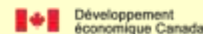
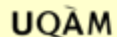
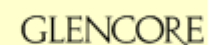
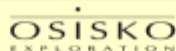


Projet 2012-08

Opportunité pour les sulfures massifs volcanogènes riches en Ag

11 novembre 2013, Québec

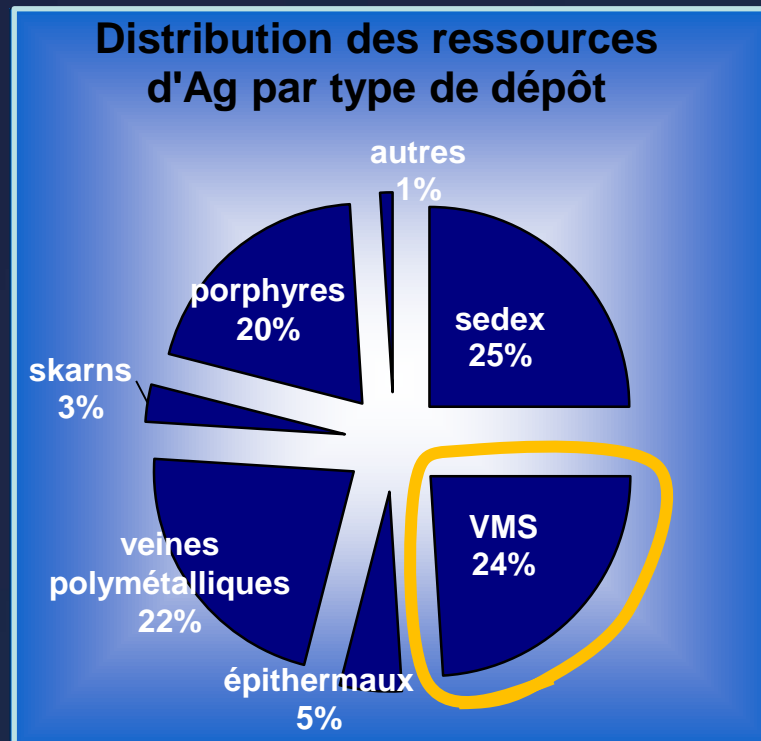
Lucie Mathieu, Ph.D.



Origine du projet

- À l'origine du projet...

- Certains VMS concentrent les métaux précieux, comme l'Au et l'Ag.
- La présence d'Ag dans un VMS est un avantage car l'Ag a une **valeur élevée**; et les **gisements polymétalliques** ont une sensibilité moindre aux variations du marché.



D'après Bizet
(2002)

Sommaire

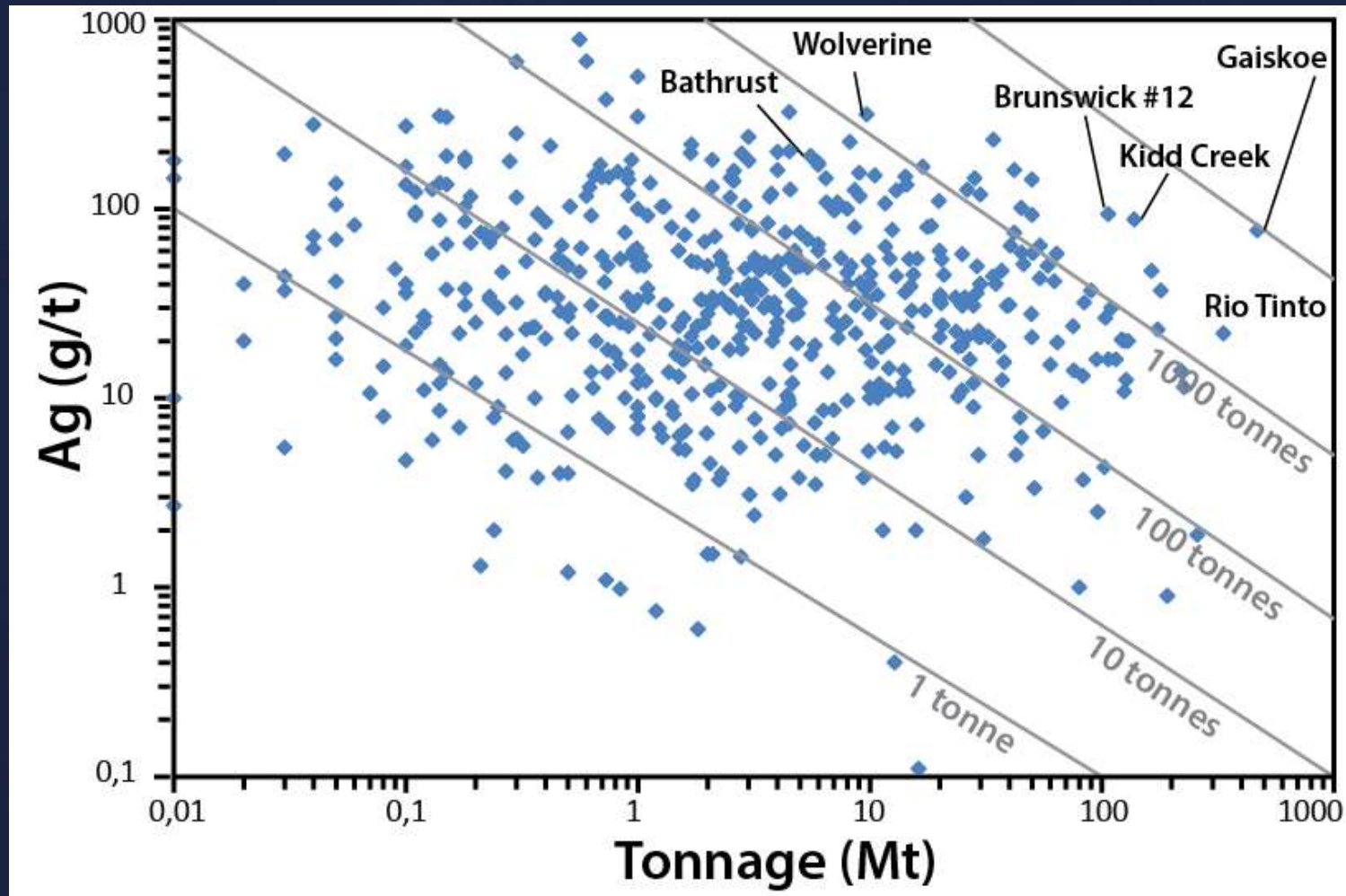
1. Introduction
2. Phases minérales
3. Lithologie et composition des roches encaissantes
4. Conclusions

1. Introduction

- **VMS – Sulfures Massifs Volcanogènes**
- **Quelques mots clés:** systèmes hydrothermaux, formation en surface ou à faible profondeur, circulation d'eau de mer, lien spatial-temporel-génétique avec l'activité volcanique.
 - **Zn, Pb:** observés dans la partie de faible T°C des VMS
 - **Cu:** observé dans les systèmes de haute T°C ($T > 300^{\circ}\text{C}$)
 - **Au:** ébullition? Apporté après la formation du VMS?
 - **Ag:** souvent associé à la zone Zn-Pb des VMS, ou observé en périphérie des VMS – pourquoi?
- **But du projet:**
 - Documenter les paramètres conduisant à la formation d'Ag-VMS.
 - Proposer des guides d'exploration pour le pôle Ag.

1. Introduction

- VMS argentifères: > 100-200 g/t d'Ag et/ou tonnage très élevé.



D'après les données de l'USGS (Morisset et al. 2009) (n= 542 VMS)

1. Introduction

- Description d'un système VMS

Eau de mer

Plancher océanique

Faille ou autre structure

Horizon perméable

Roches à dominance volcanique

1. Introduction

• Description d'un système VMS

Déstabilisation des complexes qui maintiennent les métaux en solution

Formation des minéraux de type sulfure

Plancher océanique

Faille ou autre structure

Et ensuite: érosion; métamorphisme et déformation

Horizon perméable

Roches corrodées (libération des métaux)

HALO D'ALTÉRATION

Circulation hydrothermale

Roches à dominance volcanique

Contribution métallique par le fluide magmatique



Moteur thermique (intrusion ou autre)

1. Introduction

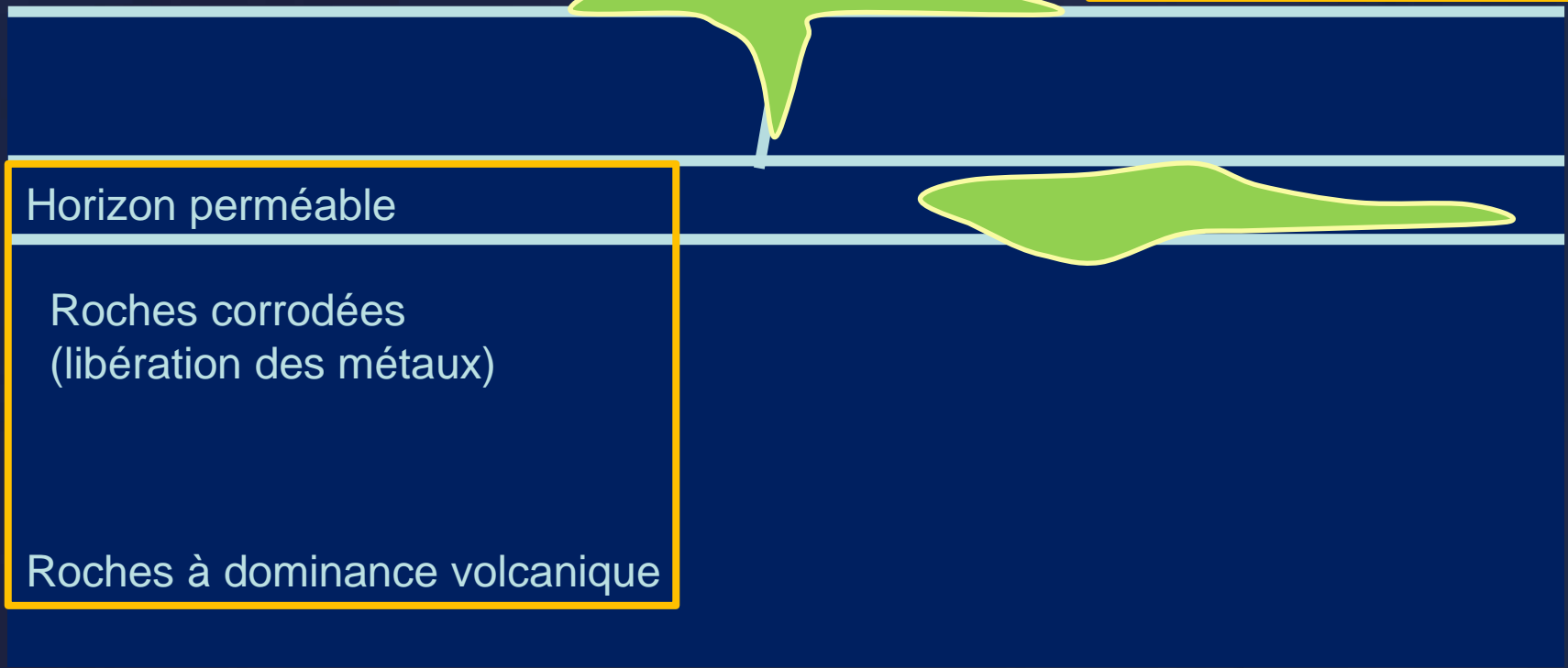
- **Le projet va porter sur...**

1. Fluide hydrothermal (cf. rapport 2012-08)
2. Minéraux qui fixent l'Ag
3. Lithologie et composition chimique de l'encaissant

1 Déstabilisation des complexes qui maintiennent les métaux en solution

2 Formation des minéraux de type sulfure

3 Horizon perméable
Roches corrodées (libération des métaux)
Roches à dominance volcanique



Sommaire

1. Introduction
2. Phases minérales
3. Lithologie et composition des roches encaissantes
4. Conclusions

2. Phases minérales

- **Galène**, miargyrite, matildite
- **Fahlore** (tétraédrite, tennantite, freibergite) – « Cuivre gris »
- **Chalcopyrite**

Sphalérite, Ag-Sb
sulfosels, tellures,
Ag-natif, électrum, ...



Source des photographies: webmineral.com

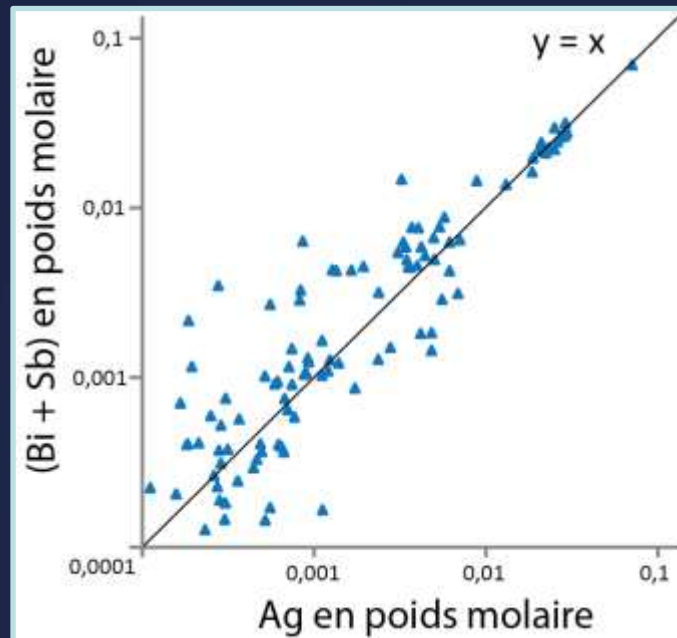
2. Phases minérales

2.1. Galène

- Galène – miargyrite – matildite (solutions solides)



- Cristallise à haute T°C, et l'Ag-galène est instable à faible T°C.
- Substitution couplée: $\text{Ag} + \text{Sb}$ ou $\text{Ag} + \text{Bi} \leftrightarrow 2 \text{Pb}$ (cf. $\text{Ag}/(\text{Bi} + \text{Sb}) \leq 1$)
- Ag/Pb: peut augmenter si T°C augmente.

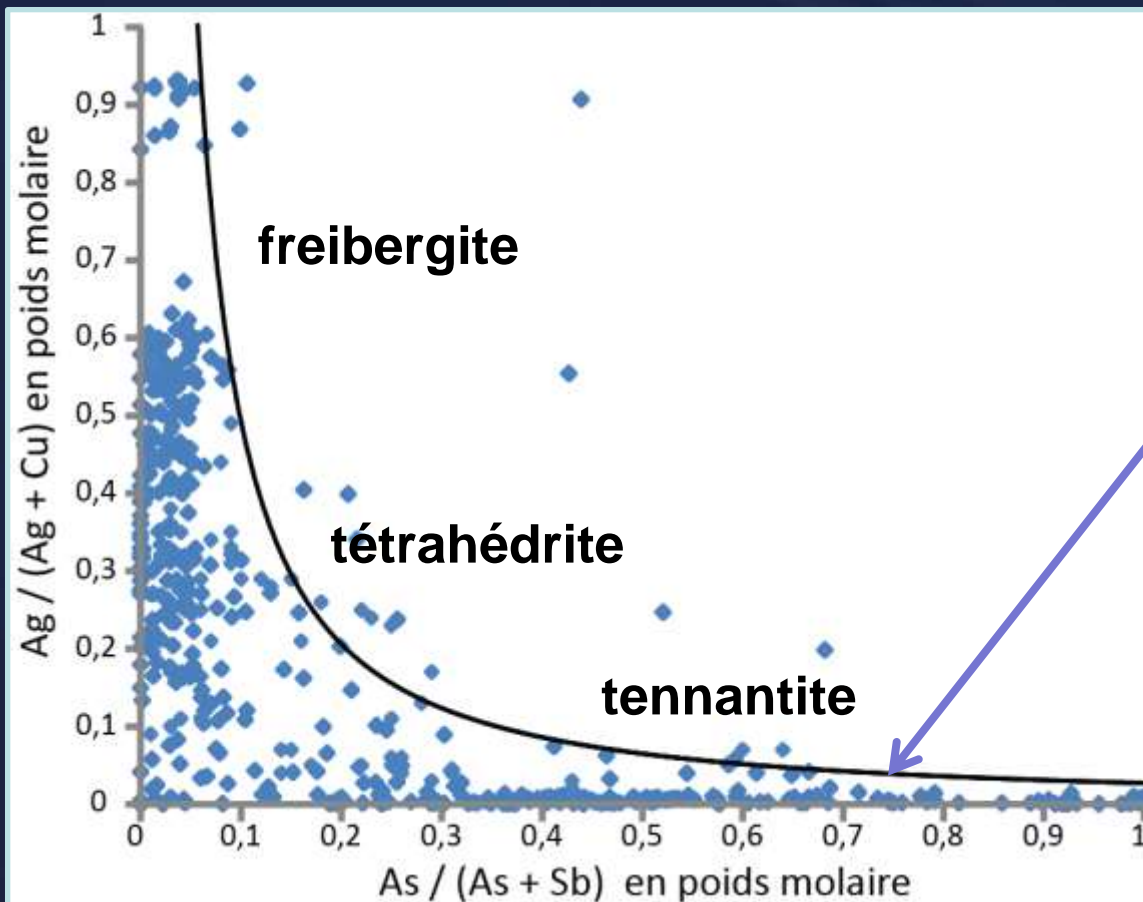
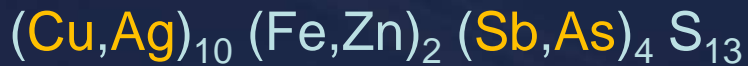


Compilation de données
de la littérature

2. Phases minérales

2.2. Fahlore – « Cuivre gris »

•Fahlore (groupe): Tétrahédrite – Tennantite



$$y = 0,0272 x^{-1,258}$$

avec:

$$x = \text{As}/(\text{As}+\text{Sb})$$

$$y = \text{Ag}/(\text{Ag}+\text{Cu})$$

Compilation de données de la littérature

2. Phases minérales

2.3. Fahlore et galène, calcul normatif

- **Principaux hôtes de l'Ag** : galène, fahlore, (CPY; cf. rapport 2012-08)
- **Calcul normatif** : pour fahlore et galène seulement
- Utilisation de Matlab. Les points forts du code sont:



```
disp('Tapez le nombre de Fe présent dans la formule de la fahlore.
```

Si vous connaissez la formule de la fahlore, vous pouvez l'indiquer

```
if isempty(Sbfahlore)
    SbAs_ratio(i) = SB_PM(i) / (SB_PM(i) + AS_PM(i));
```

Sinon, on utilise les rapports Ag/Cu, As/Sb, Fe/Zn de l'analyse pour calculer la formule de la fahlore, en prenant en compte les caractéristiques de ce minéral:

```
restriction(i) = 0.0272 * ((Asnb(i) / (Asnb(i) + Sbnb(i))) ^ (-1.258));
```

Choix du paramètre limitant avant d'effectuer le calcul normatif:

Re-calculation des proportions molaires des minéraux à chaque itération:

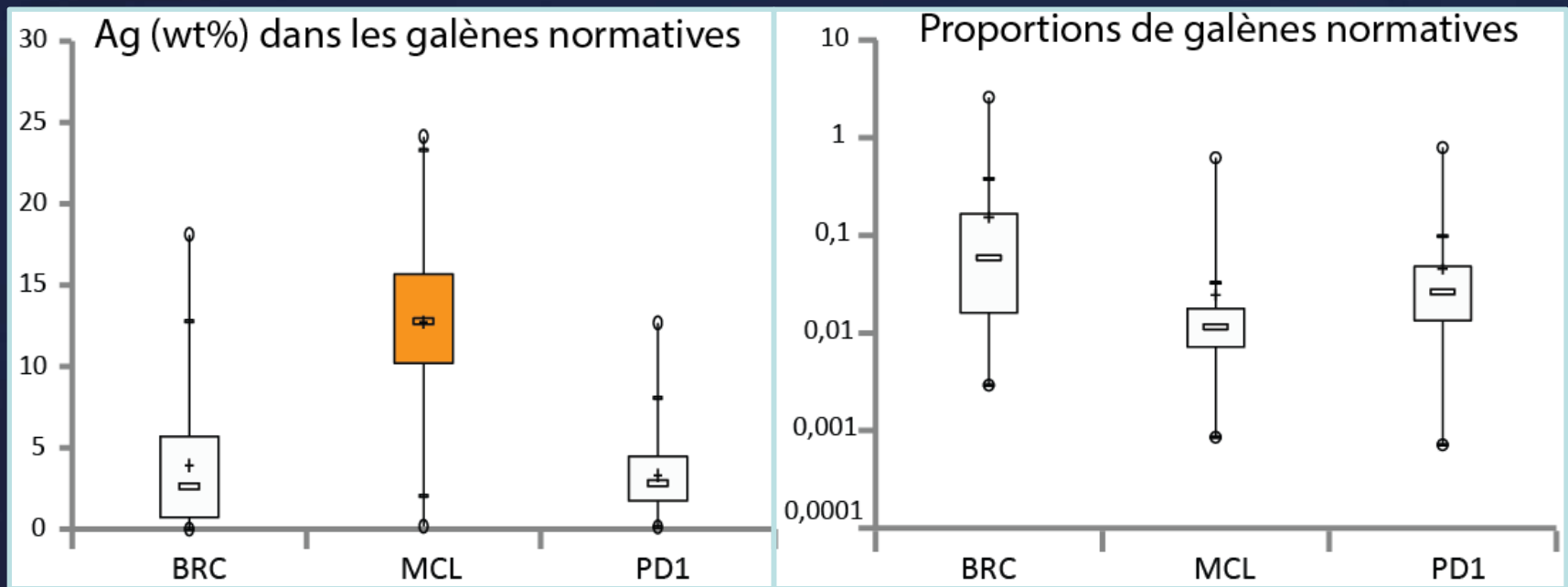
```
if ((G3(i)*10)/G1(i)) < 4
    useSb(i) = 1;
else
    useAg(i) = 1;
end
```

```
(Agnb(i)/Znnb(i))*107.87+(Cunb(i)/Znnb(i))*63.55+(Fenb(i)/Znnb(i))*55.85+(Znnb(i)/Znnb(i))*65.41+(Asnb(i)/Znnb(i))*74.94+(Sbnb(i)/Znnb(i))*121.76+(13/Znnb(i))*32.07;
```

2. Phases minérales

2.4. Tester la norme en Abitibi

- **Test 1:** Bracemac-McLeod et Phelds-Dodge (n = 604; données de X-Strata Zn).
- **Résultats :** Les galènes de McLeod (et Bracemac) auraient pu être plus argentifères que celles de Phelds-Dodge (cf. rapport pour plus de résultats sur ces données).



2. Phases minérales

2.5. Tester la norme à Hackett River

- L'exemple de Hackett River

- **Ressource** : 0,32% Cu; 4,67% Zn; 0,68% Pb; 149,8 g/t Ag; 0,31 g/t Au (calcul de 2006, cf. Grant 2009)
- **Caractéristiques** : bassin arrière-arc (croûte continentale), bimodal-felsique, sub-surface, raffinage poussé (cf. zonation)
- **Minéral hôte** : Freibergite (cf. fahlore contenant > 20wt% d'Ag) – renferme 80% de l'Ag de Hackett River (Grant 2009)
- La freibergite est souvent en contact avec la galène (provient-elle de réactions métamorphiques entre sulfures?)



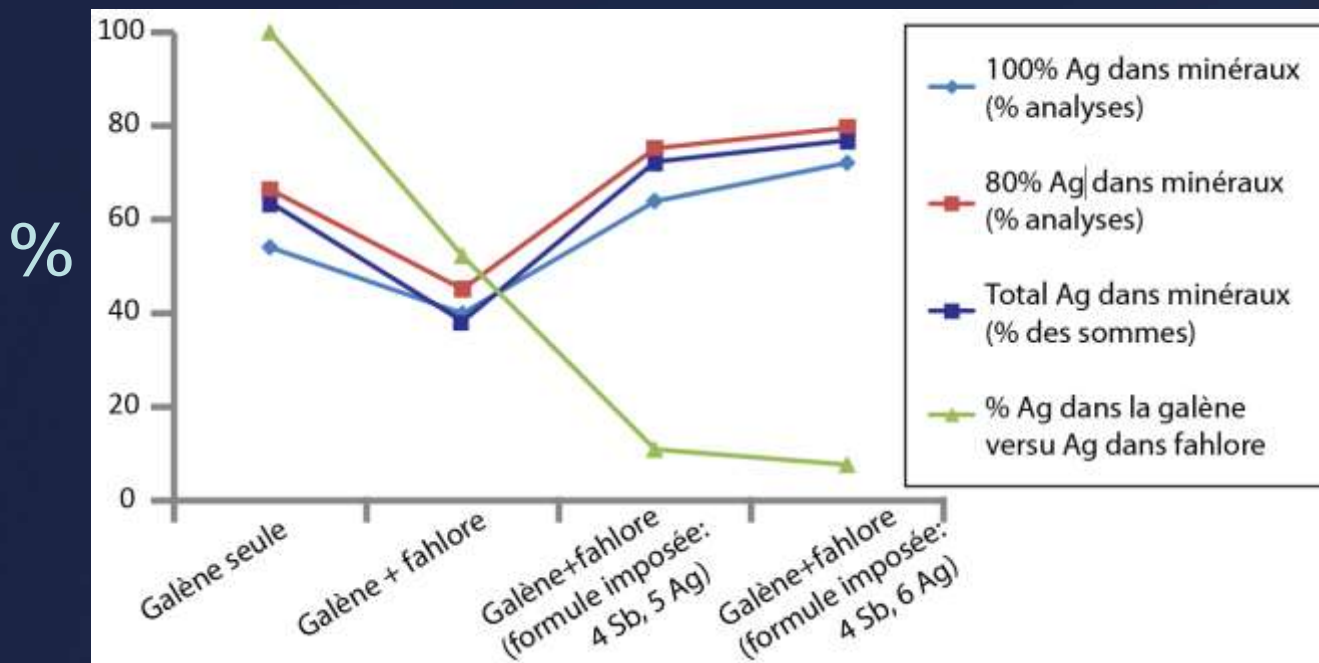
2. Phases minérales

2.5. Tester la norme à Hackett River

- **Test 2:** Calcul de la norme sur les 4 690 données de X-Strata Zn contenant > 10 wt% de S (cf. code MatLab).

- **Résultat :**

- La galène peut contenir 67% de l'Ag (Gn était un hôte majeur?).
- La fahlore et la galène peuvent contenir 75-80% de l'Ag, si on impose une formule de type freibergite à la fahlore – ceci reproduit les mesures de Grant (2009).



2. Phases minérales

2.6. Conclusions

- **Conclusion pour les phases minérales:**

- Lorsque la galène permet de fixer l'Ag dans le VMS, cela signifie que le système doit contenir du **Pb**, et du **Bi** et/ou **Sb**.
- Si la fahlore est la phase importante, le système doit contenir du Fe-Zn-Cu, de l'**Sb**, et peu d'As de préférence.
- Ces minéraux cristallisent dans des conditions de température, pH, etc. connues, qui sont une contrainte supplémentaire sur le système (cf. rapport 2012-08).
- Pour comprendre les VMS argentifères du point de vue de la géochimie, il faut étudier le système **Ag-Cu-Zn-Pb-Bi-As-Sb-(Au)**.

Sommaire

1. Introduction
2. Phases minérales
3. Lithologie et composition des roches encaissantes
4. Conclusions

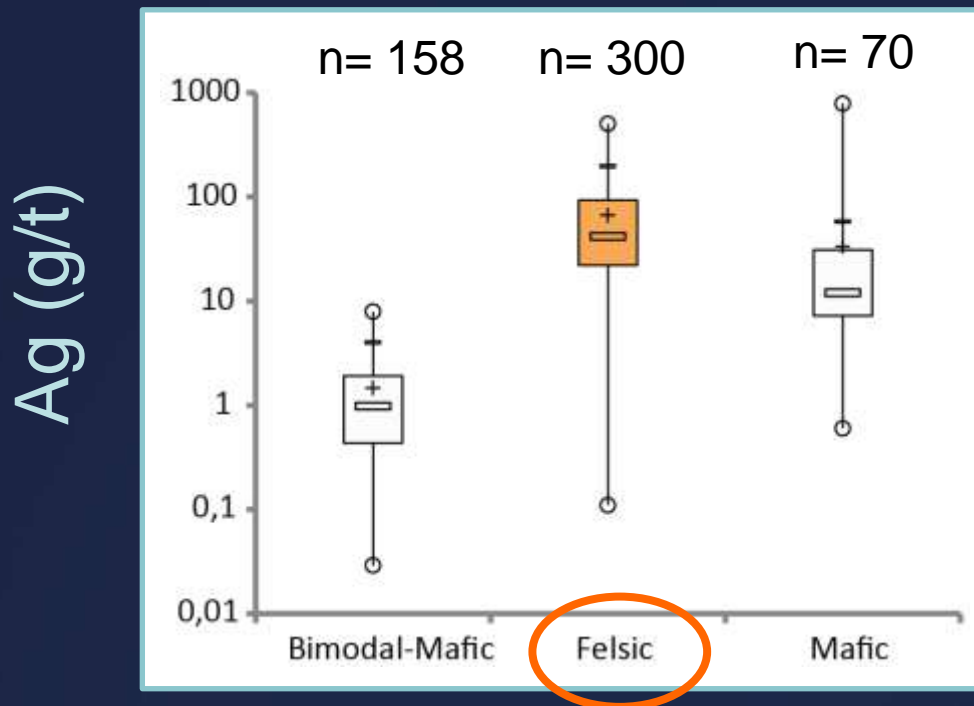
3.1. Introduction

- **Partie II:** quelles sont les relations entre la lithologie et la chimie des roches encaissantes et la composition des VMS?
- Dans cette section, on montrera:
 - Association entre les Ag-VMS et les roches felsiques (cf. classification de Franklin et al. 2005; rapport 2012-08).
 - données de compilation (USGS)
 - test sur l'Abitibi (carte SIGÉOM 2012)
 - Relation entre la composition des VMS et les concentrations en Ag-Cu-Zn-Pb-Bi-As-Sb-(Au) de l'encaissant.
 - test sur l'Abitibi (carte et échantillons du SIGÉOM 2012 et autres)

3. Composition des roches encaissantes

3.2. Relation avec les roches felsiques

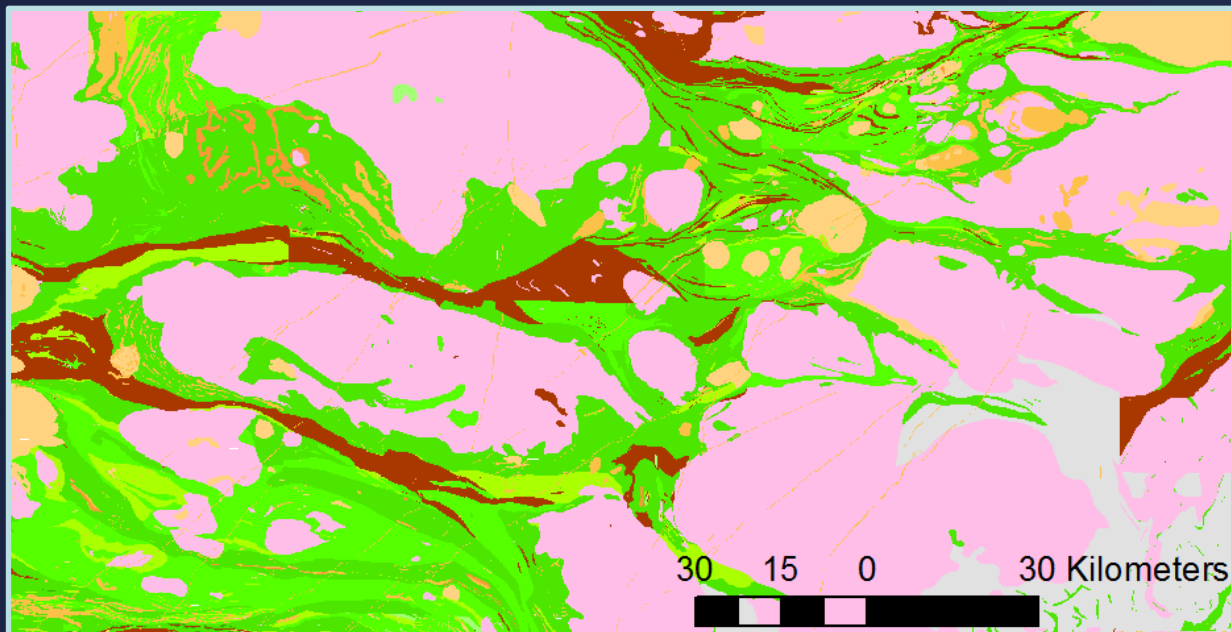
- **Données de l'USGS:** compilation mondiale de VMS (Mosier et al. 2009).
- Ces données indiquent que les VMS situés dans les roches felsiques sont fréquemment plus riches en Ag que ceux situés dans des roches plus mafiques.



3. Composition des roches encaissantes

3.2. Relation avec les roches felsiques

- **Test 3:** Étude de la proximité spatiale entre les VMS d'Abitibi et les polygones de la carte géologique.
 - VMS de l'Abitibi (SIGÉOM 2012 et USGS)
 - Carte SIGÉOM 2012, avec les améliorations apportées par les projets CONSOREM de S. Faure (cf. projets 2009-04, 2010-03 et 2011-08) – avec les unités lithologiques classées de la façon suivante: I1, I2, I3, I4, S, V1, V2, V3, V4.



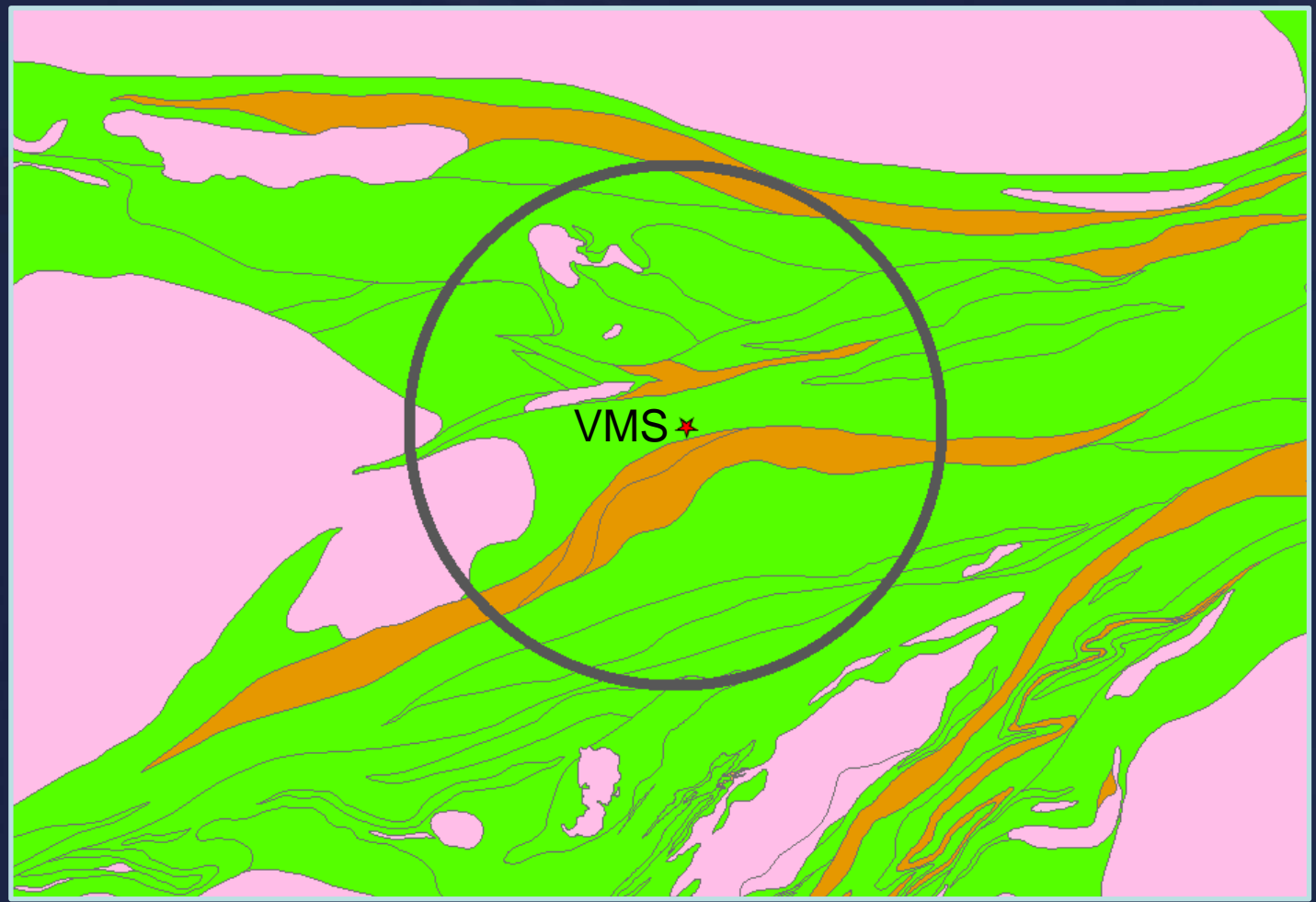
Extrait des
données
cartogra-
-phiques
utilisées

3. Composition des roches encaissantes

3.2. Relation avec les roches felsiques

Test 3-méthode: calculs de contrastes.

$$\text{Contraste} = \ln \left(\left(\frac{\quad}{\quad} \right) / \left(\frac{\quad}{\quad} \right) \right)$$

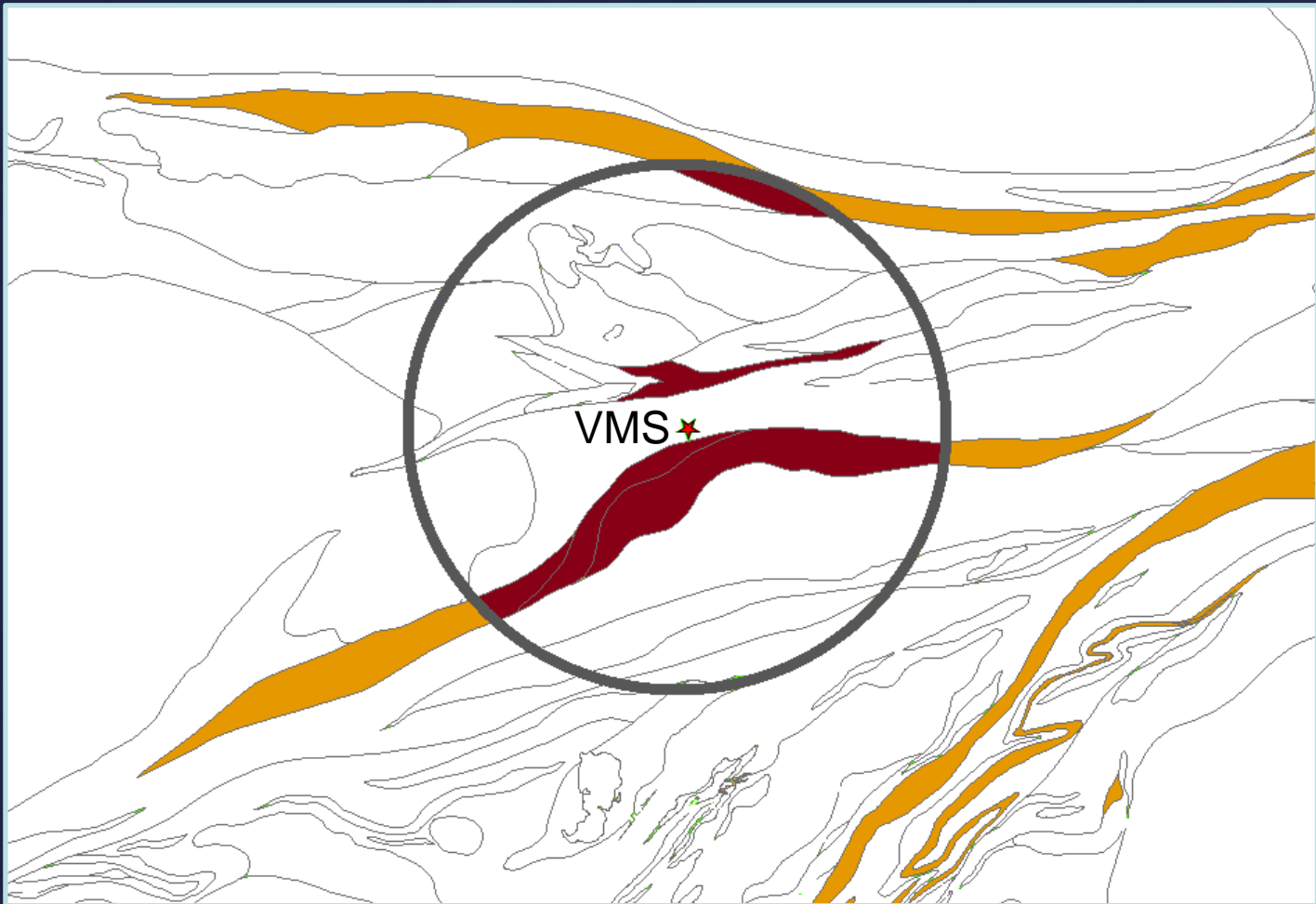


3. Composition des roches encaissantes

3.2. Relation avec les roches felsiques

Test 3-méthode: calculs de contrastes.

$$\text{Contraste} = \ln \left(\left(\text{Surface 1} / \right) / \left(\text{Surface 2} / \right) \right)$$

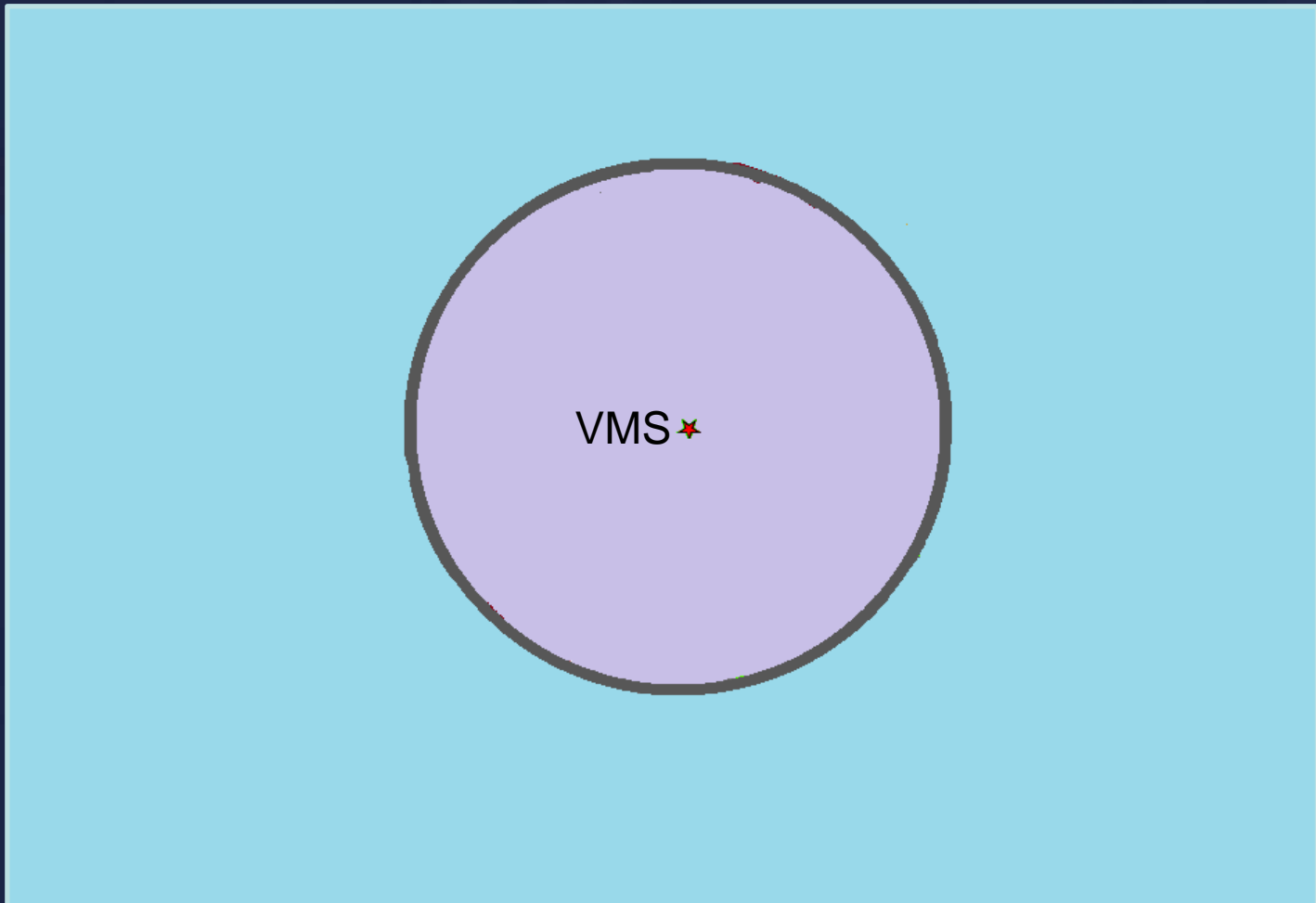


3. Composition des roches encaissantes

3.2. Relation avec les roches felsiques

Test 3-méthode: calculs de contrastes.

$$\text{Contraste} = \ln \left(\left(\text{Surface 1} / \text{Surface 3} \right) / \left(\text{Surface 2} / \text{Surface 4} \right) \right)$$



3. Composition des roches encaissantes

3.2. Relation avec les roches felsiques

Test 3-méthode: calculs de contrastes. 9 calculs pour chacun des 87 VMS.

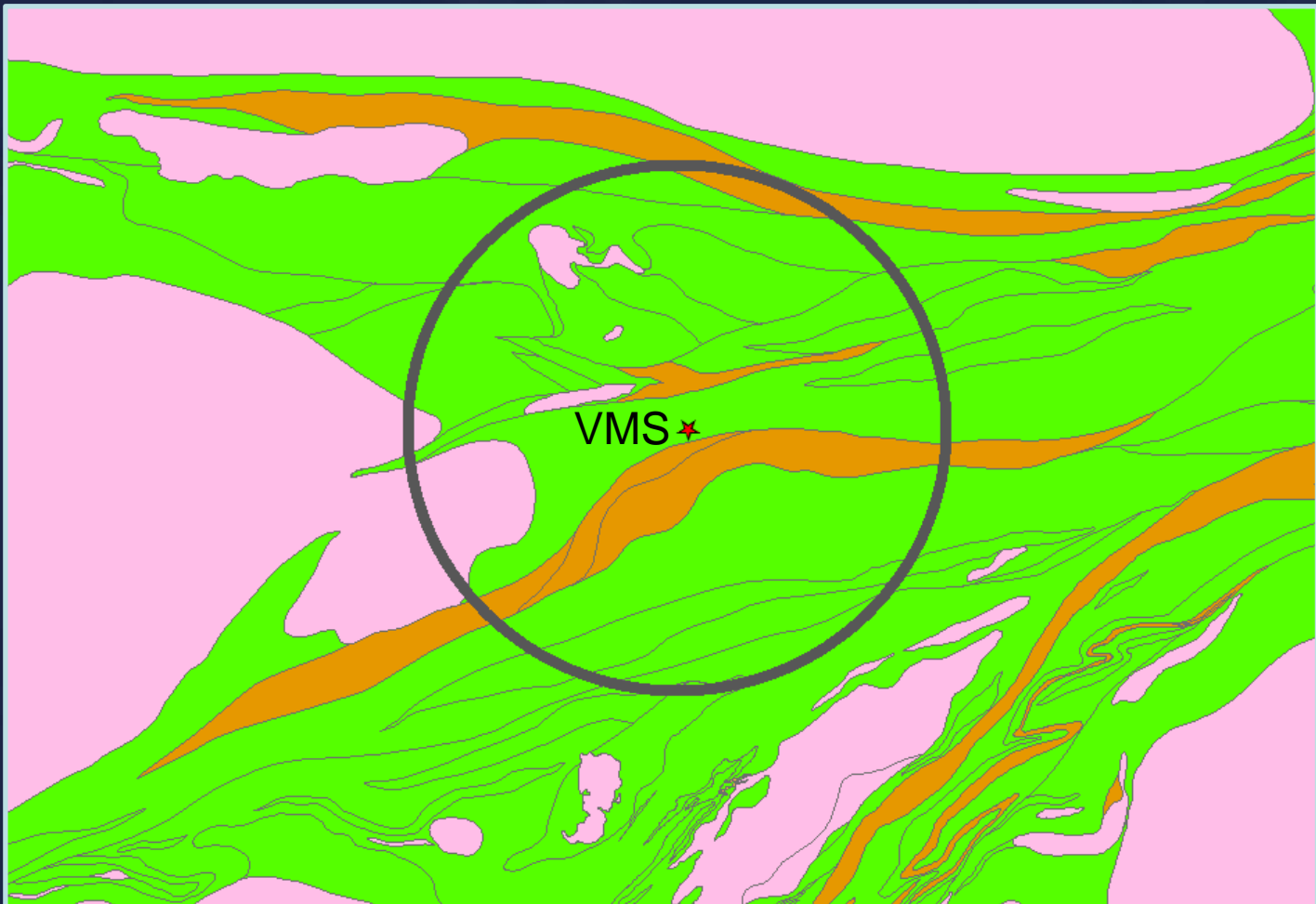
$$\text{Contraste} = \ln \left(\left(\text{Surface 1} / \text{Surface 3} \right) / \left(\text{Surface 2} / \text{Surface 4} \right) \right)$$



Python
pour ArcGIS



PythonWin

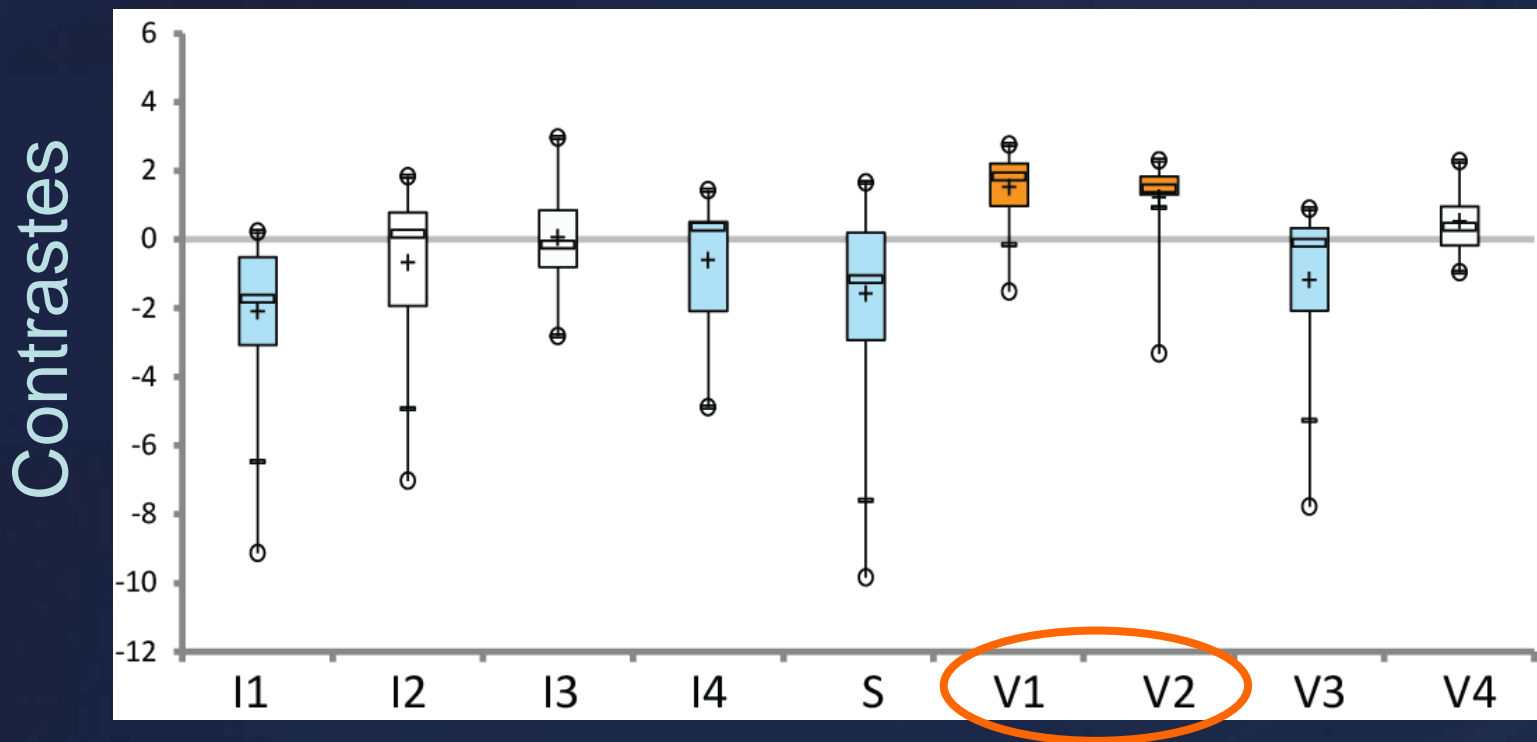


3. Composition des roches encaissantes

3.2. Relation avec les roches felsiques

• Résultats:

- Les VMS de l'Abitibi sont proches des V1-V2
- Les VMS argentifères ne sont pas plus proches des V1-V2 que les autres types de VMS.



Pour chaque box plot: $n \leq 87$

3. Composition des roches encaissantes

3.2. Relation avec les roches felsiques

- **Conclusions:**

- À l'échelle mondiale, les VMS argentifères sont plus fréquemment associés aux roches felsiques que les autres types de VMS.
- Ce n'est pas vrai à l'échelle de l'Abitibi. Il y a donc d'autres paramètres qui entrent en jeu.

- **Composition chimique des roches encaissantes:**

- Faut-il que les roches encaissantes soient riches en Ag pour qu'un VMS argentifère se forme?
- Ou bien faut-il qu'elles soient riches en Ag-Cu-Zn-Pb-Bi-As-Sb-(Au)?
- Données utilisées: SUPERBANQUE 2011, car le test a été réalisé sur l'Abitibi

3. Composition des roches encaissantes

3.2. Système Ag-Cu-Zn-Pb-Bi-As-Sb-(Au)

- **Test 4 - première étape:** classer les analyses géochimiques de l'Abitibi en 3 ou 4 groupes.
- Utilisation de seuils, déterminés d'après des calculs statistiques sur les données du GEOROC et de la SUPERBANQUE 2011.
- **Valeurs seuils et le problème des limites de détection**
 - Les valeurs basses ne sont pas détectables.
 - L'emphase est donc mise sur les valeurs hautes à très élevées.

Valeurs	Ag	Bi	Sb	Pb	Cu	Zn	As	Au
Unité	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppb
Normales	< 1	< 2	< 1	< 20	< 50	< 70	< 5	< 5
Élevées	1 à 5	2 à 5	1 à 5	20 à 100	50 à 200	70 à 200	5 à 20	5 à 50
Très élevées	> 5	> 5	> 5	> 100	200 à 500	200 à 500	> 20	50 à 500
Très élevées 2					> 500	> 500		> 500

3. Composition des roches encaissantes

3.2. Système Ag-Cu-Zn-Pb-Bi-As-Sb-(Au)

- **Deuxième étape:** Étude de la proximité spatiale entre les VMS d'Abitibi et la composition chimique des roches encaissantes.

- **Méthode:**

- Calcul de contrastes

Python
pour ArcGIS

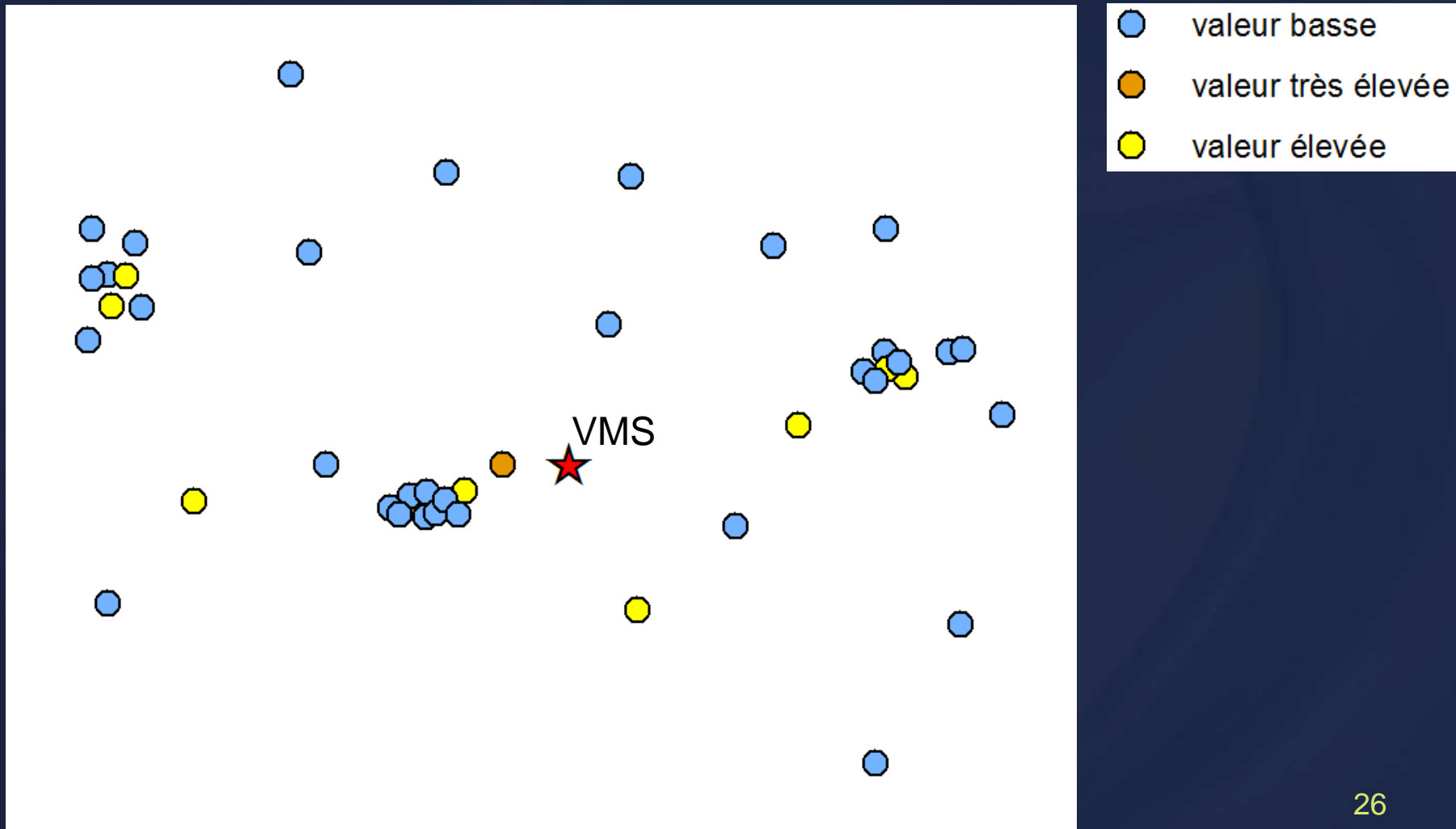


- **Deux tests:**

- **Procédure A:** Calculs de contrastes à partir de points qui correspondent aux analyses géochimiques (résultats peu probants, cf. rapport 2012-08).

- **Procédure B:** Calculs de contrastes sur les même données, après qu'elles aient été transformées en polygones.

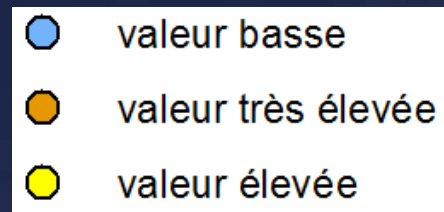
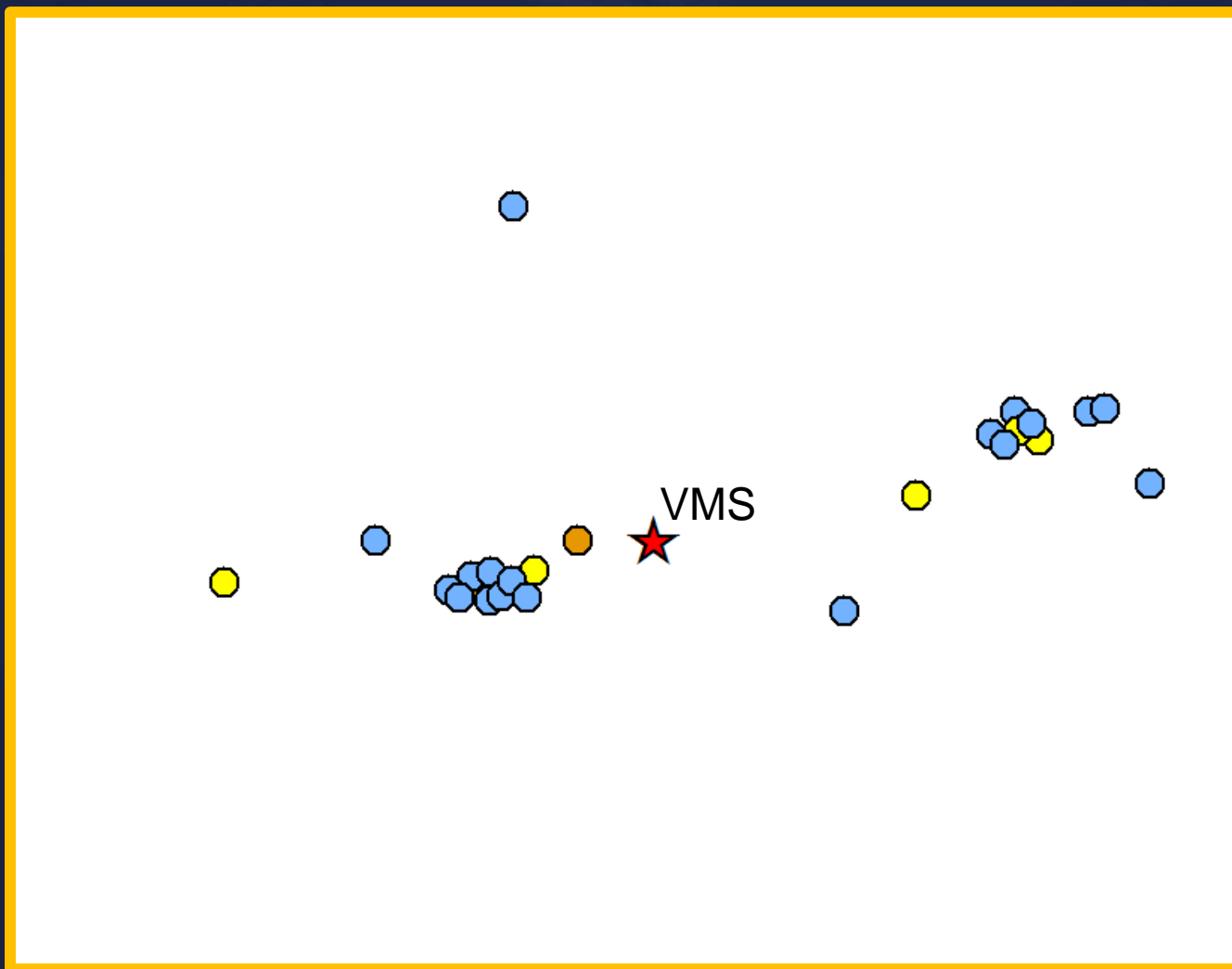
- Transformation des points d'analyse en polygones Voronoi-Thiessen.



3. Composition des roches encaissantes

3.2. Système Ag-Cu-Zn-Pb-Bi-As-Sb-(Au)

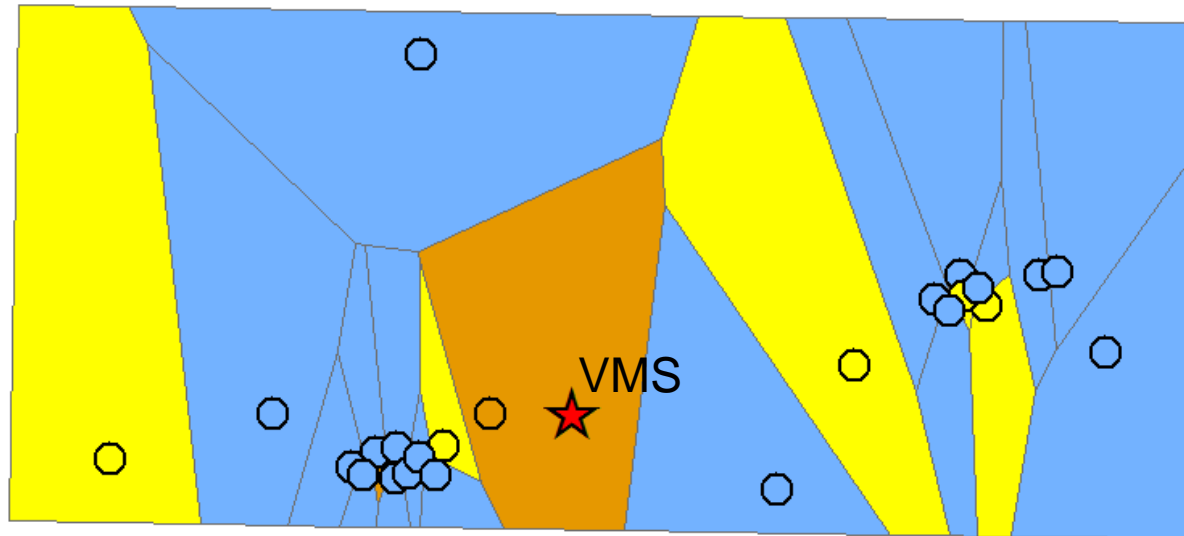
- Transformation des points d'analyse en polygones Voronoi-Thiessen.






3. Composition des roches encaissantes

3.2. Système Ag-Cu-Zn-Pb-Bi-As-Sb-(Au)

- Transformation des points d'analyse en polygones Voronoi-Thiessen.

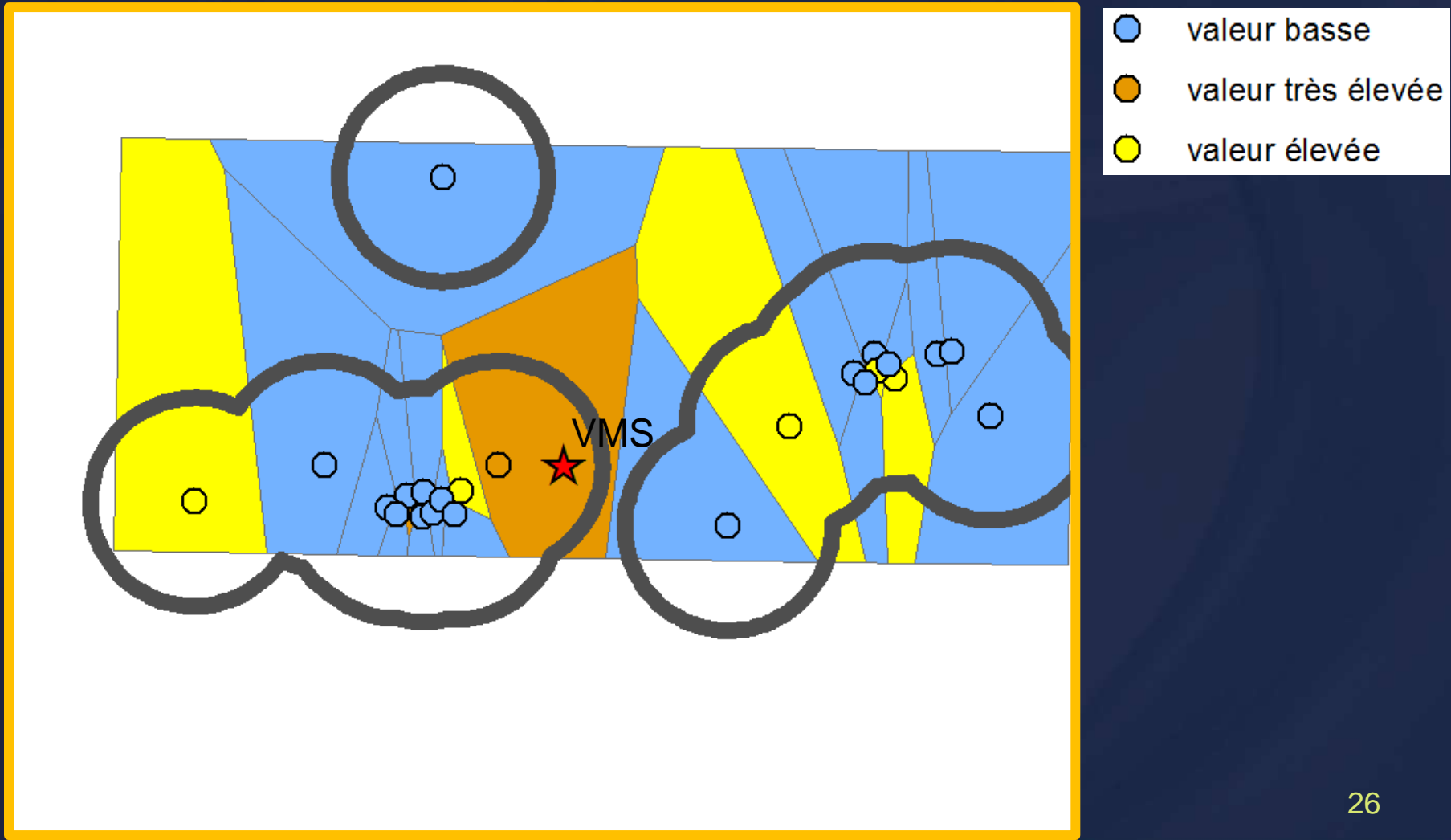


-  valeur basse
-  valeur très élevée
-  valeur élevée

3. Composition des roches encaissantes

3.2. Système Ag-Cu-Zn-Pb-Bi-As-Sb-(Au)

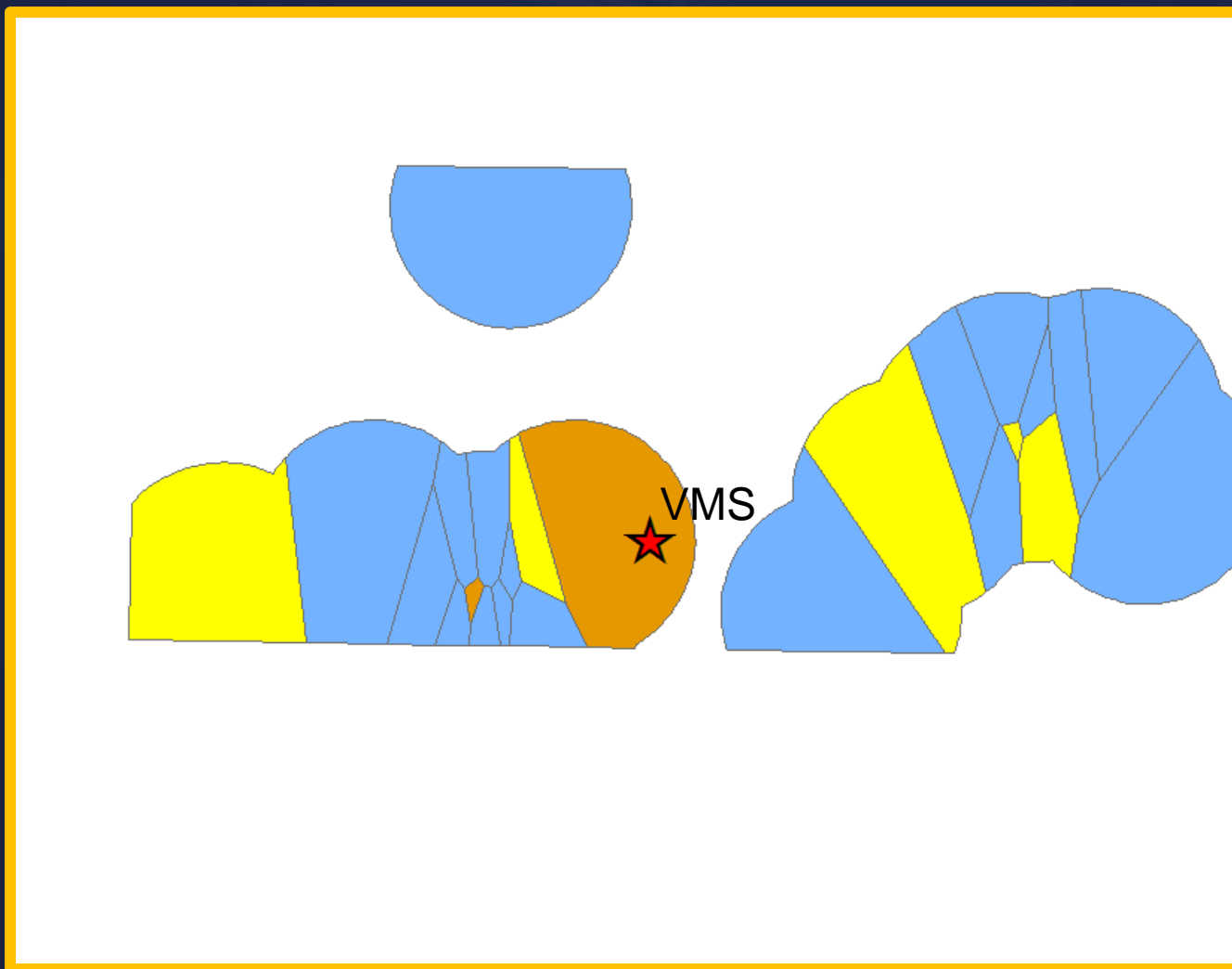
- Transformation des points d'analyse en polygones Voronoi-Thiessen.



3. Composition des roches encaissantes

3.2. Système Ag-Cu-Zn-Pb-Bi-As-Sb-(Au)

- Transformation des points d'analyse en polygones Voronoi-Thiessen.

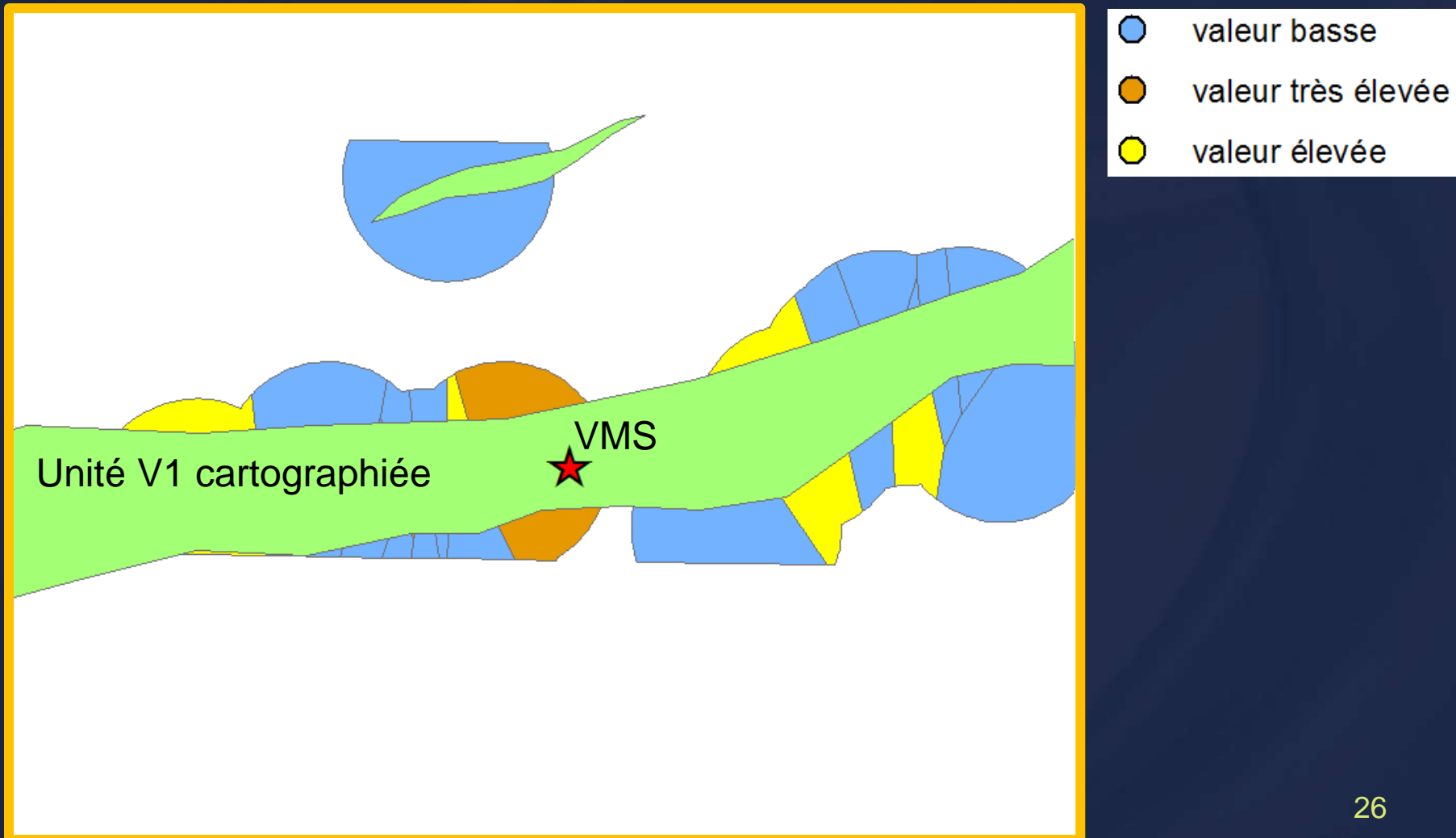


- valeur basse
- valeur très élevée
- valeur élevée

3. Composition des roches encaissantes

3.2. Système Ag-Cu-Zn-Pb-Bi-As-Sb-(Au)

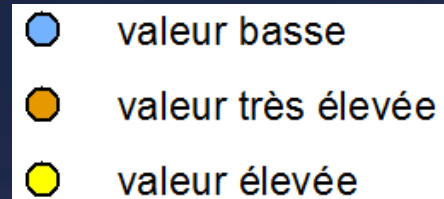
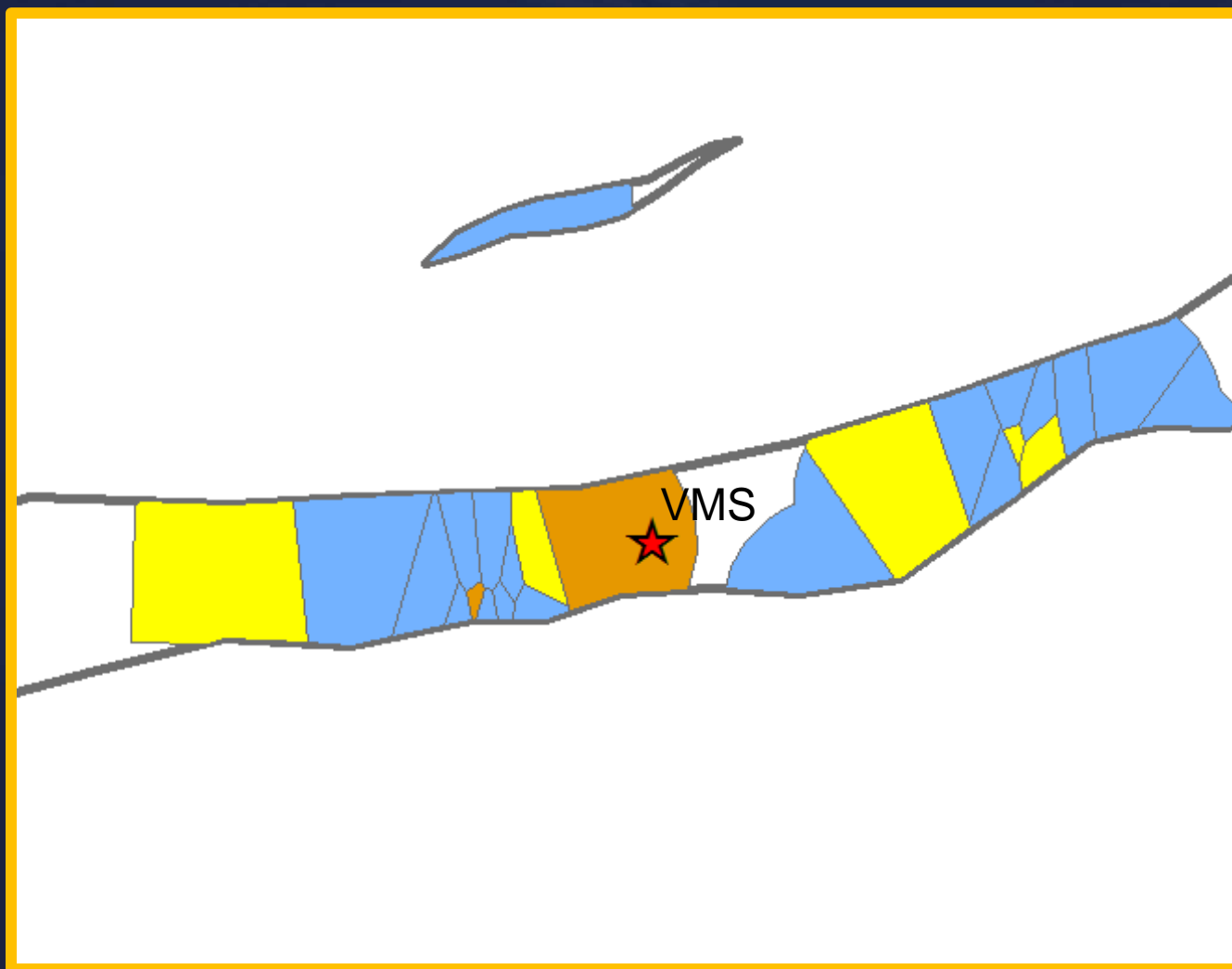
- Transformation des points d'analyse en polygones Voronoi-Thiessen.



3. Composition des roches encaissantes

3.2. Système Ag-Cu-Zn-Pb-Bi-As-Sb-(Au)

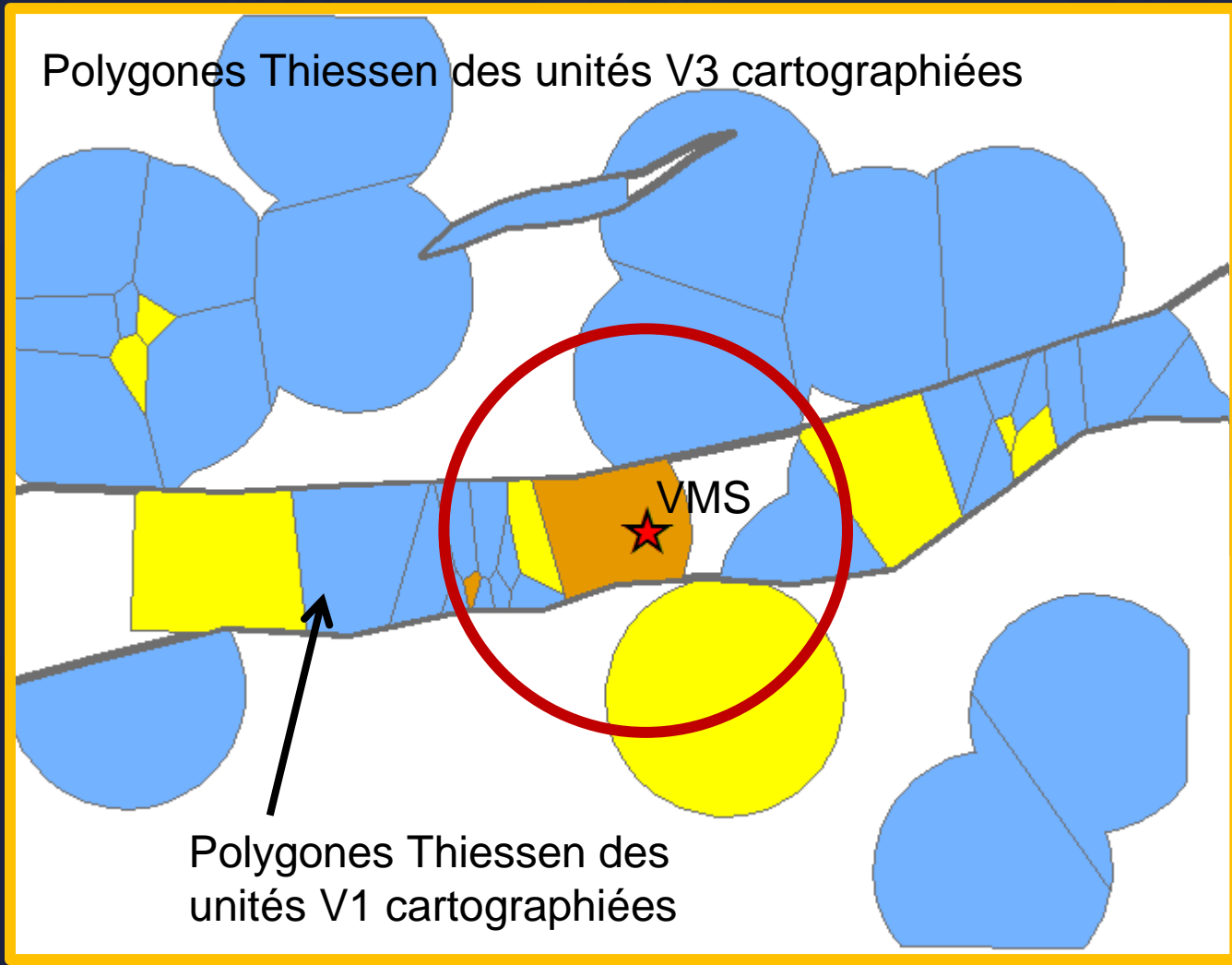
- Transformation des points d'analyse en polygones Voronoi-Thiessen.



3. Composition des roches encaissantes

3.2. Système Ag-Cu-Zn-Pb-Bi-As-Sb-(Au)

- Transformation des points d'analyse en polygones Voronoi-Thiessen.



- valeur basse
- valeur très élevée
- valeur élevée

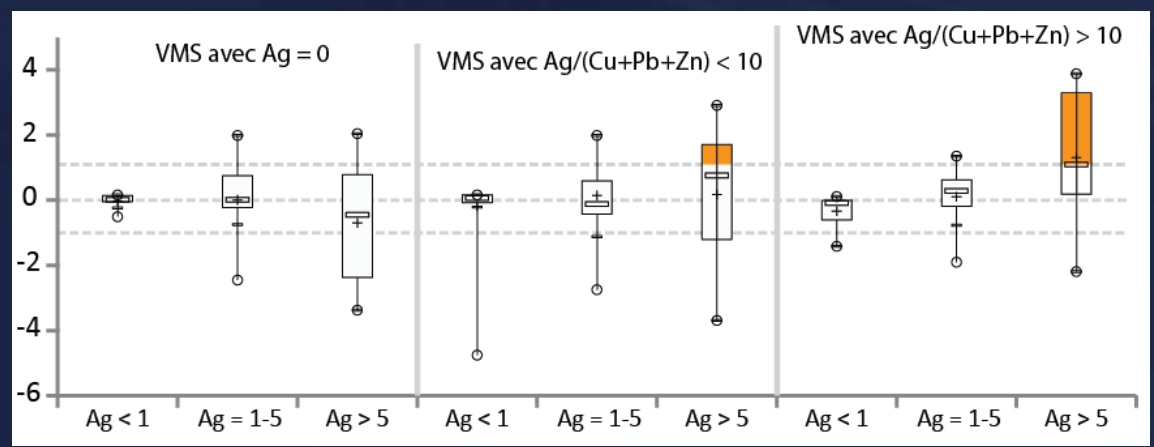
3. Composition des roches encaissantes

3.2. Système Ag-Cu-Zn-Pb-Bi-As-Sb-(Au)

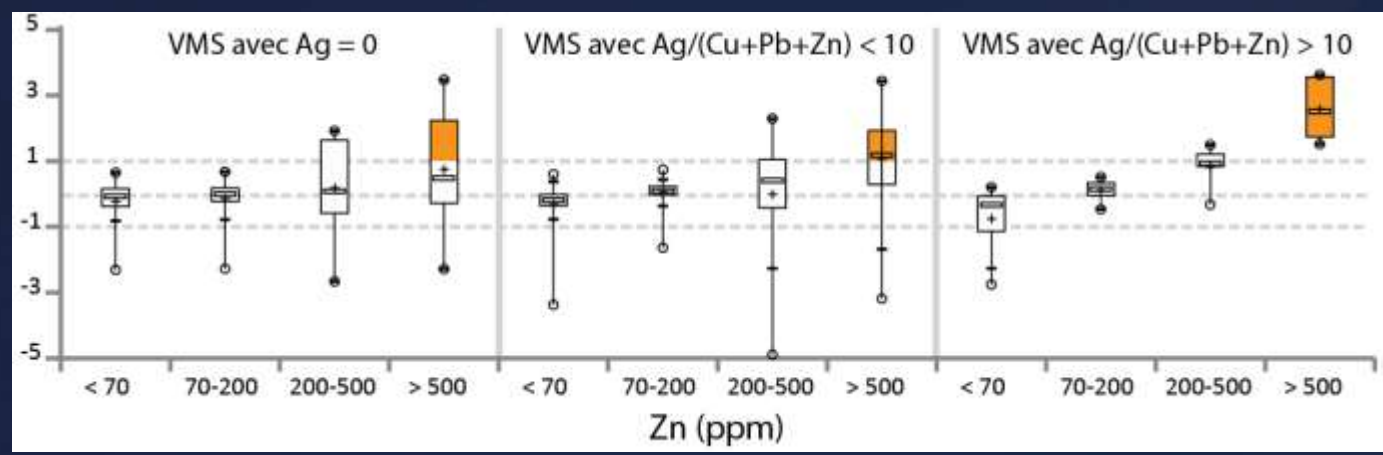
- Afin d'exploiter les résultats, les VMS ont été classés selon leur contenu en Ag:

Ag (g/t, absolu) et $Ag/(Cu+Zn+Pb) = Ag/(Cu+Zn)$ (relatif)

Contrastes



Buffer = 2 km
BoxPlot: n <= 87



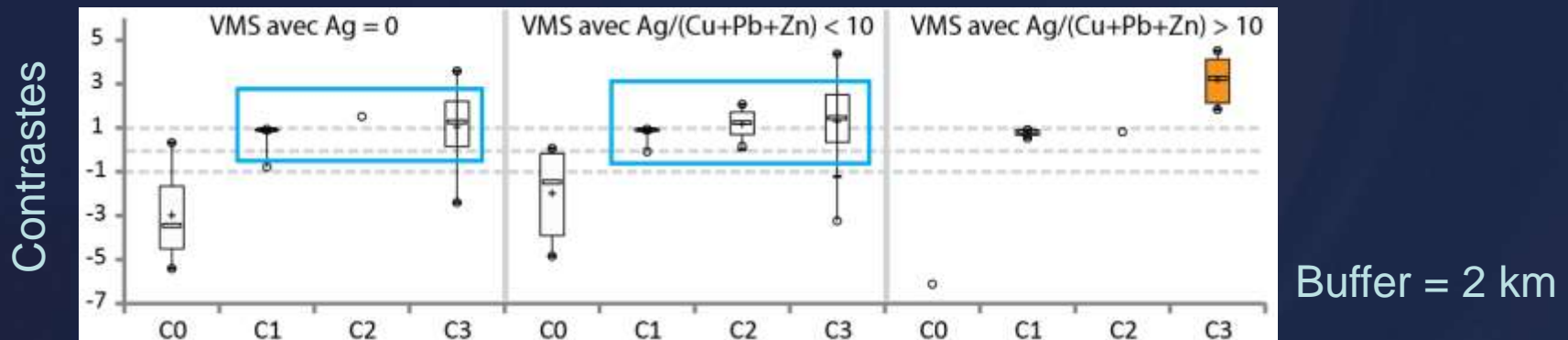
3. Composition des roches encaissantes

3.2. Système Ag-Cu-Zn-Pb-Bi-As-Sb-(Au)

- **Résultats:** Les valeurs les plus hautes de:
 - Bi, Cu, Pb, Zn, (Ag) sont proches des VMS.
 - Zn, Ag, (Bi) sont proches des VMS argentifères.

Élément	Bons critères pour...		Valeurs pertinentes
	Tous les VMS	Les Ag-VMS	
Ag	± OUI	OUI	>= 5 ppm
As	NON	NON	>= 20 ppm
Au	NON	NON	>= 500 ppb
Bi	OUI	± OUI	>= 5 ppm
Cu	± OUI	NON	>= 500 ppm
Pb	± OUI	NON	>= 100 ppm
Sb	NON	NON	>= 5 ppm
Zn	OUI	OUI	>= 500 ppm

- **Test 5 : Combinaison des résultats des tests 3 et 4**
- Carte limitée aux roches volcaniques et contenant les classes suivantes:
 - Classe 0: roches volcaniques (V) – pas de géochimie reportée
 - Classe 1: V + valeur basse en Bi-Ag-Zn
 - Classe 2: V3-V4 + valeur haute de Bi, Ag et/ou Zn
 - Classe 3: V1-V2 + valeur haute de Bi, Ag et/ou Zn

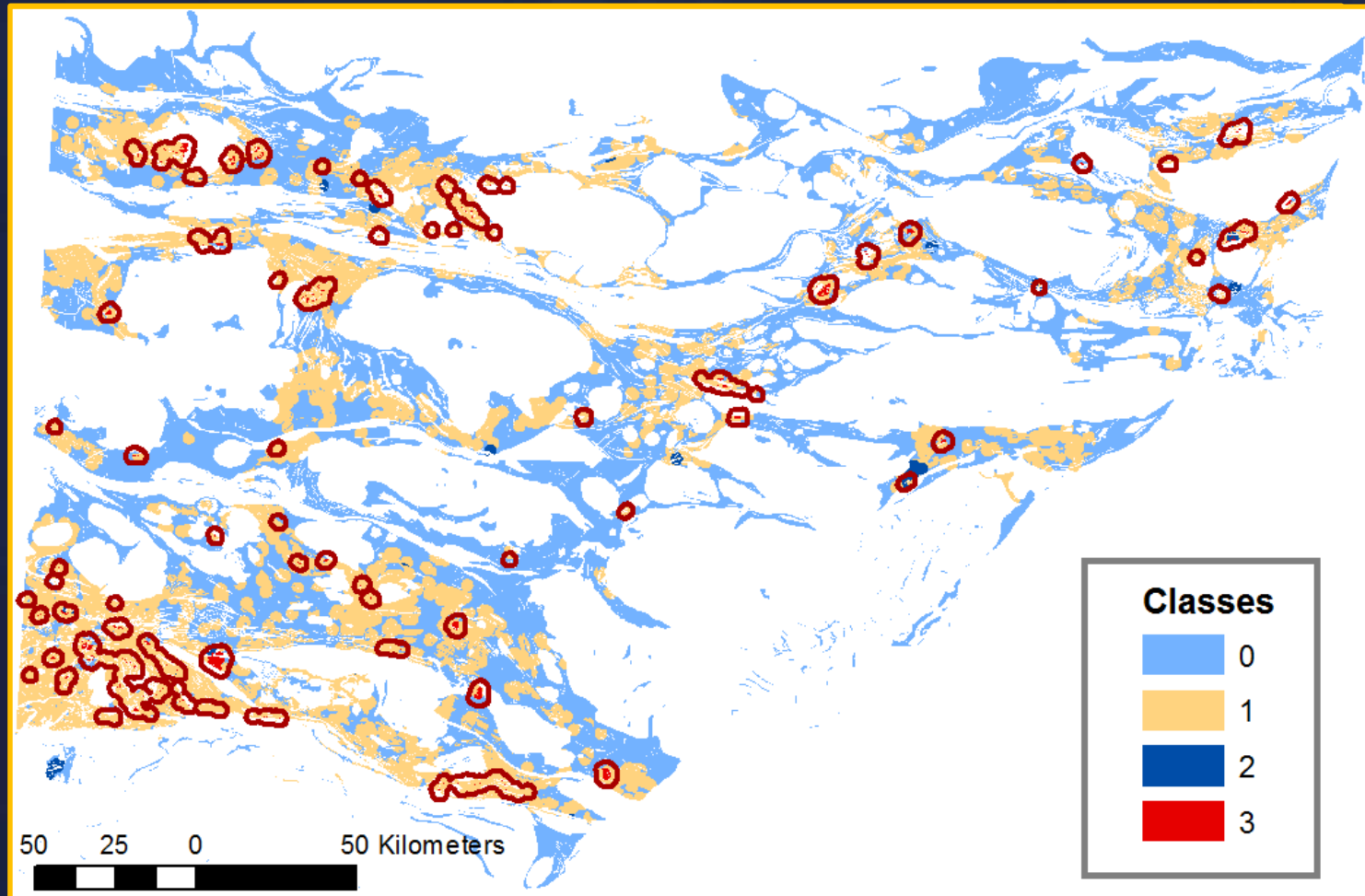


- Conclusion : paramètre prometteur, basé sur le fait qu'il pourrait y avoir une relation entre la composition des roches encaissantes et celle des VMS.

3. Composition des roches encaissantes

3.2. Système Ag-Cu-Zn-Pb-Bi-As-Sb-(Au)

- **Test 5 : Combinaison des résultats des tests 1 et 4**
- **Conclusion: la classe 3 est proche des VMS argentifères.**



Sommaire

1. Introduction
2. Phases minérales
3. Lithologie et composition des roches encaissantes
4. Conclusions

4. Conclusions

- **En contexte d'exploration, les paramètres lithologiques et géochimiques sont plus facilement utilisables :**
 - Présence d'horizons clastiques de roches V1-V2
 - Présence de roches riches en Bi-Zn et/ou Ag.
- **Système à prendre en compte: Cu-Zn-Pb-Ag-Bi-Sb-As-(Au)**
- Les caractéristiques du fluide hydrothermal (physique-chimie) et les contraintes minéralogiques sont primordiales.
- Cependant, la composition de l'encaissant semble également jouer un rôle important (cf. disponibilité des métaux). Et ce paramètre est plus facilement utilisable en contexte d'exploration.
- Vers une norme pour les sulfures massifs?

Merci de votre attention