
  - Les pegmatites Au-As rencontrées à la Baie-James pourraient être des produits de fusion de l'arsénopyrite entraînés par des pegmatites
- Peut aussi se produire aussi durant la déformation → fractures, schistosité, charnières de plis....

- La fusion laisse derrière une roche à  $\pm$ Po  $\pm$ Lo, appauvrie en Au, et dans une moindre mesure en As-S
- La lollingite pourrait ensuite être rétrogradée en arsénopyrite durant le métamorphisme rétrograde
- Une roche ayant subi une telle fusion risque d'être passablement recristallisée par la haute température atteinte
  - Pourrait expliquer l'association empirique entre la granulométrie de l'arsénopyrite-lollingite et la présence de teneurs en or → les roches à Asp grenue ont été très chauffées et ont perdu leur or durant une fusion partielle

Un microscope électronique à balayage (MEB) a été utilisé pour étudier les relations texturales des minéraux sulfurés qui sont autrement difficiles à documenter avec un microscope pétrographique. L'étude a été réalisée sur des échantillons du stockwerk Roberto, de la zone Roberto-Est, d'une veine de quartz aurifère contenant du diopside, d'un paragneiss aurifère, d'une zone de sulfures massifs contenue dans un dyke de pegmatite, de dykes de pegmatite, et d'un dyke d'aplite. Les résultats indiquent que tous les échantillons qui contiennent de l'arsénopyrite contiennent aussi de la löllingite, et que les cristaux de löllingite sont séparés de la pyrrhotite par l'arsénopyrite et ne touchent pas la pyrrhotite (Figure 3.5.75). Cette texture suggère que la löllingite fut rétrogradée en pyrrhotite et arsénopyrite. La löllingite et l'arsénopyrite sont présentes au sein d'un porphyroblaste de diopside (3.5.75b), ce qui suggère que les sulfures ont subi l'épisode de métamorphisme prograde qui a conduit à la formation du porphyroblaste de diopside. Ces observations suggèrent que les cristaux d'arsénopyrite se sont formés avant ou près du pic métamorphique. Dans certains échantillons, de l'or visible est présent aux joints de grains löllingite-arsénopyrite et/ou sous forme d'inclusions visibles dans l'arsénopyrite (Figure 3.5.76). Ces relations texturales indiquent que l'or fut initialement contenu à l'intérieur des cristaux de löllingite et que la minéralisation aurifère est par conséquent antérieure à la phase de métamorphisme rétrograde. Nous ne pouvons toutefois pas déterminer si la minéralisation aurifère s'est mise en place avant le pic métamorphique en association avec l'arsénopyrite, ou si elle a été introduite près du pic métamorphique durant le métamorphisme prograde de l'arsénopyrite en löllingite.

Transformation As → Lo → As mais pas d'évidences de fusion.. Sauf pegmatites!

- Métamorphisme 600C mais pas d'évidence de fusion de la roche hôte de la minéralisation

- Mais... la présence de pegmatites aurifères avec bordures à Tm-As indiquent que de la minéralisation aurifère a fondu à quelque part, comme à Challenger

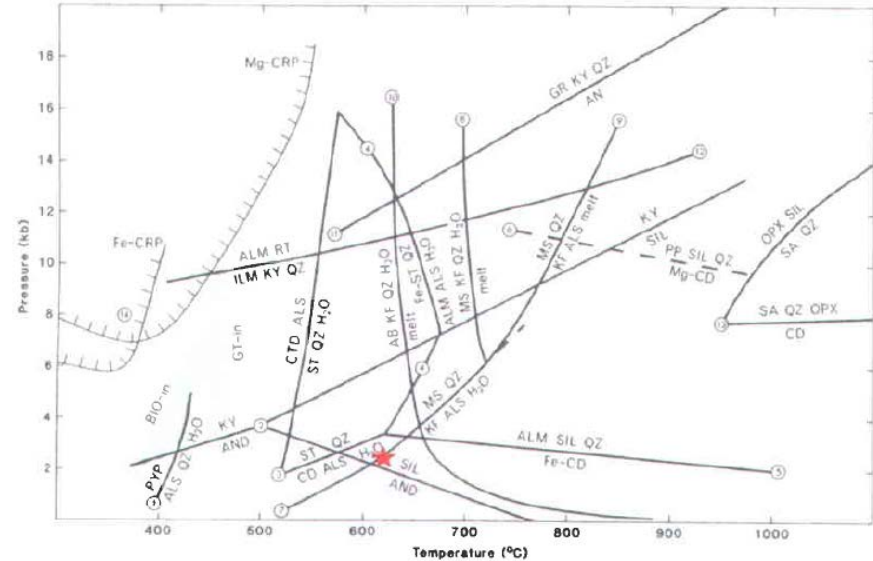


Figure 3.4.5: Petrogenetic grid for pelitic metasedimentary rocks from (Yardley, 1989). The red star indicates the minimum P-T conditions required for the formation of sillimanite through the breakdown of muscovite. The use of the pelitic grid is appropriate in this context since the average composition of aluminosilicate-bearing rocks resembles average compositions of metamorphosed pelitic schists (Table 3.2.3).

For reaction (1) to occur in the sillimanite stability field, pressure must be greater than 2 kb and temperature must be greater than 600°C (Figure 3.4.5). Moreover, since no evidence of melting was found in all inspected thin sections, reaction (1) must have occurred at pressures below 6 kb (Figure 3.4.5). Note also that the shape of the fibrolite porphyroblasts suggests that

The presence of muscovite, garnet, and tourmaline are indicative of the peraluminous nature that characterizes the lithium-cesium-tantalum (LCT) pegmatite family (London, 2008). The pegmatite dykes locally host gold mineralization, and are sometimes surrounded by tourmaline-arsenopyrite-rich selvages in the country rocks. The mineralized characteristics of pegmatite dykes are described in details in section 3.5 (*Alteration and mineralization*).



## Relative stabilities of sulphides & arsenide minerals in oxidized till

### Stable

Molybdenite

Cinnabar

Sperrylite

Loellingite

### Unstable

Pyrrhotite

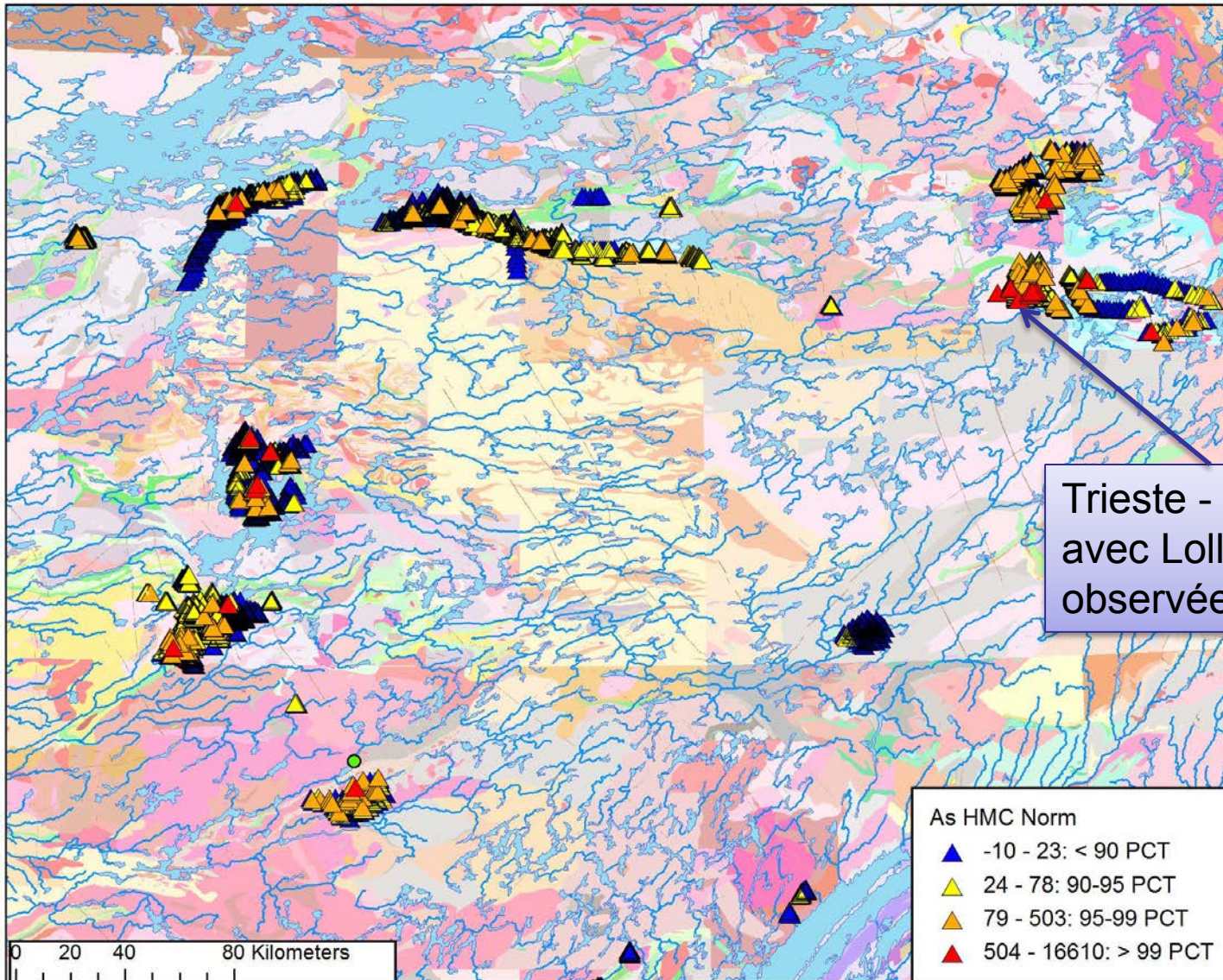
Pyrite

Pentlandite

Arsenopyrite

- Lorsque les tills sont prélevés près de la surface (ex: à la pelle), l'arsénopyrite est détruite, mais la loellingite survit.
- Si on analyse un concentré de mx lourds d'un till avec arsénopyrite, pas d'anomalies car As détruit
- Anomalie présente si le till contient de la lollingite

# As dans les concentré de mx lourds des tills - Compilation



- Une possibilité: zones de résidus de fusion partielle de l'arsénopyrite
- Critères pour reconnaître les secteurs ayant subi fusion de minéralisation Au-As
  1. **Zones de migmatites/restites silicatées anormales en Au-As, particulièrement si les roches adjacentes ne sont pas migmatisées (fusion préférentielle des roches altérées)**
  2. **Présence de pegmatites/leucosomes à Au-As**
  3. (Présence de lollingite → ex: les tills As\_HMC)
  4. (Métamorphisme des altérations → ex: altérations calco-silicatées → altérations à carbonates métamorphisées)
  5. (Granulométrie grossière de l'arsénopyrite/lollingite)
- Si on pense que ces critères puissent être rencontrés, les travaux pourraient se poursuivre autour des zones en As appauvries en Au pour tenter de trouver l'or, comme à Challenger
- Mais vers où et sur quelle distance le magma As-Au a-t-il migré?



Or visible, projet Wabamisk