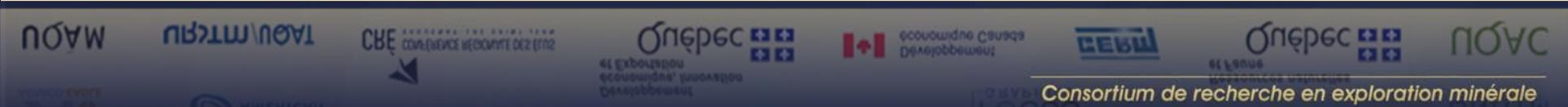


A la recherche de porphyres Cu-Au subalcalins dans les terrains de plus haut grade métamorphique archéens et paléoprotérozoïques

(Projet 2011-07)

Stéphane Faure

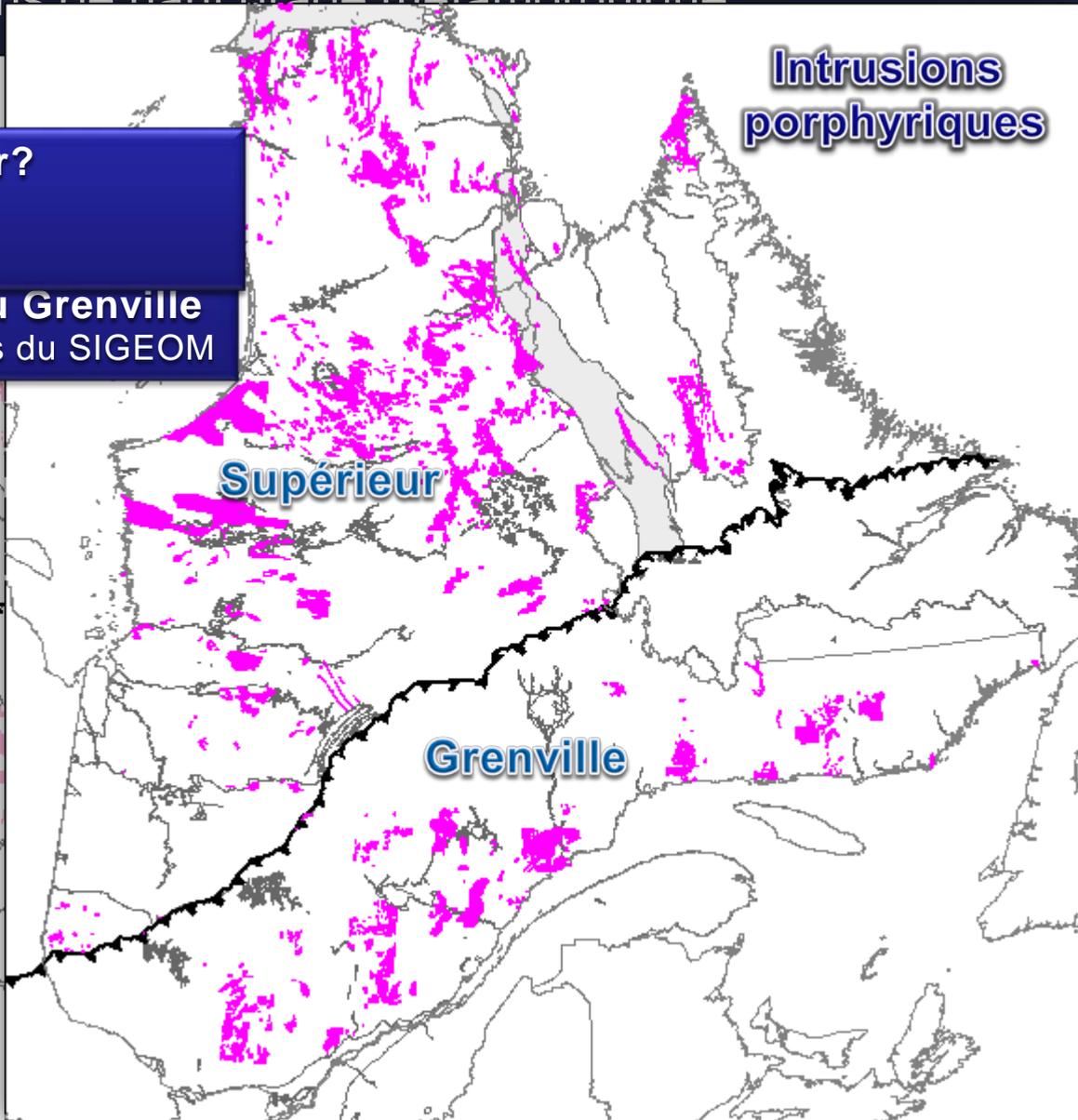
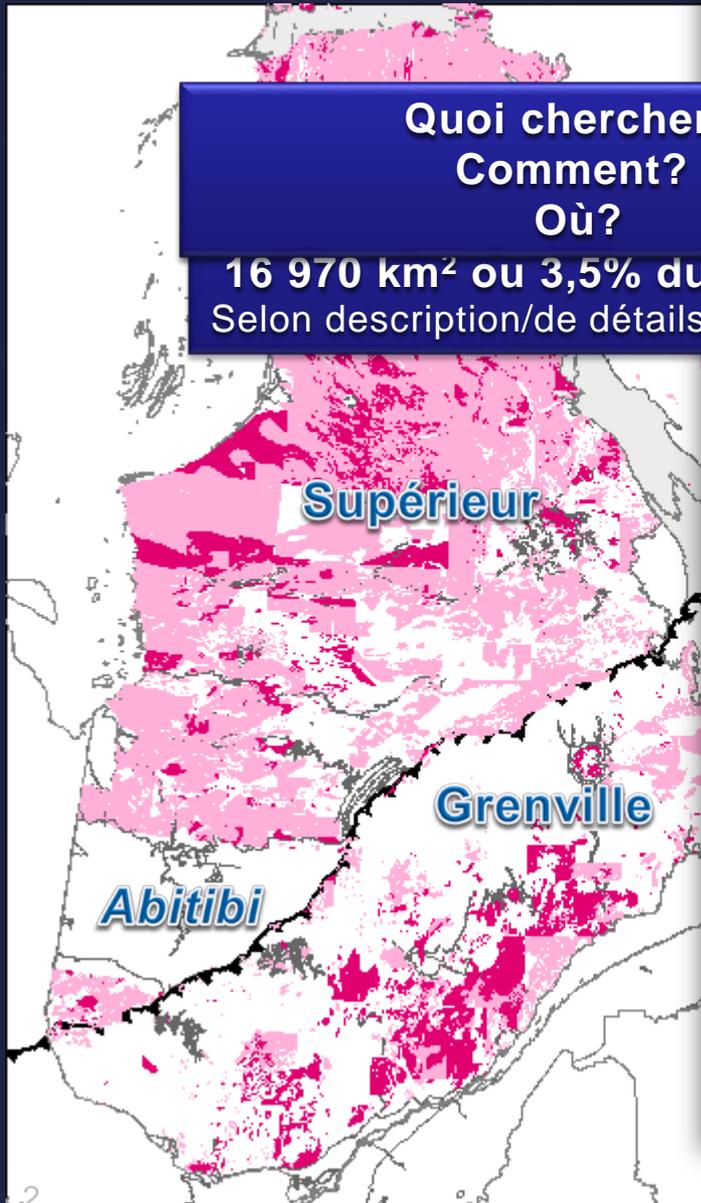
Montréal, 13 février 2013



Intrusions felsiques et intermédiaires dans les terrains de haut grade métamorphique

Quoi chercher?
Comment?
Où?

16 970 km² ou 3,5% du Grenville
Selon description/de détails du SIGEOM



Intrusions
porphyriques

Supérieur

Grenville

Abitibi

Plan de la présentation

Introduction: rappel sur les porphyres minéralisés, problématique, objectifs

Méthodologie

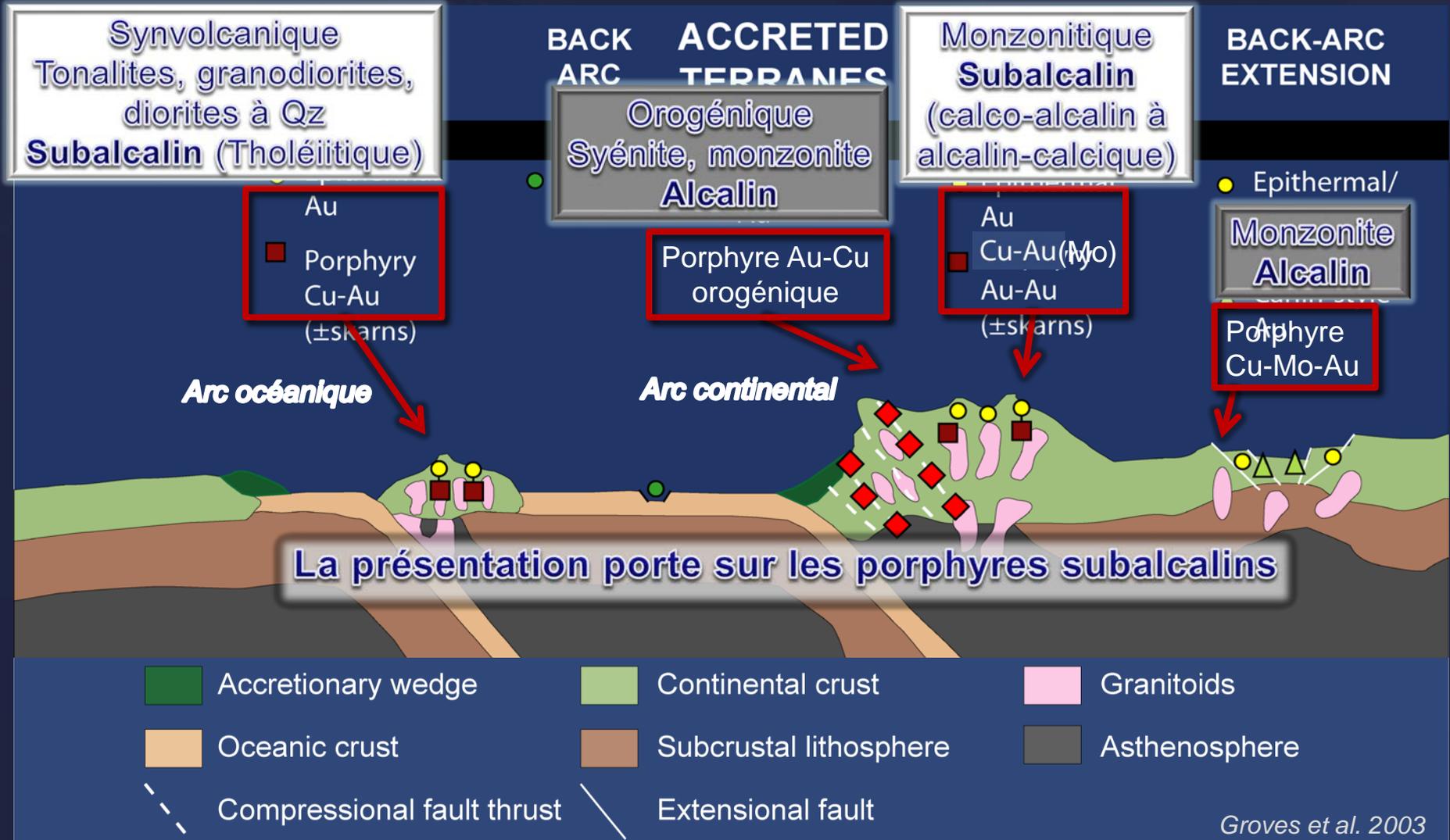
Volet 1: Identifier les protolithes de porphyres subalcalins minéralisés en Cu-Au dans le monde à partir d'une compilation de données lithogéochimiques de la littérature

Volet 2: Isoler les éléments et ratios chimiques clés permettant de reconnaître la signature de Porphyres Cu-Au dans le SIGEOM

Résultats de ciblage dans les terrains de haut grade métamorphique dans la province du Supérieur

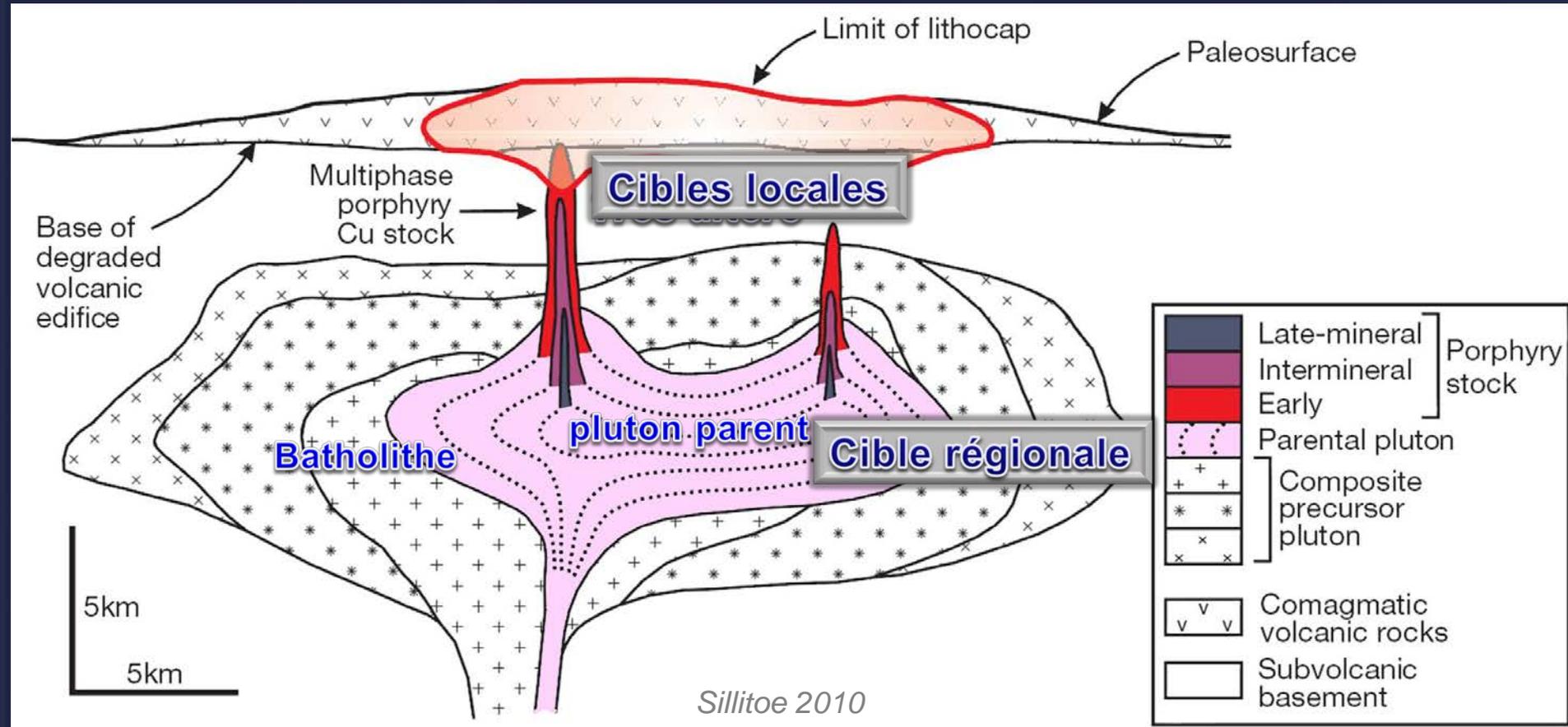
Introduction

Environnements géotectoniques des gisements porphyriques Cu-Au



Introduction

Les gisements porphyriques: plutons apparentés et polyphasés

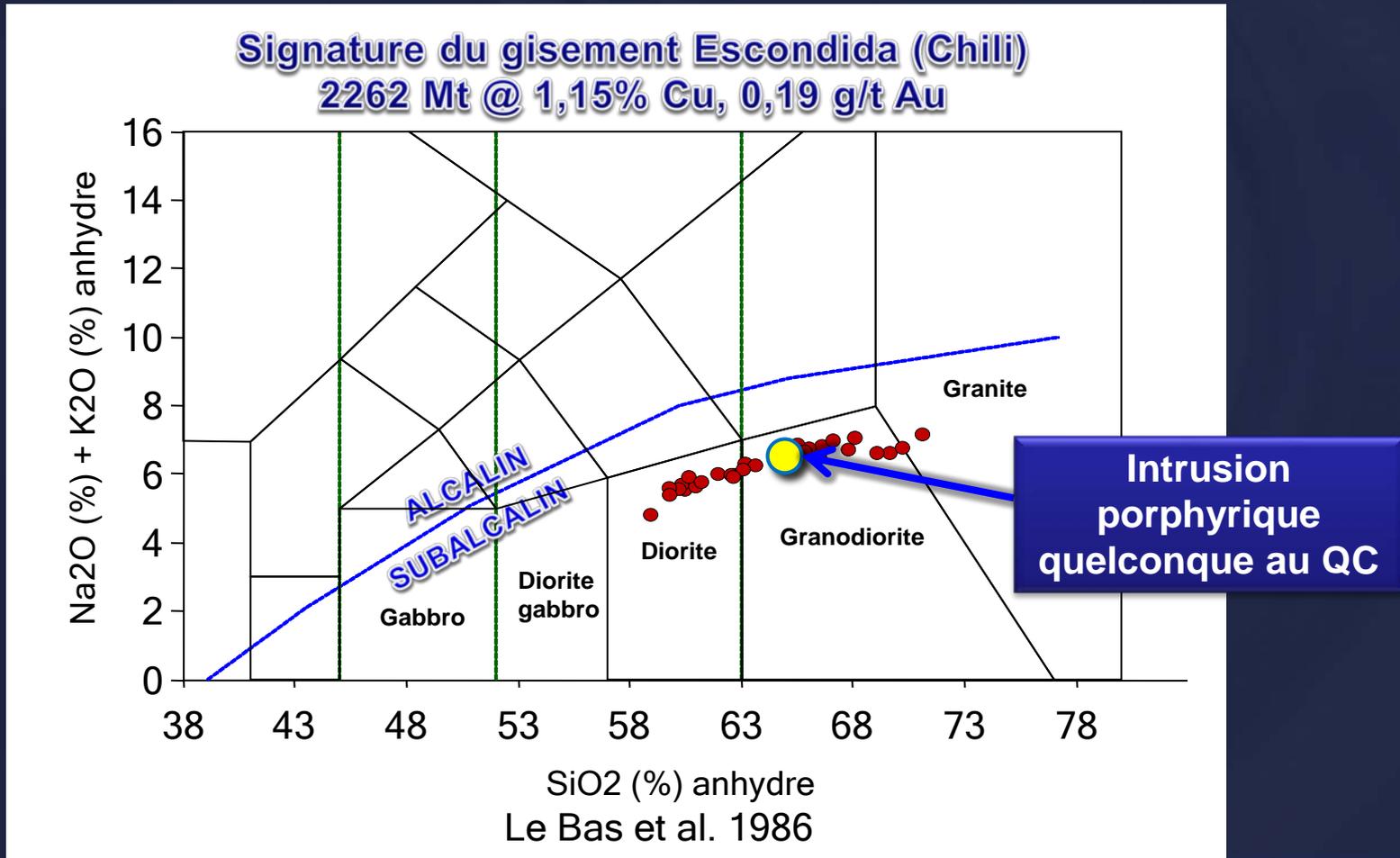


Intrusions clés recherchées: Porphyriques à matrice généralement aplitique, hydratées et riches en volatiles: >4% H₂O (**Hornblende**, **Biotite**, Apatite), très oxydées (série à **magnétite**), contenu élevé en S, et enrichies en LILE (Large-ion lithophile elements): K, Ba, Rb, Cs, Sr = Altération? pas nécessairement, processus d'enrichissement dans le résidu lors de la subduction (Dilles, 1987; Mueller et al., 2001; Richards 2011)

Problématique

Peut-on distinguer par géochimie un porphyre fertile d'un « stérile » ?

La chimie des porphyres protérozoïques et archéens est-elle différente de ceux plus récents ?



Potentiel dans le Supérieur?

Porphyres protérozoïques/archéens apparemment de plus en plus nombreux!

Archéen- Abitibi

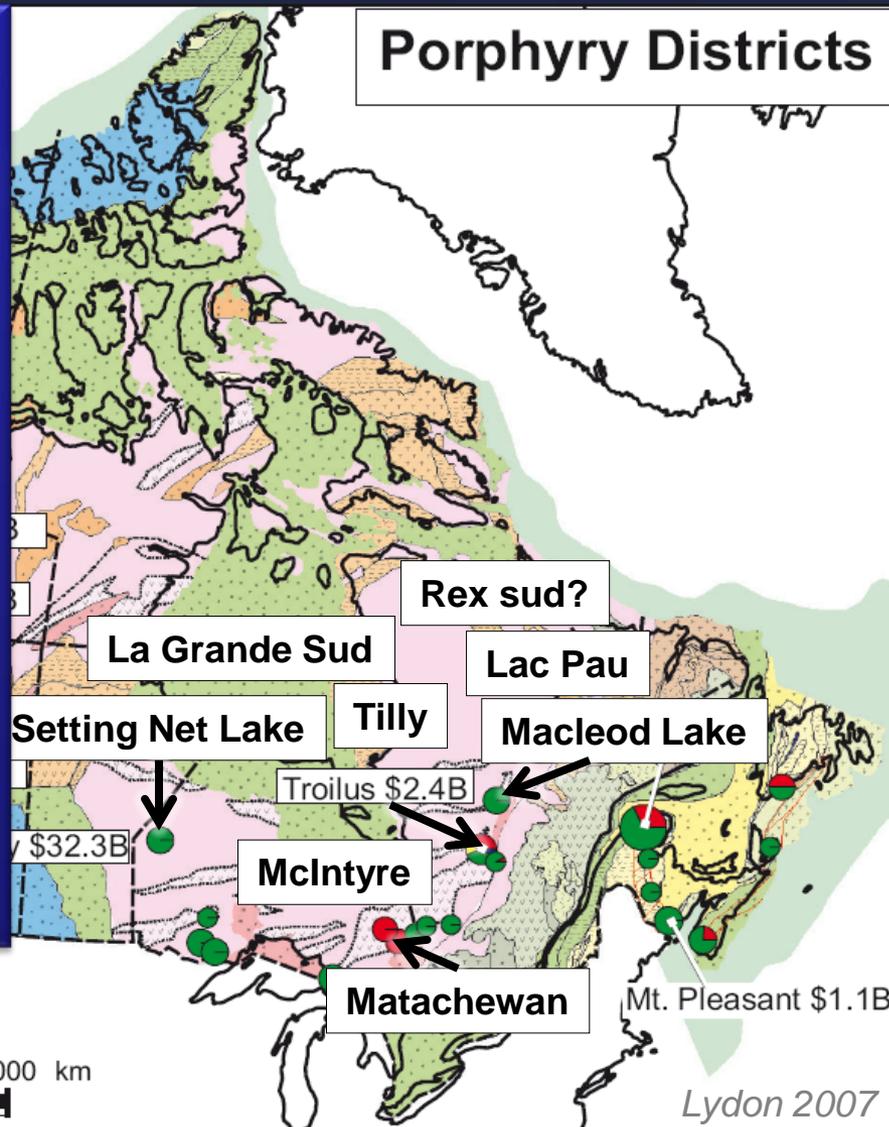
Chibougamau
 Launay
 Don Rouyn
 Malartic
 McIntyre, Pamour (Timmins)

Protérozoïque /Archéen- Monde

Aitik et Tallberg (Suède)

Copper King (Wyoming, US)
 Ylojarvi (Finlande)
 Gaoua et Goren (Burkina Faso)
 Malanjkhand (Indes)
 Tongkuangyu (Chine)
 Haib (Namibie)
 Ford (Zimbabwe)
 Boddington (Australie)
 Coppin Gap (Australie)

D'après Sinclair 2007 et USGS 2008



Objectifs

Comparer la géochimie de porphyres Cu-Au cénozoïques avec celle de porphyres minéralisés Cu-Au archéens et protérozoïques connus

Proposer une approche géochimique simple sous forme de limites et de ratios d'éléments majeurs et traces et évaluer la performance de ces indicateurs pour retenir que les éléments les plus discriminants (trouver une recette géochimique)

Automatisé la procédure dans le programme Lithomodeleur (v. 3.5) afin de faciliter le traitement des données lithogéochimiques en vrac

Trouver des suites magmatiques comparables à la chimie de porphyres minéralisés en Cu-Au et évaluer leur potentiel dans les terrains de haut grade métamorphique au Québec (Supérieur et Grenville)

Volet méthodologique 1

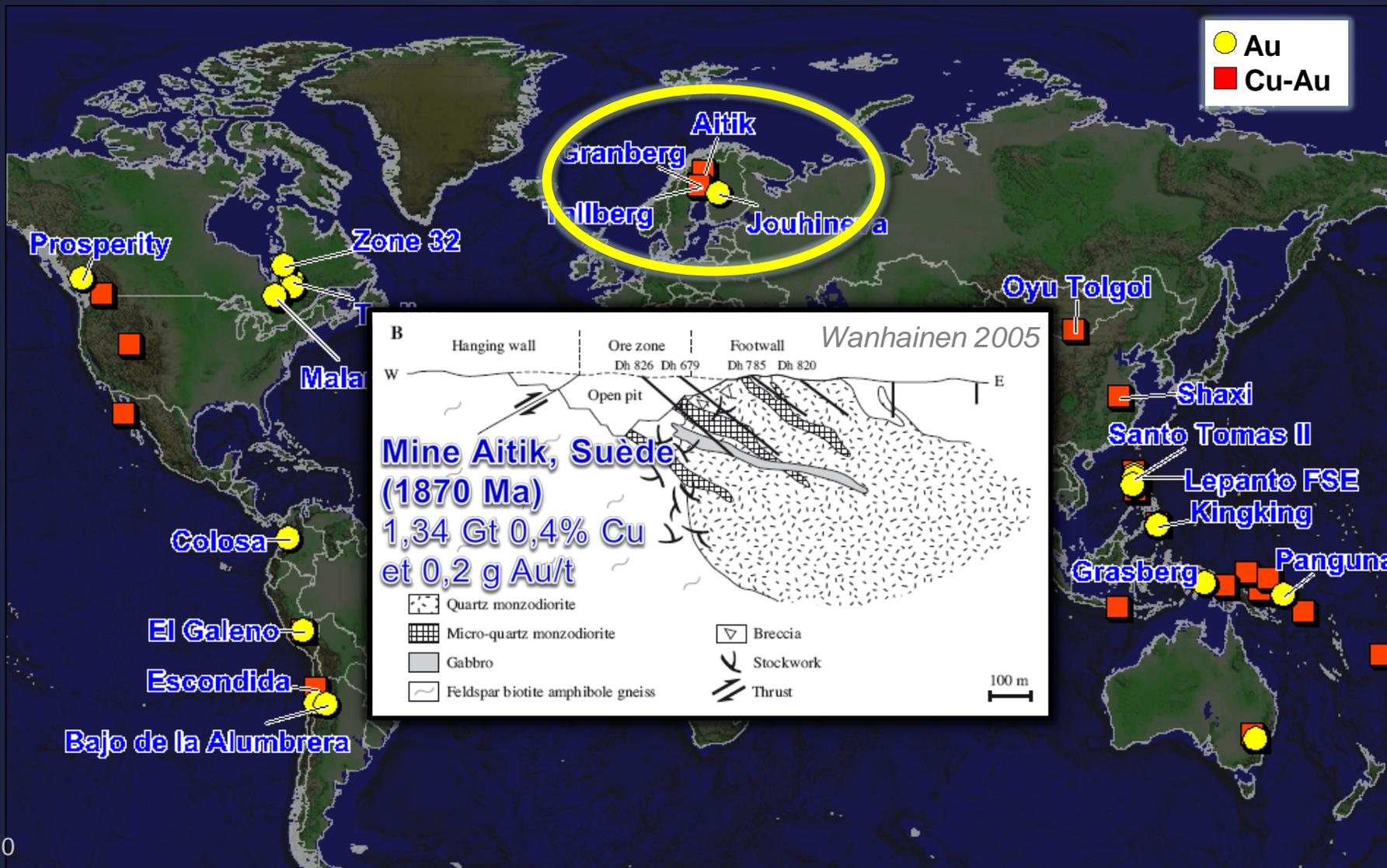
Banque de données de références

Identifier le nom des protolithes « frais »
de porphyres Cu-Au subalcalins

Géochimie des Porphyres Cu-Au

Compilation lithogéochimique de la littérature (41 publications) de porphyres à Cu-Au et Au de tous âges dans le monde

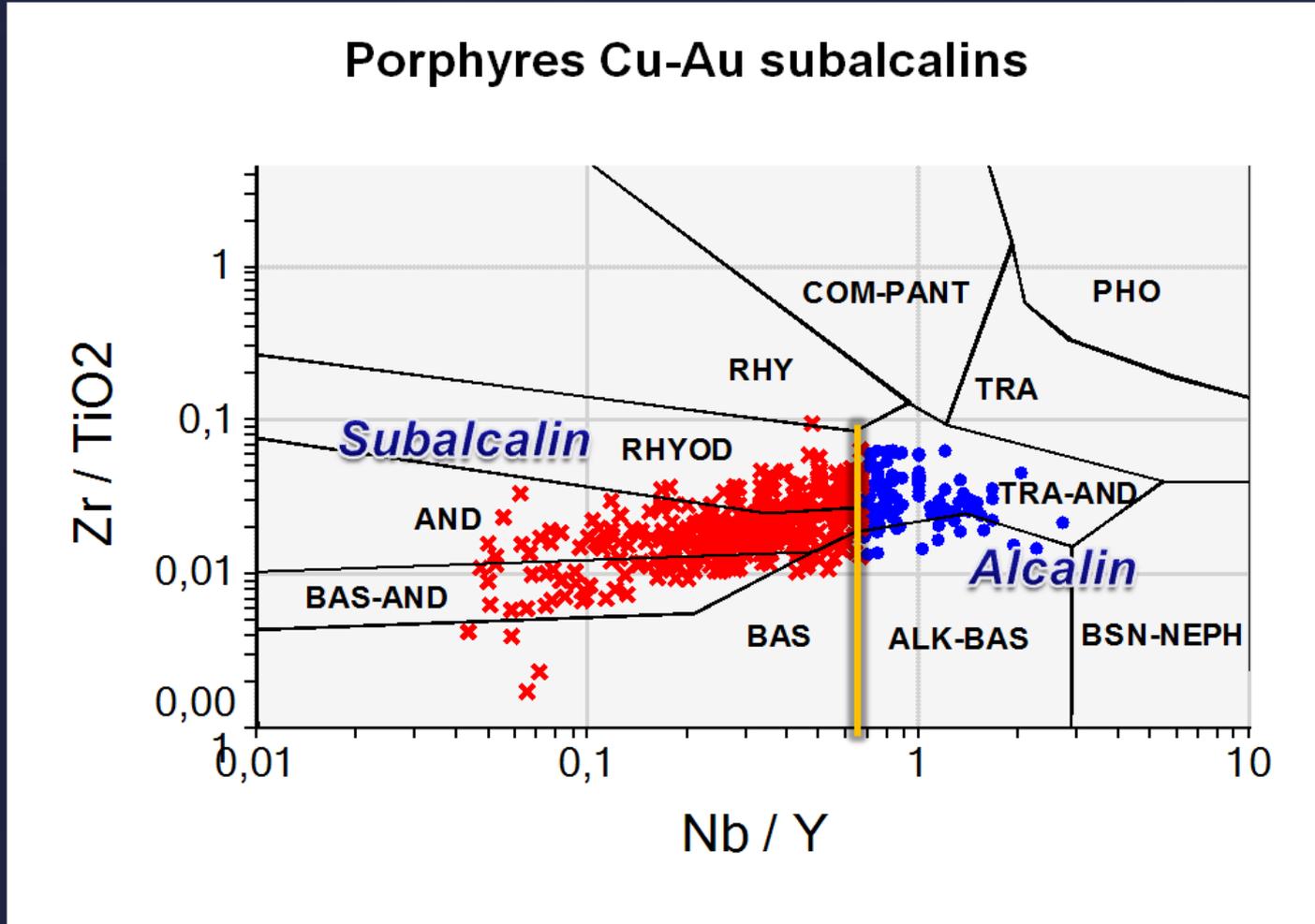
Banque de 639 échantillons lithogéochimiques de 60 gisements



Géochimie des Porphyres Cu-Au

Étape 1- Déterminer l'alcalinité (subalcalin vs alcalin) des porphyres

Éléments immobiles Nb/Y vs Zr/Ti (Winchester & Floyd et Pearce)

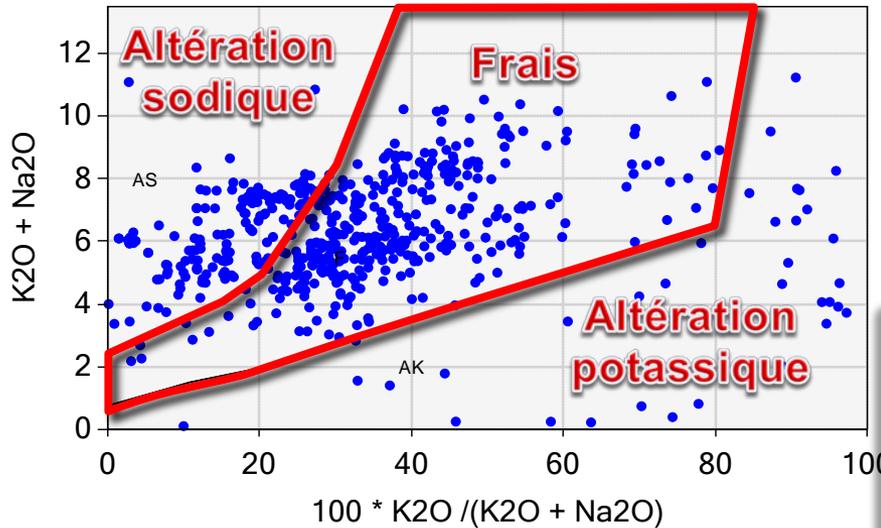


Géochimie des Porphyres Cu-Au subalcalins

Étape 2- Enlever l'effet de l'altération

Problème de classification géochimique : Altérations et les éléments majeurs

Diagramme de Hughes (1973, modifié) n=535

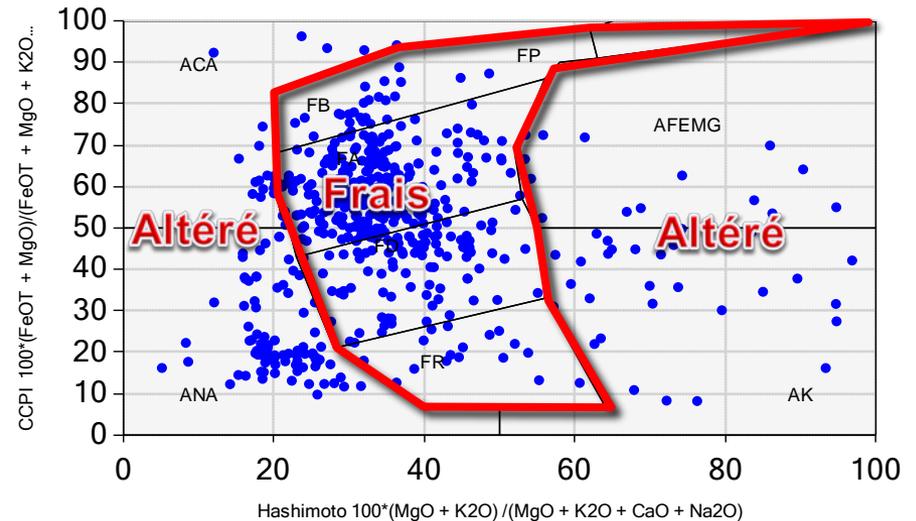


Roches ignées seulement. Champs ont été élargis vers les roches felsiques car des séries alcalines et certaines rhyolites fraîches se retrouvaient dans les champs altérés.

Entre 28 et 33% des échantillons de la banque Porphyres Cu-Au sont altérés (selon diagrammes de Hughes ou Box Plot)

Donc on ne peut nommer correctement le protolithe avec les oxydes majeurs (TAS Le Bas par ex.)

Alteration Box Plot (Large et al., 2001 modifié) n=534

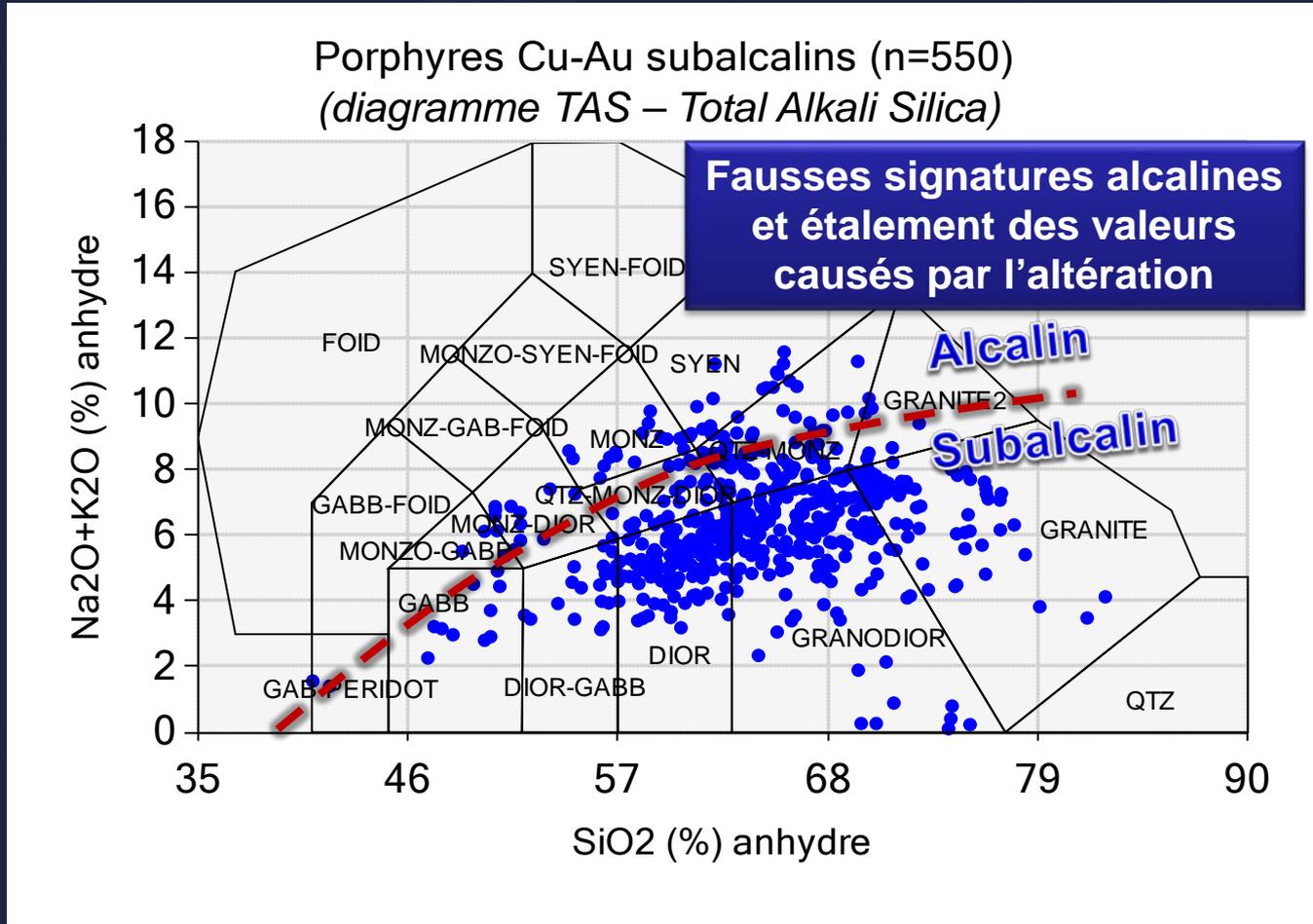


Roches ignées seulement. Les champs du diagramme ont été modifiés par rapport à l'original pour mieux correspondre au spectre de roches fraîches (incluant ultramafiques).

Géochimie des Porphyres Cu-Au subalcalins

Étape 2- Enlever l'effet de l'altération

Valeurs des oxydes mesurées sans traitement pour les intrusions subalcalines



Géochimie des Porphyres Cu-Au subalcalins

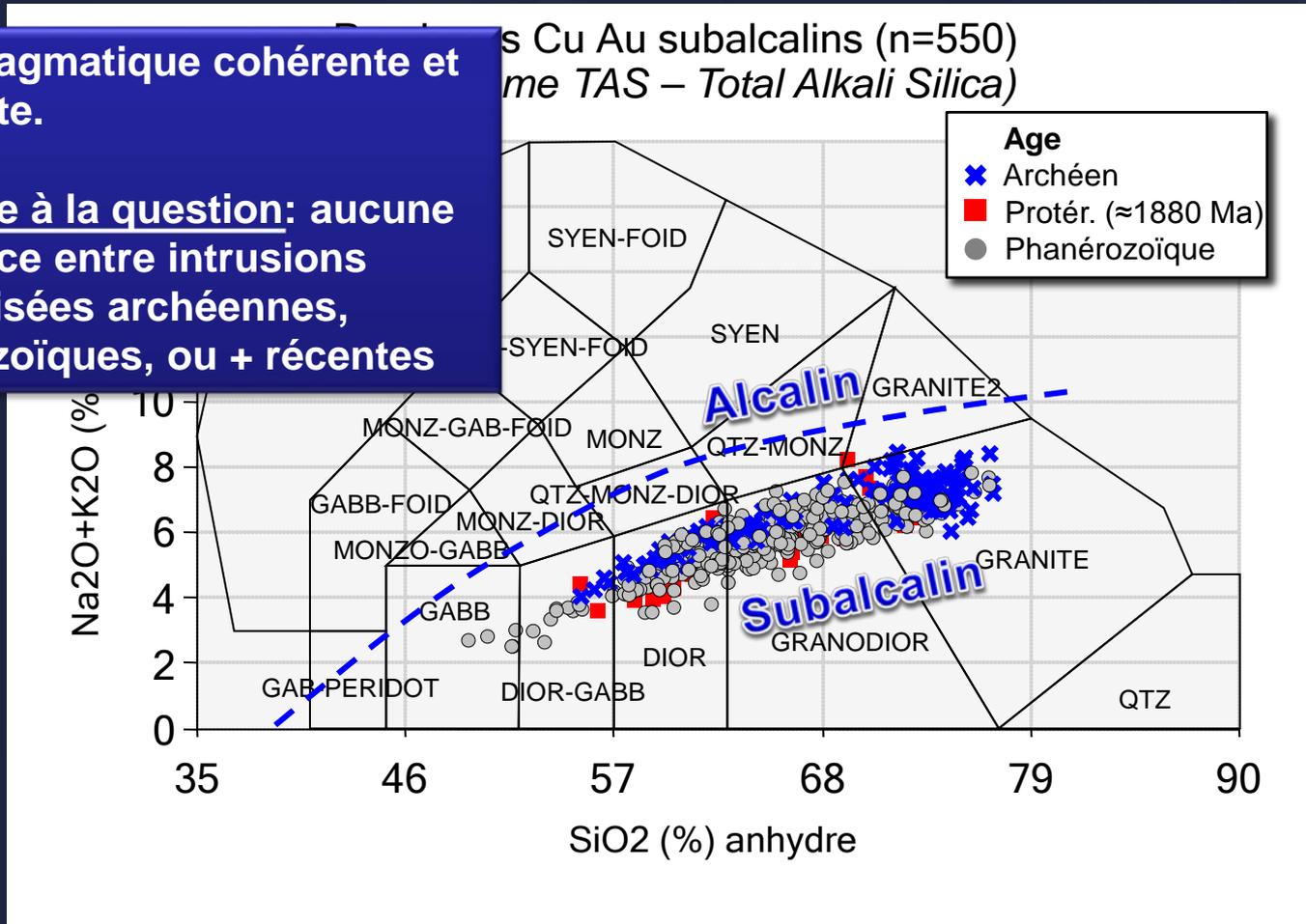
Étape 2- Enlever l'effet de l'altération

Calculer la valeur PRÉDITE des oxydes majeurs à l'aide des bilans de masse sur précurseurs modélisés* pour les intrusions subalcalines

Valeurs des oxydes prédites par BM sur précurseurs modélisés

Suite magmatique cohérente et restreinte.

Réponse à la question: aucune différence entre intrusions minéralisées archéennes, protérozoïques, ou + récentes



*programme Lithomodeleur (v 3.5)

Géochimie des Porphyres Cu-Au subalcalins

Synthèse des valeurs min. & max. pour les éléments majeurs des échantillons frais ou prédits par BM (début de la recette!)

Filter Critère 1 pour les porphyres Cu-Au

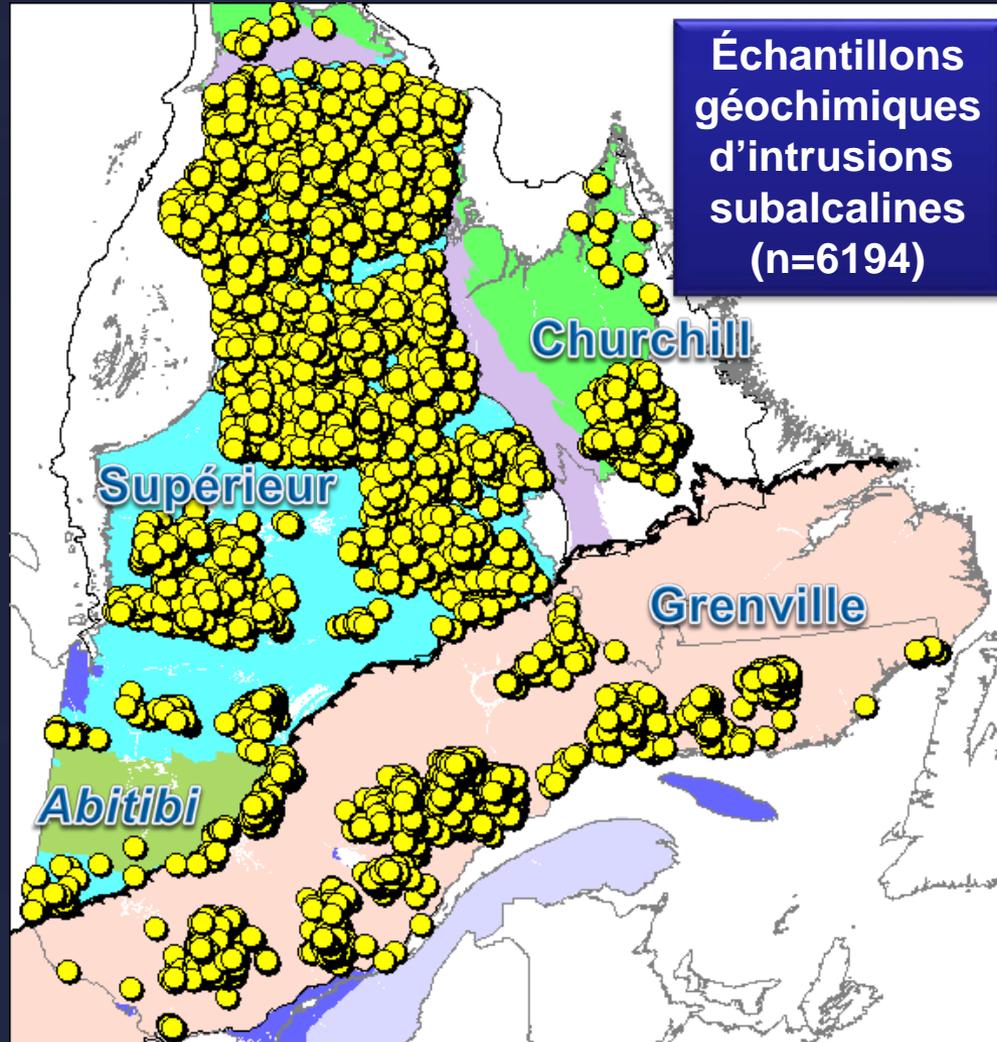
Valeur prédite/frais	Minimum (%)	Maximum (%)
SiO ₂	54	74
Al ₂ O ₃ (immobile, valeur brute)	10	21
K ₂ O	0,9	4
CaO	0,3	9
Na ₂ O	2,5	5,5
MgO	0,5	6,5
Fe ₂ O ₃ T	1,0	9,0
TiO ₂	0	1,0
P ₂ O ₅ (valeur brute)	0	0,5
MnO (valeur brute)	0	0,5

Volet méthodologique 2

Isoler les éléments traces et ÉTR
clés permettant de reconnaître la
signature de Porphyres Cu-Au
dans le SIGEOM

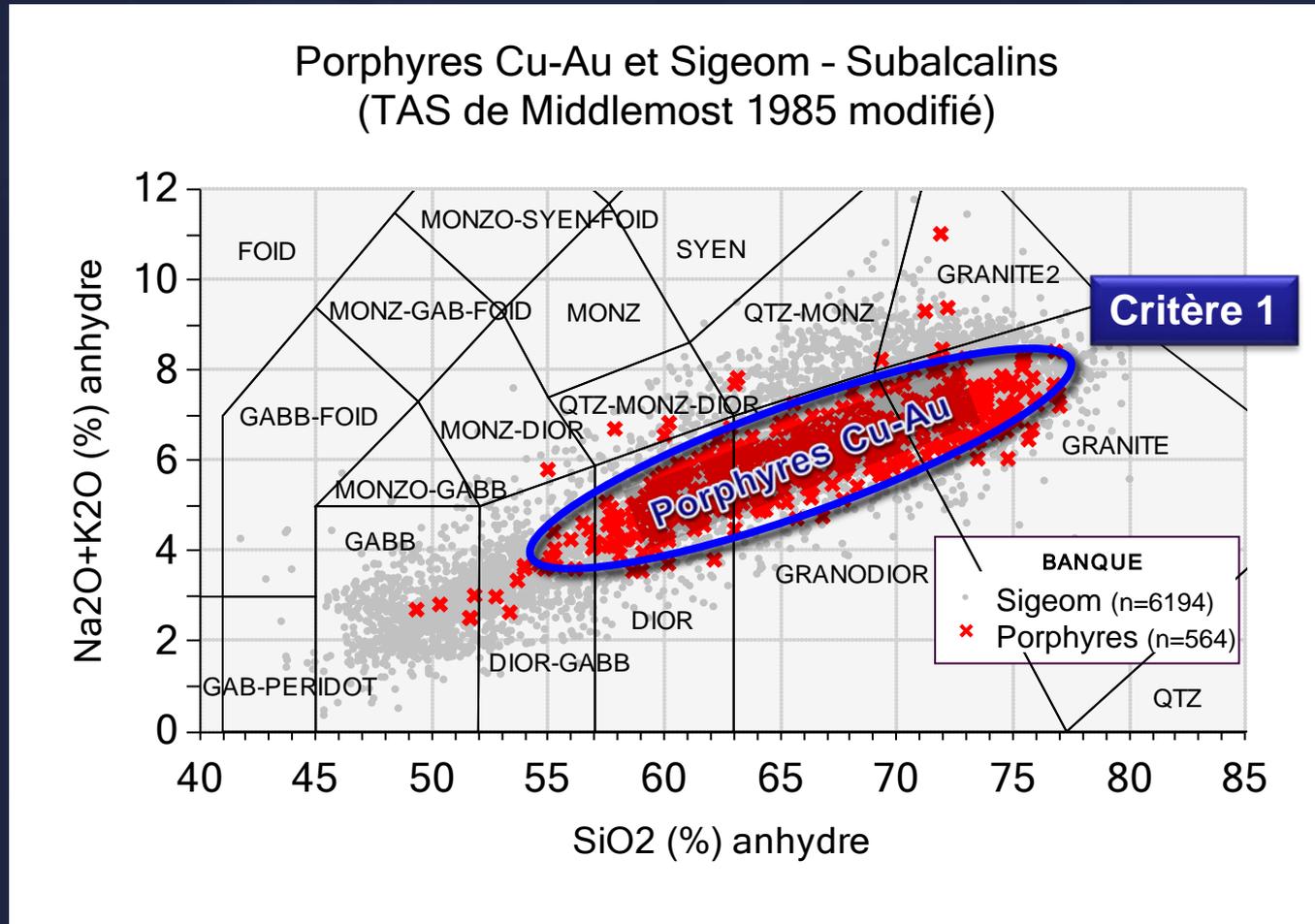
Méthodologie

Reconnaître la signature géochimique des porphyres Cu-Au subalcalins dans la banque d'intrusions mafiques à felsiques du Sigeom par des critères géochimiques discriminants



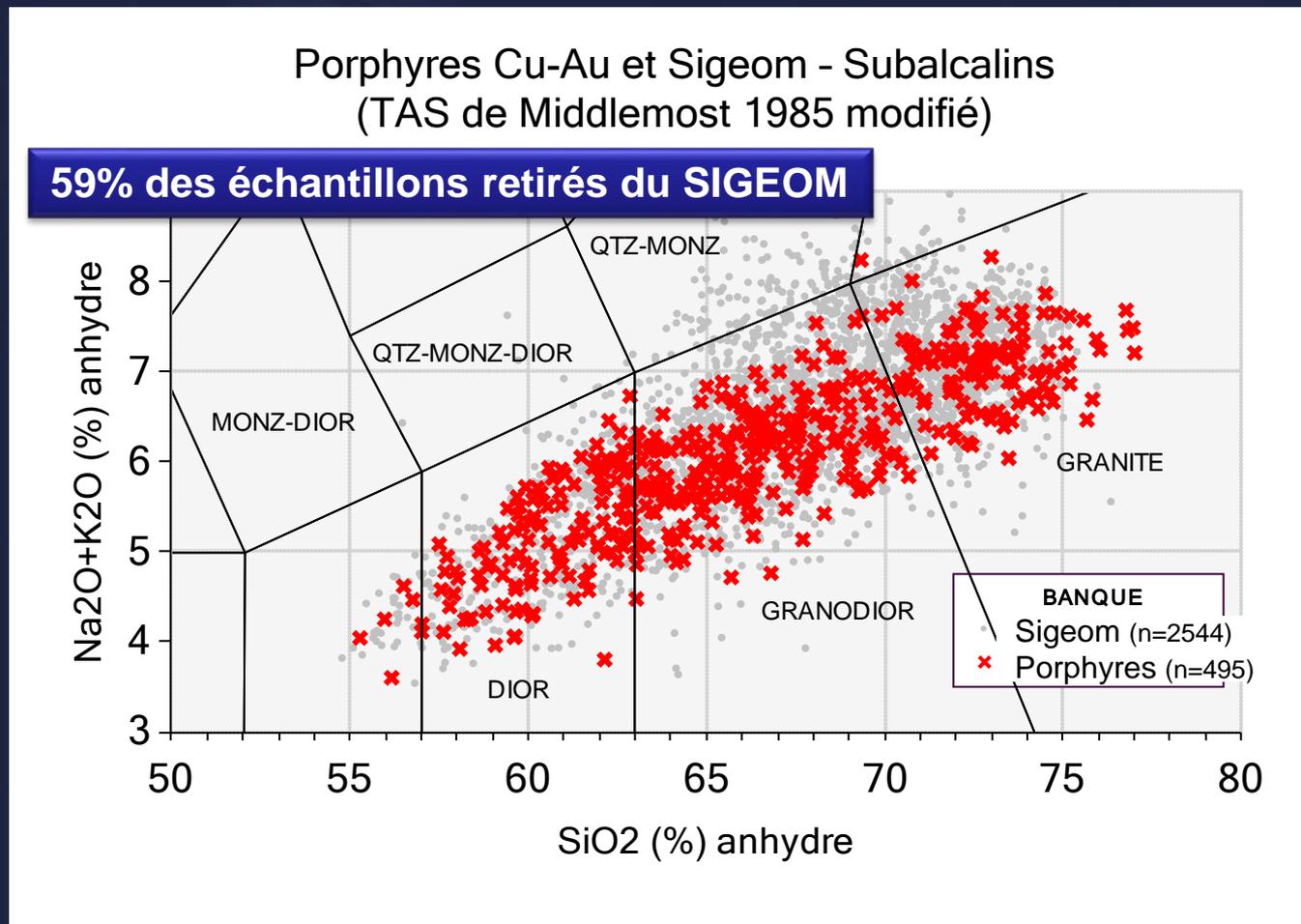
Comparaison entre banques Porphyres Cu-Au et intrusions SIGEOM

Valeurs oxydes d'échantillons frais ou prédites par BM sur précurseurs modélisés pour l'ensemble des intrusions subcalines du Sigeom et des porphyres Cu-Au



Comparaison entre banques Porphyres Cu-Au et intrusions SIGEOM

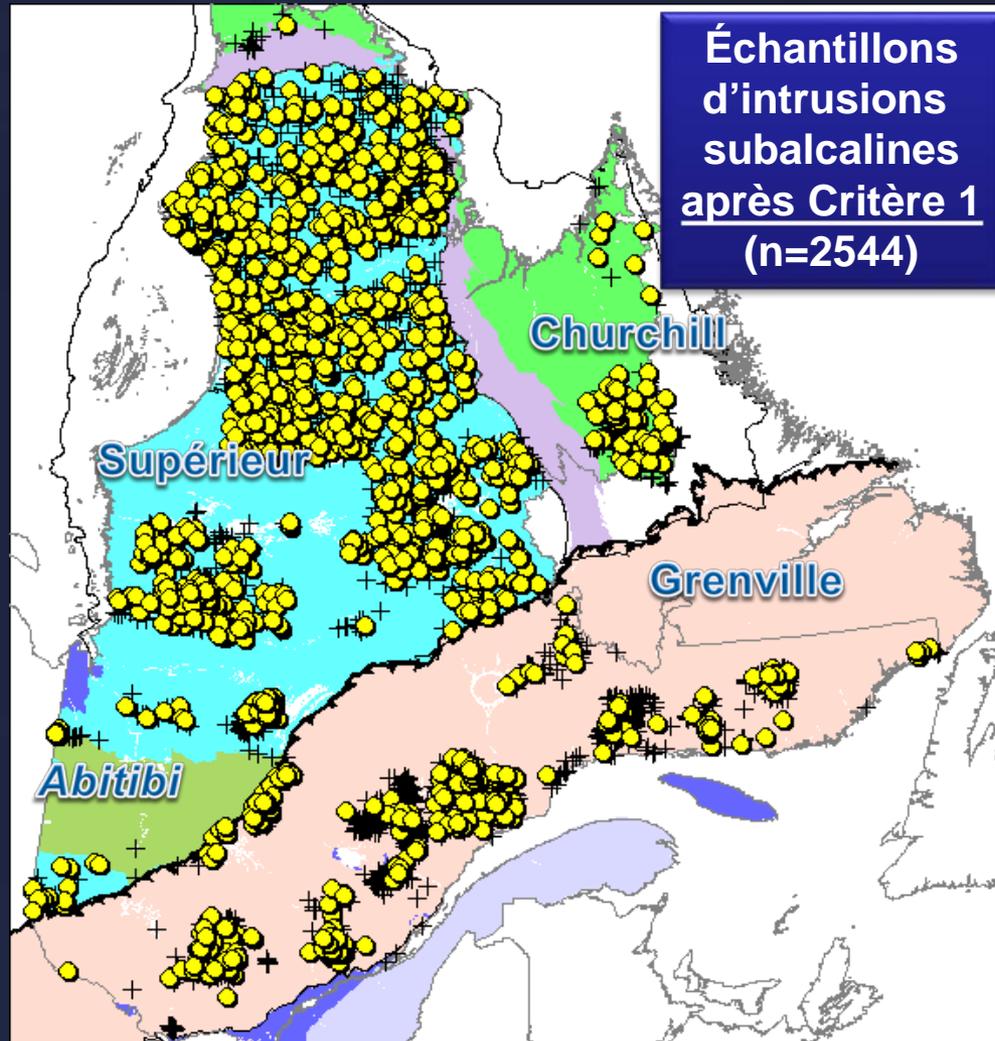
Valeurs oxydes d'échantillons frais ou prédites par BM sur précurseurs modélisés pour intrusions subcalines du Sigeom et des porphyres Cu-Au avec le Critère 1



Filter du Critère 1 (valeurs prédites des oxydes en %): SiO₂ ≥54 ≤74; Al₂O₃ ≥10 ≤21; K₂O ≥0.9 ≤4; CaO ≥0.3 ≤9; Na₂O ≥2.5 ≤5.5; MgO ≥0.5 ≤6.5; Fe₂O₃T ≥1 ≤9; TiO₂ ≤1; P₂O₅ & MnO ≤0.5

Résultats de ciblage – Porphyres Cu-Au

Distribution des intrusions mafiques à felsiques subalcalines du Sigeom dans les provinces de Supérieur (sauf Abitibi) et de Grenville APRÈS AVOIR APPLIQUÉ LE FILTRE DU **CRITÈRE 1**

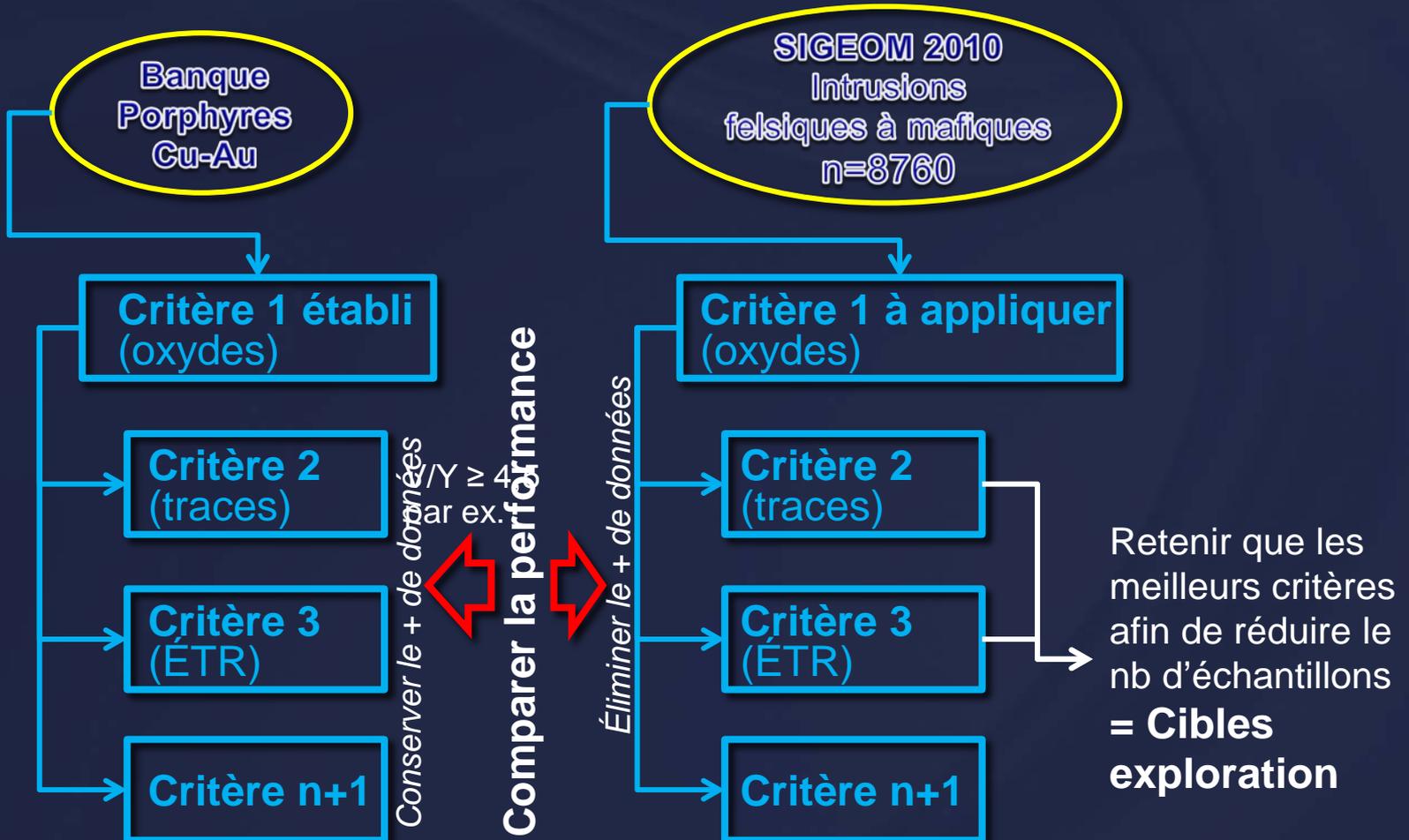


Méthodologie

Reconnaître la signature géochimique des porphyres Cu-Au subalcalins dans la banque d'intrusions mafiques à felsiques du Sigeom par des critères géochimiques discriminants

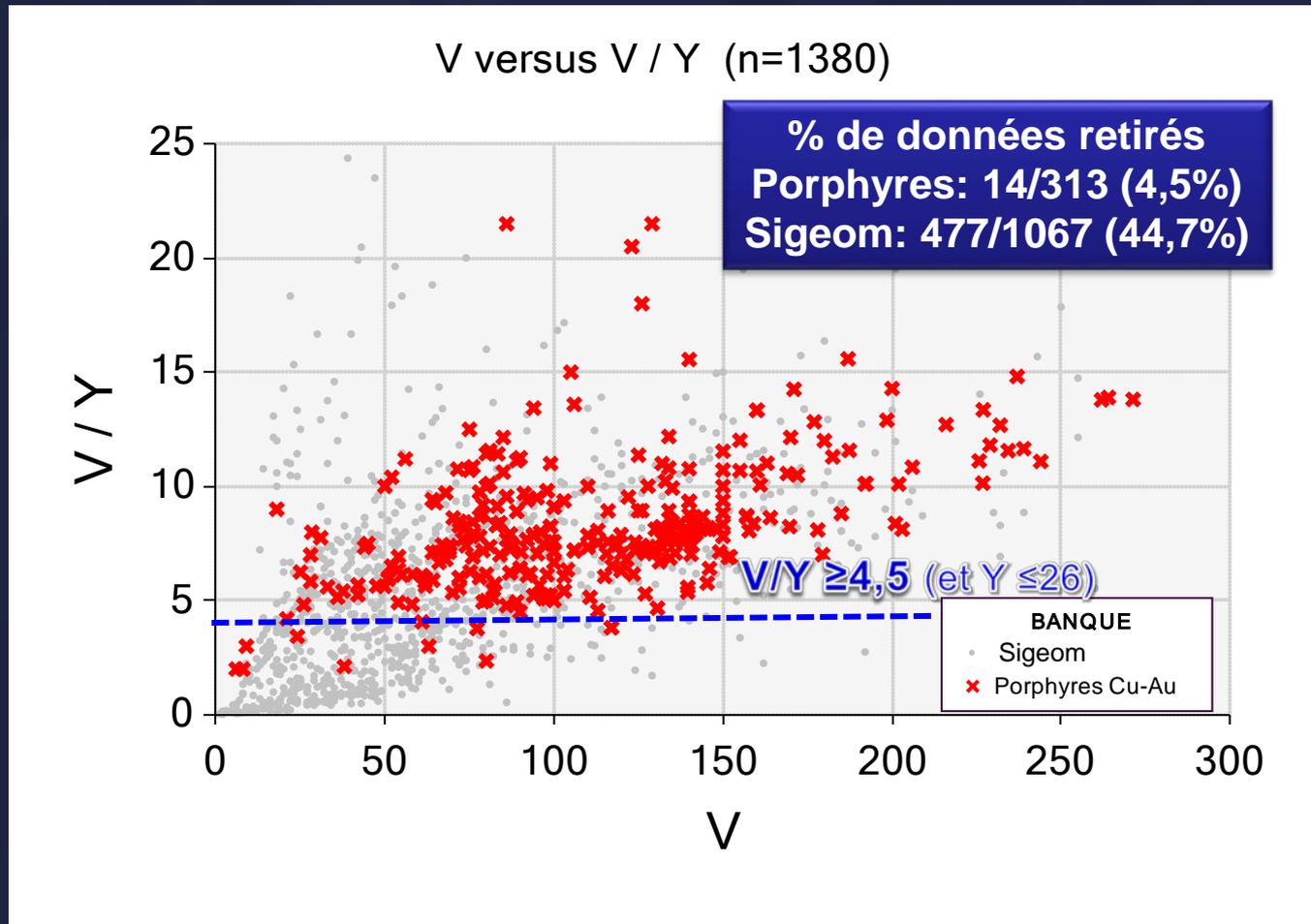
Porphyres Cu-Au fertiles

Fertilité inconnue



Comparaison entre banques Porphyres Cu-Au et intrusions SIGEOM

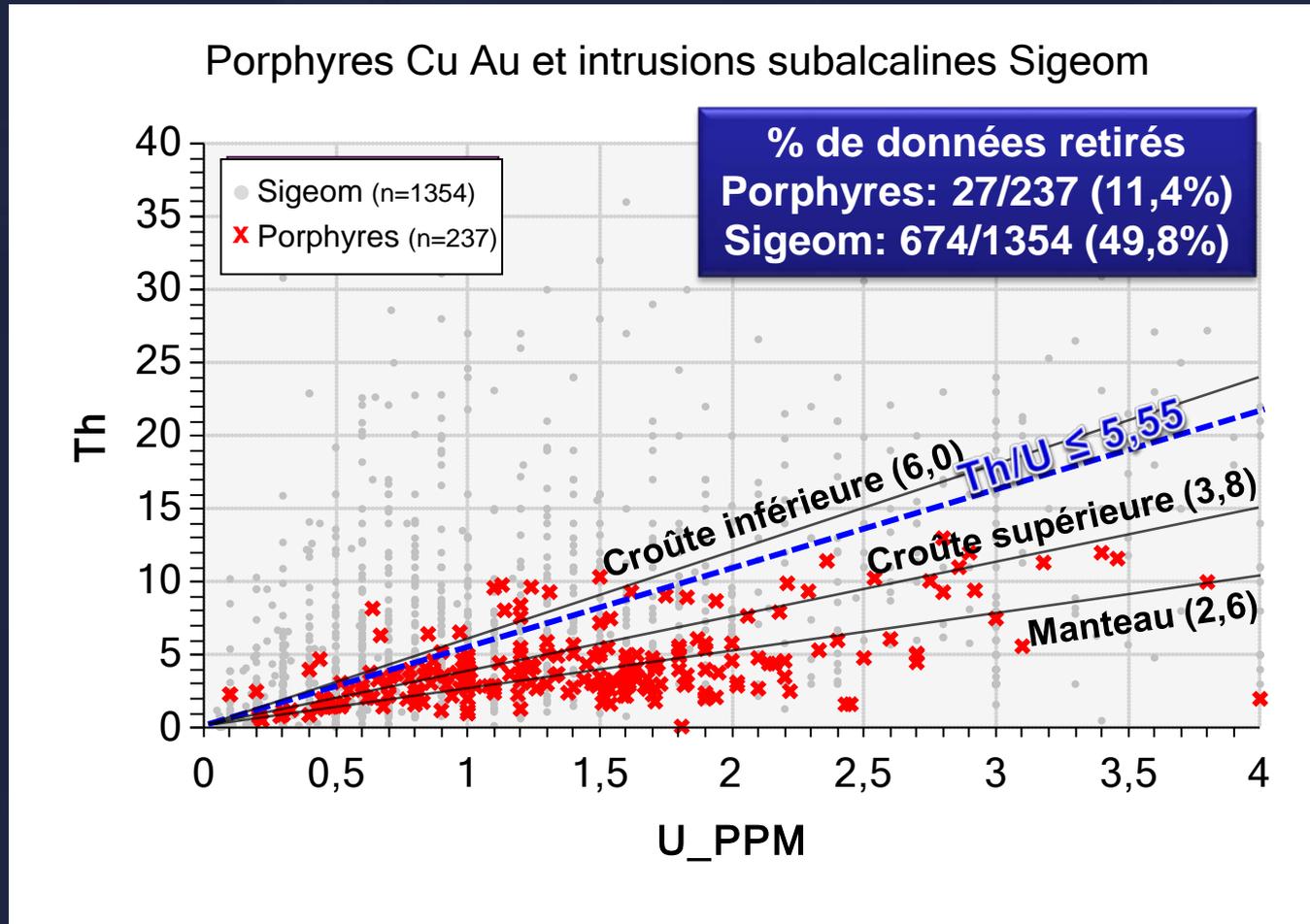
Exemple d'un critère et diagramme discriminant avec éléments traces
(après avoir appliqué le Critère 1)



Ratio V/Y élevé = probablement substitution V^{3+} avec Fe^{3+} dans la magnétite
 = magma oxydé (critère favorable)

Comparaison entre banques Porphyres Cu-Au et intrusions SIGEOM

Exemple d'un critère et diagramme discriminant avec éléments traces
(après avoir appliqué le Critère 1)



Valeurs U/Th d'après Rudnick et Gao 2004

Géochimie des Porphyres Cu-Au subalcalins

Sommaire des critères et performance des indices géochimiques

No	Critère discriminant	Banque Porphyres Cu-Au		Banque Sigeom 2010	
		Données retirées/Total	% données retirées	Données retirées/Total	% données retirées
	Intrusions subalcalines au départ ▶	560	0,0%	6204	0,0%
	<i>Critère sur la base des Oxydes (prédits ou frais)</i>				
1	SiO₂ ≥54 ≤74; Al₂O₃ ≥10 ≤21; K₂O ≥0,9 ≤4; CaO ≥0,3 ≤9 etc...	61/550	11,1%	3660/6204	59,0%
	<i>Éléments traces</i>				
2	V/Y ≥4,5 et Y ≤26	14/313	4,5%	477/1067	44,7%
3	Th ≥0,5 ≤10 et Hf ≥1,5 ≤4,5	16/207	7,7%	637/1202	53,0%
4	Th/Ta ≥2 ≤21 et Th ≤12 et Ta ≤1,8	14/165	8,5%	636/1193	53,3%
5	Y/Sr ≤0,11 et Y ≥2,5 ≤22	32/495	6,5%	642/2145	29,9%
6	Th/Co ≤1,3 et Co ≤30 Th ≤12	14/211	6,6%	387/1275	30,4%
7	Zr ≤ 180 et Y ≥2,5 ≤22	39/495	7,9%	847/2193	38,6%
8	Sc/Th ≤8 et Th ≤12	17/192	8,9%	589/1701	34,6%
9	Nb/Sr ≤0,025	43/480	9,0%	659/2113	31,2%
10	Nb/Zr ≤ 0,09 et Zr ≤200	43/480	9,0%	649/2113	30,7%
11	Th/U ≤5,55 et U ≤4 Th ≤12	27/237	11,4%	674/1354	49,8%
	<i>Éléments Terres Rares</i>				
12	Sm/Yb ≥1 ≤5 et Sm ≤6 Yb ≤2,5	20/247	8,1%	661/1177	56,2%
13	Ce/Yb ≤60 et Yb ≥0,4 ≤2,5 Ce ≤60	23/247	9,3%	795/1173	67,8%
14	Nd/Th ≤11 et Th ≤9 Nd ≤25	22/216	10,2%	905/1415	64,0%
15	La/Yb ≤35 et Yb ≥0,4 ≤2,5 La ≤27	27/247	10,9%	811/1176	69,0%
16	La/Sm ≥2 ≤8 et Sm ≤6 La ≤27	28/248	11,3%	1056/1541	68,5%
17	La/Hf ≤9 et La ≤27 Hf ≥1,5 ≤5	25/207	12,1%	763/1207	63,2%
18	Eu_n/Eu* ≥0,8 ≤1,2	25/218	11,5%	384/750	51,2%
	<i>Indices composites</i>				
19	Critères 1+2+3+4 (Éléments Traces)	20/142	14,1%	452/618	73,1%
20	Critères 1+12+16 (Terres Rares I)	41/247	16,6%	878/1176	74,7%
21	Critères 1+12+13+14+15+16 (Terres Rares II)	44/200	22,0%	989/1110	89,1%
22	Critères 1+2+3+4+12+13+14+15+16 (Traces et ÉTR)	34/142	23,9%	573/611	93,8%

Géochimie des Porphyres Cu-Au subalcalins

Outils de transfert et approche améliorée dans un programme de traitements géochimiques:

Procédure améliorée dans **Lithomodeleur** (Fait par **Sylvain Trépanier**) afin de traiter n'importe quelles intrusions sans « se taper la procédure décrite »

Fonctionne par réseaux neuronaux sur la base d'éléments et ratios les plus performants du critère 22: V, Y, Th, Hf, Ta, Sm, Yb, Ce, Nd, La, V/Y, Th/Ta, Sm/Yb, Ce/Yb, Nd/Th, La/Yb, La/Sm, La/Hf

MAIS NE TIENT PAS COMPTE DES LIMITES ÉTABLIES PRÉCÉDEMMENT, c'est le réseau qui fait le travail! N'est pas une équation linéaire.

En résumé: 2 approches pour le ciblage régional

Ratios d'éléments du critère 22

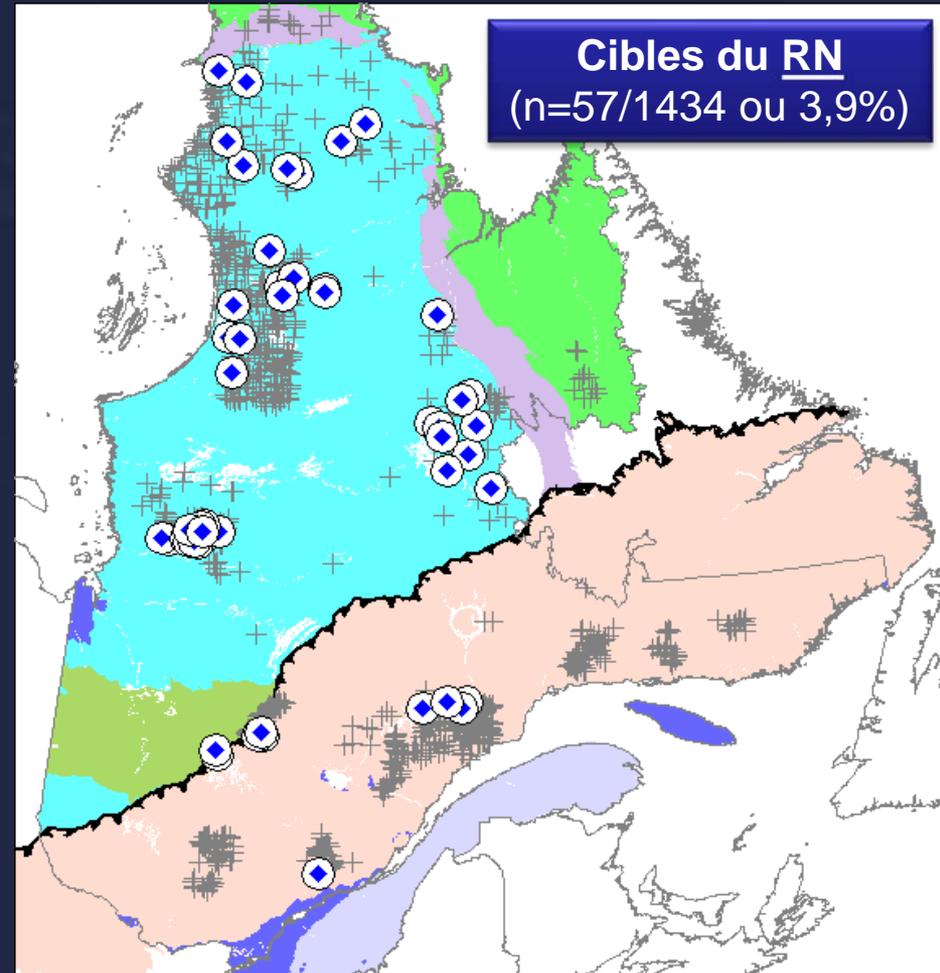
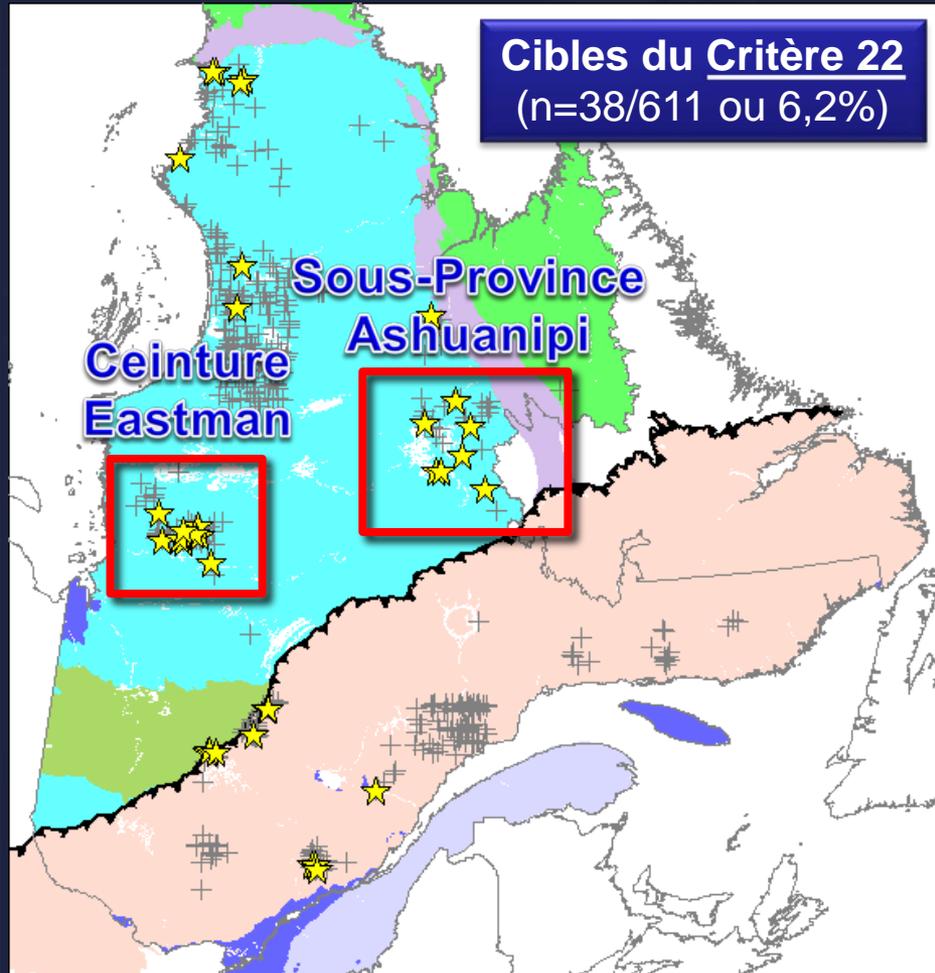
Réseau de neurones dans Lithomodeleur

**Résultat de ciblage
Porphyres Cu-Au
dans les terrains de haut grade**

Provinces Supérieur et Grenville

Résultats de ciblage – Porphyres Cu-Au

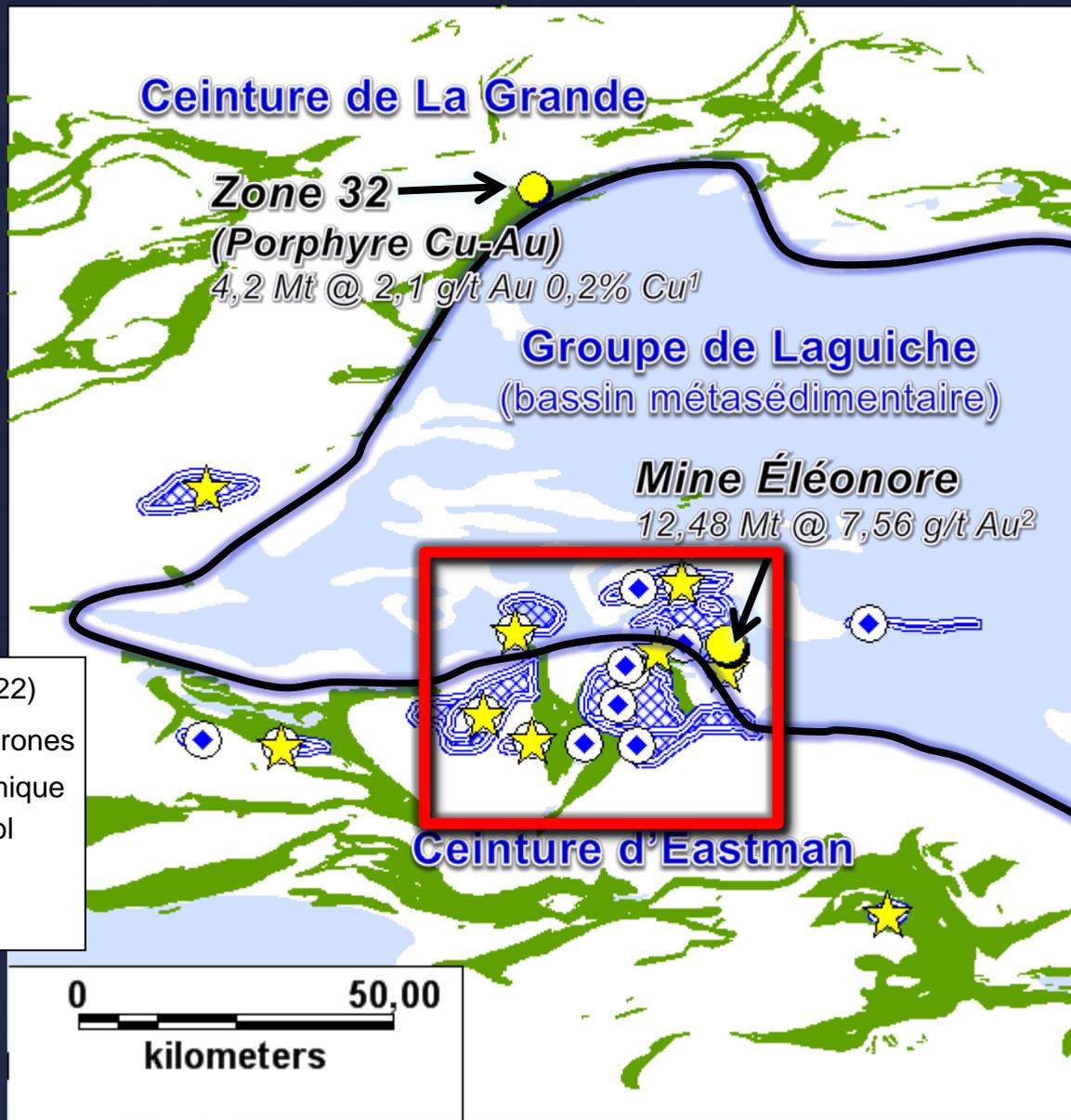
Comparaison des cibles entre le Critère 22 et le modèle réseau de neurones (RN)





Résultats de ciblage – Porphyres Cu-Au

Distribution des échantillons dans la ceinture d'Eastmain

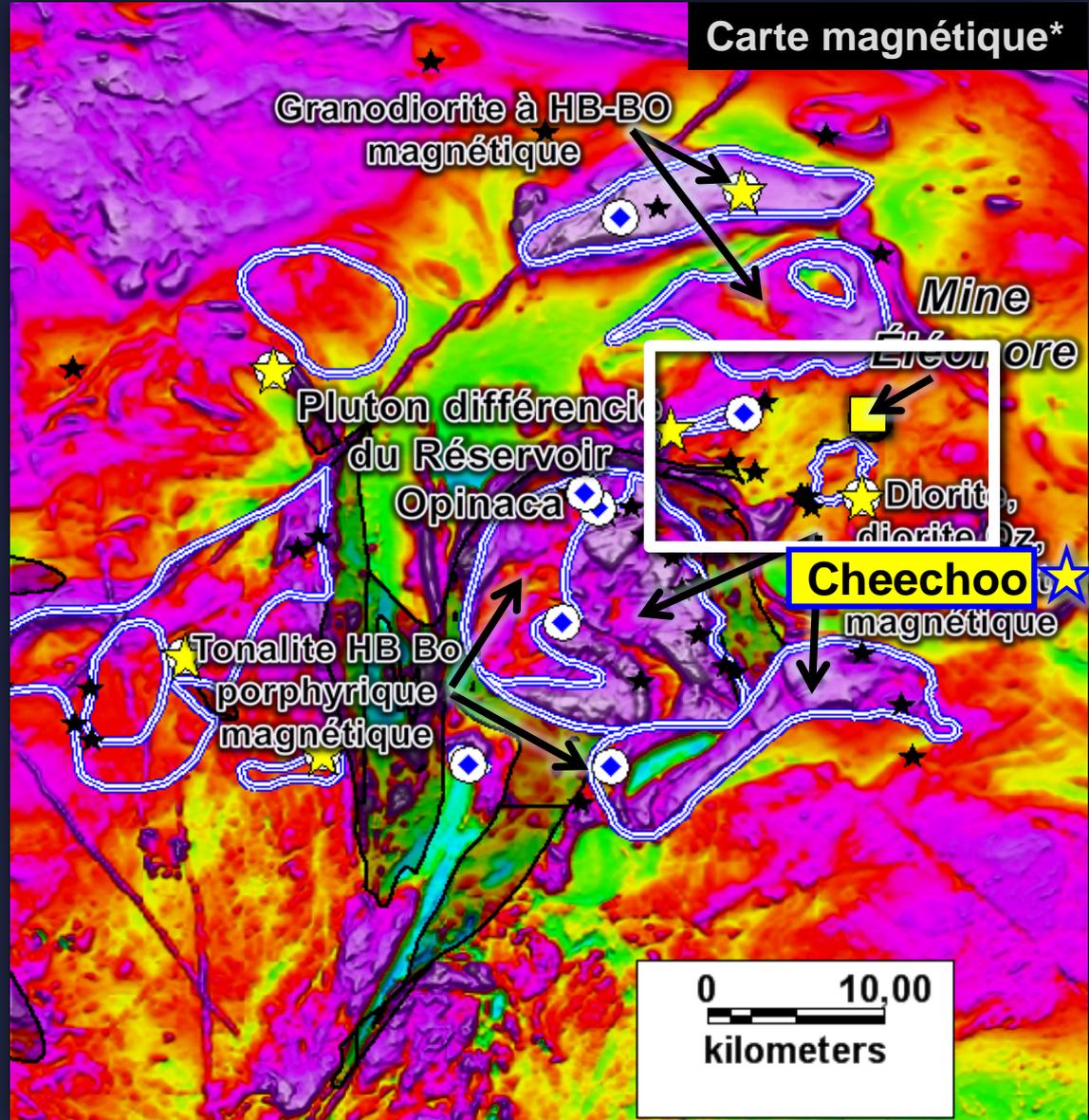
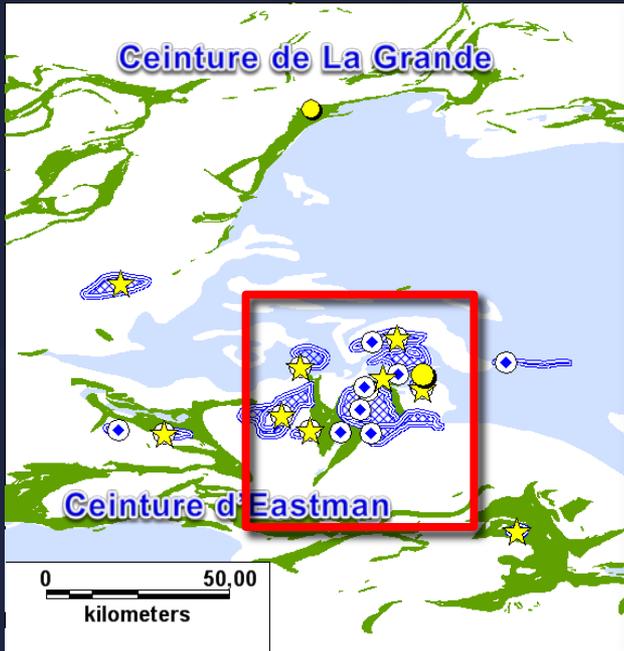


- Cible Porphyre (critère 22)
- Cible Porphyre ResNeurones
- Échantillon lithogéochimique
- Intrusion de la carte géol interprétée fertile
- Gîte d'or

1-Mercier-Langevin et al. 2012
 2-GoldCorp 2011

Résultats de ciblage – Porphyres Cu-Au

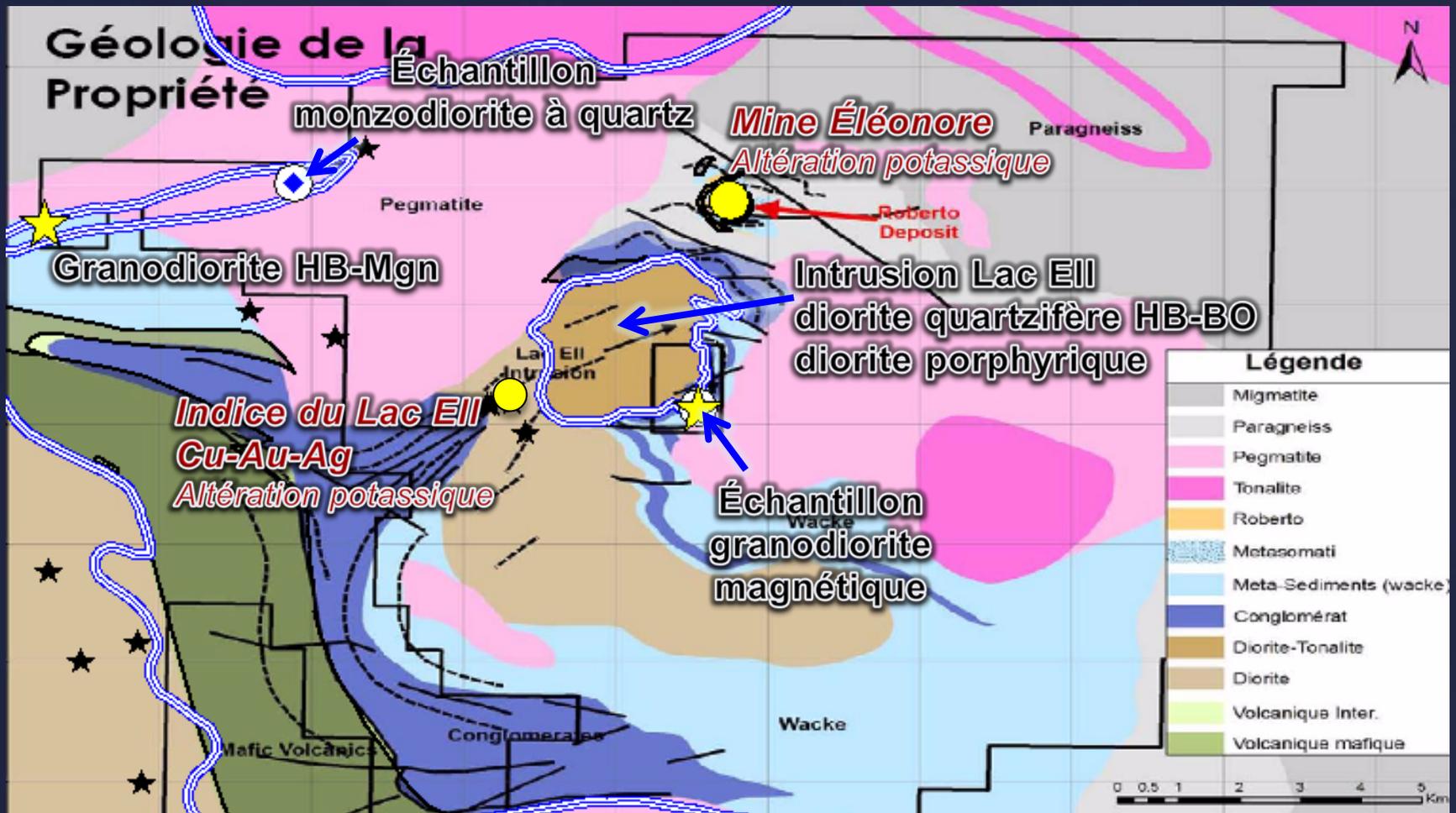
Distribution des échantillons dans la ceinture d'Eastmain



- ★ Cible Porphyre (critère 22)
- ◊ Cible Porphyre ResNeurones
- ★ Échantillon lithogéochimique
- ▣ Intrusion interprétée fertile

Résultats de ciblage – Porphyres Cu-Au

Distribution des échantillons dans la ceinture d'Eastmain

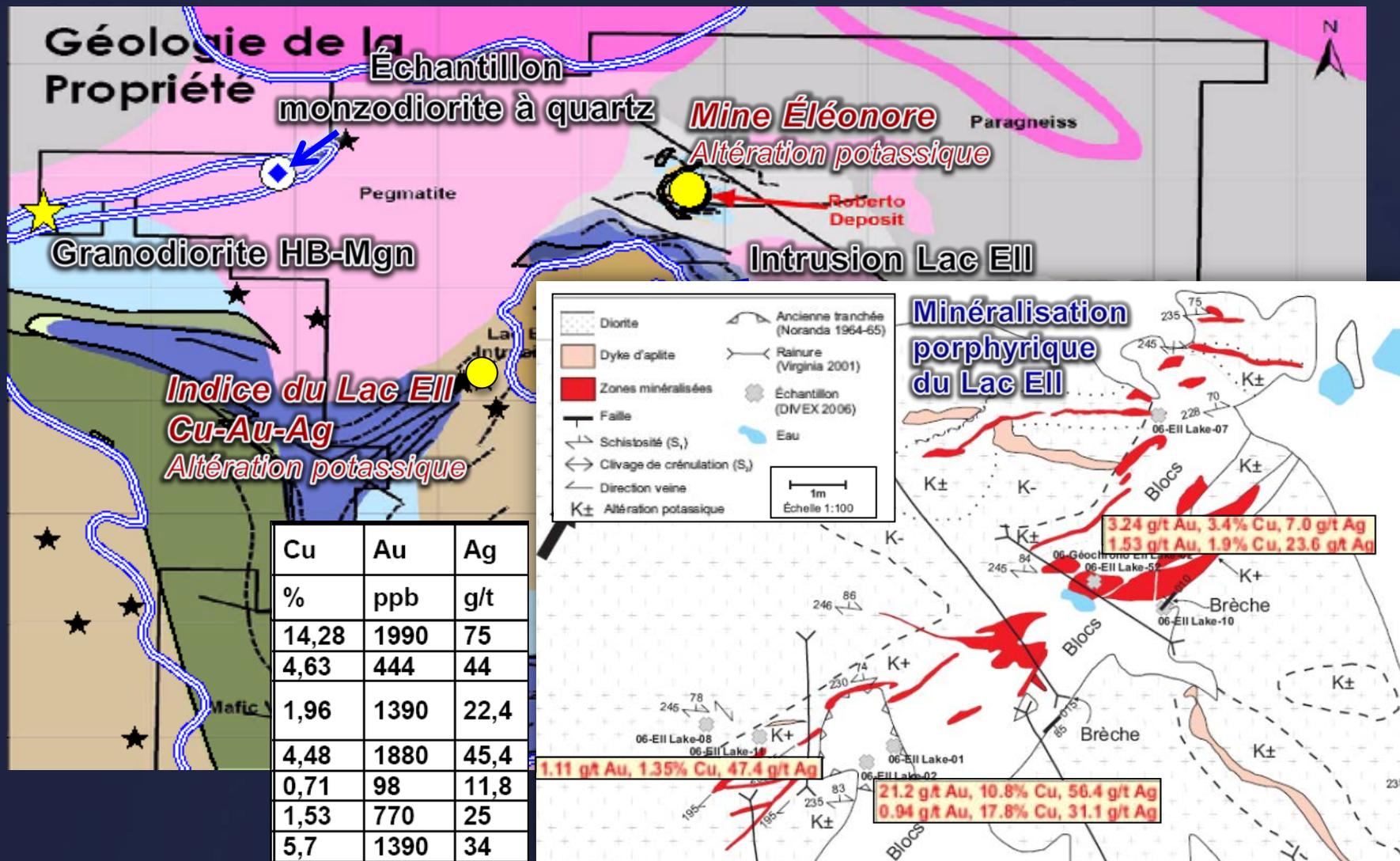


Goldcorp, 2007

Bécu et al. 2007

Résultats de ciblage – Porphyres Cu-Au

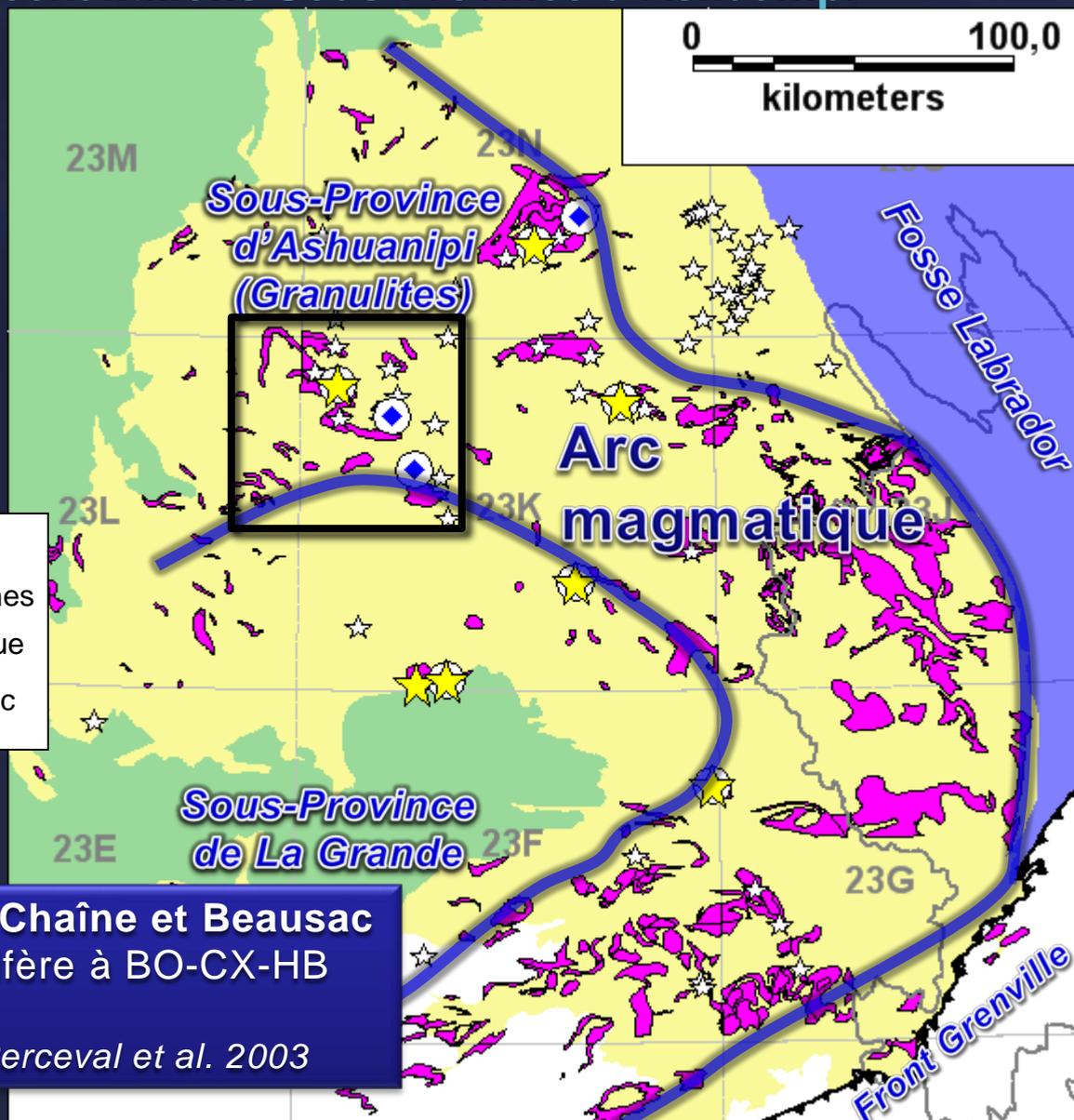
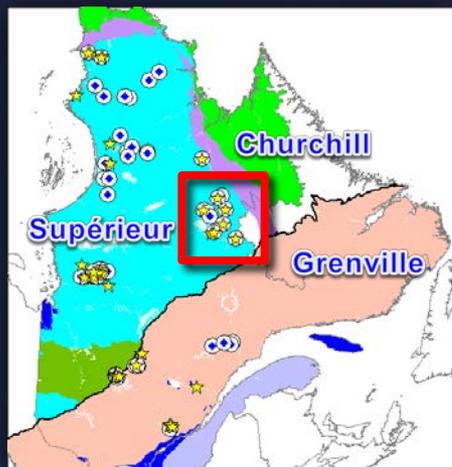
Distribution des échantillons dans la ceinture d'Eastmain



Bécu et al. 2007

Résultats de ciblage – Porphyres Cu-Au

Distribution des échantillons Sous-Province d'Ashuanipi

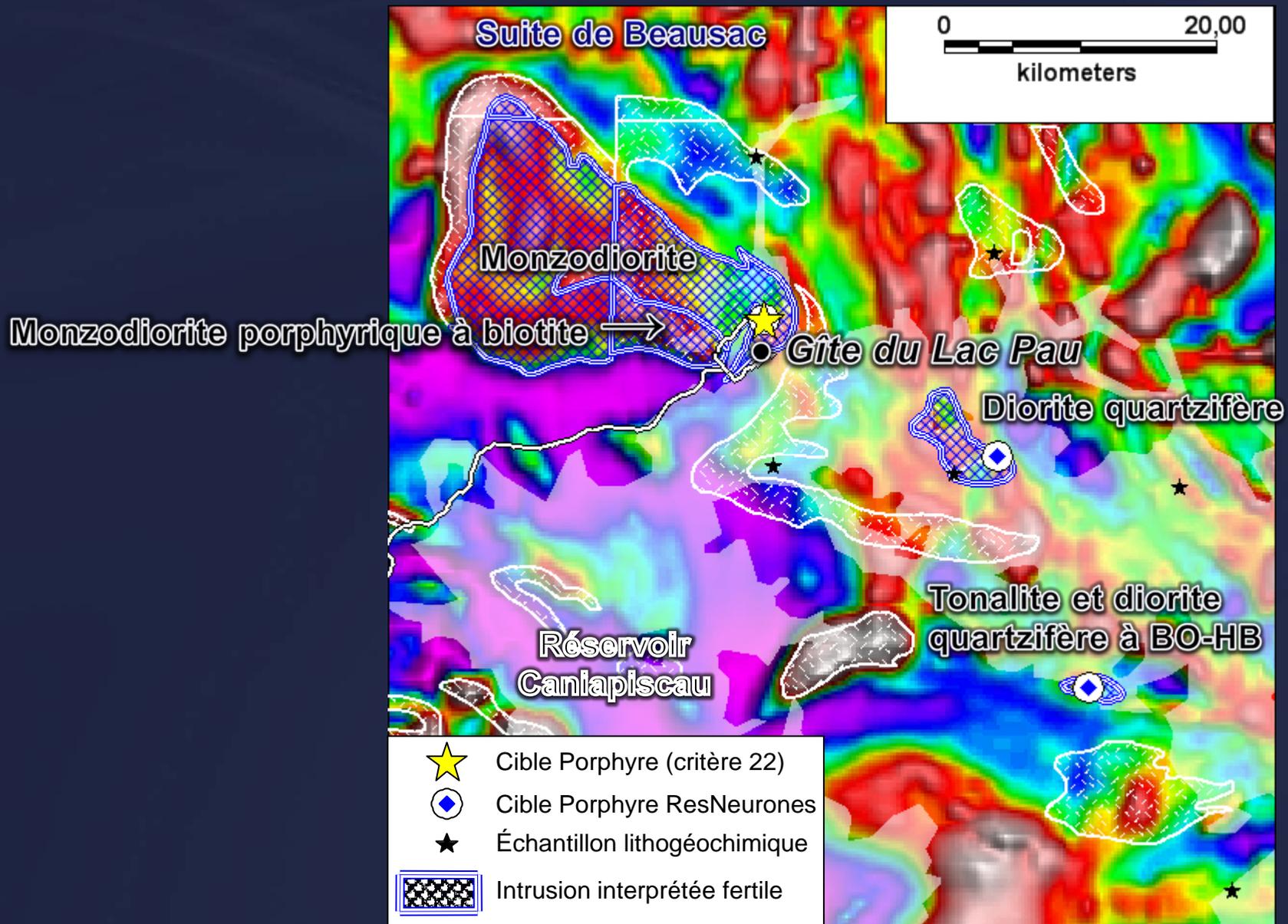


-  Cible Porphyre (critère 22)
-  Cible Porphyre ResNeurones
-  Échantillon lithogéochimique
-  Suites Desbiens & Beausac

Suites de Desliens, La Chaîne et Beausac
 Tonalite et diorite quartzifère à BO-CX-HB
 (apatite et magnétite)
 REF: Lamothe et al 2000; Perceval et al. 2003

Résultats de ciblage – Porphyres Cu-Au

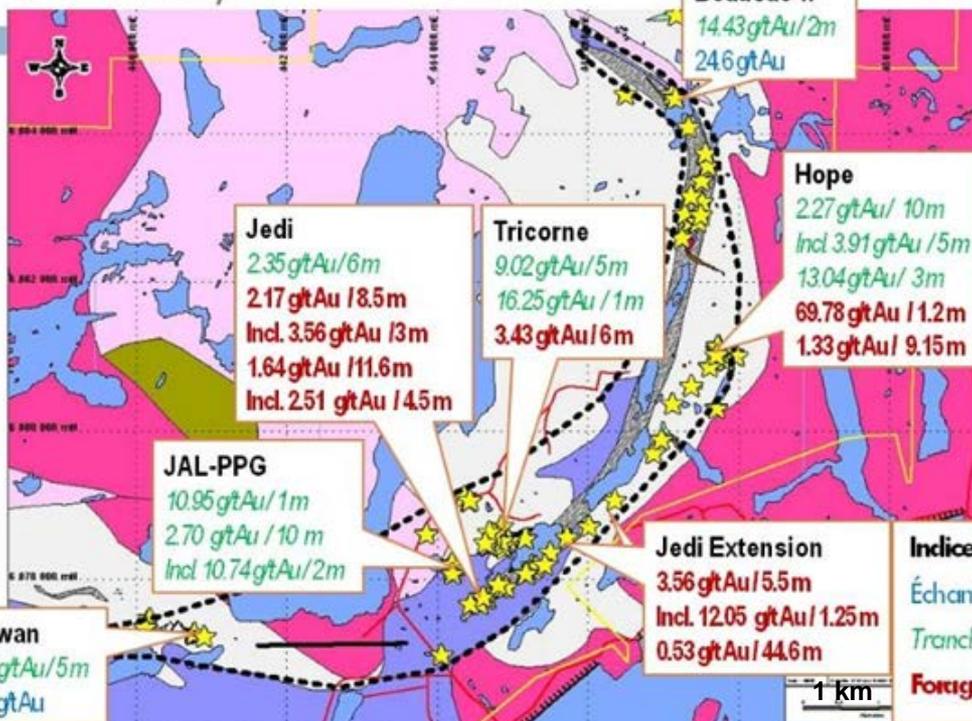
Distribution des échantillons et carte magnétique de l'Ashuanipi



Résultats de ciblage – Porphyres Cu-Au

Distribution des échantillons Sous-Province d'Ashuanipi

Lac Pau / IAM Gold

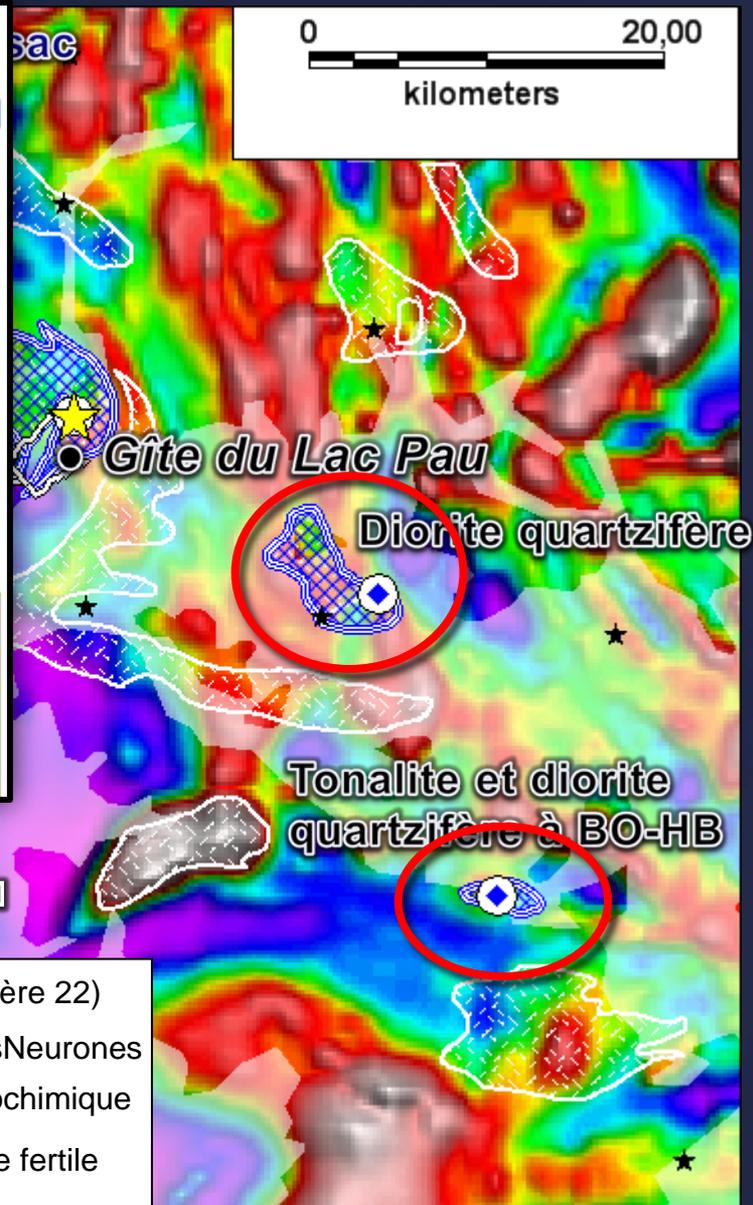


Metasomatic unit

-  Sillimanite-Chlorite-Silica alterations
-  Garnet alteration
-  Chlorite-K-Feldspars-Silica-Biotite±Fuschite alterations

Réservoir Canlapiscau

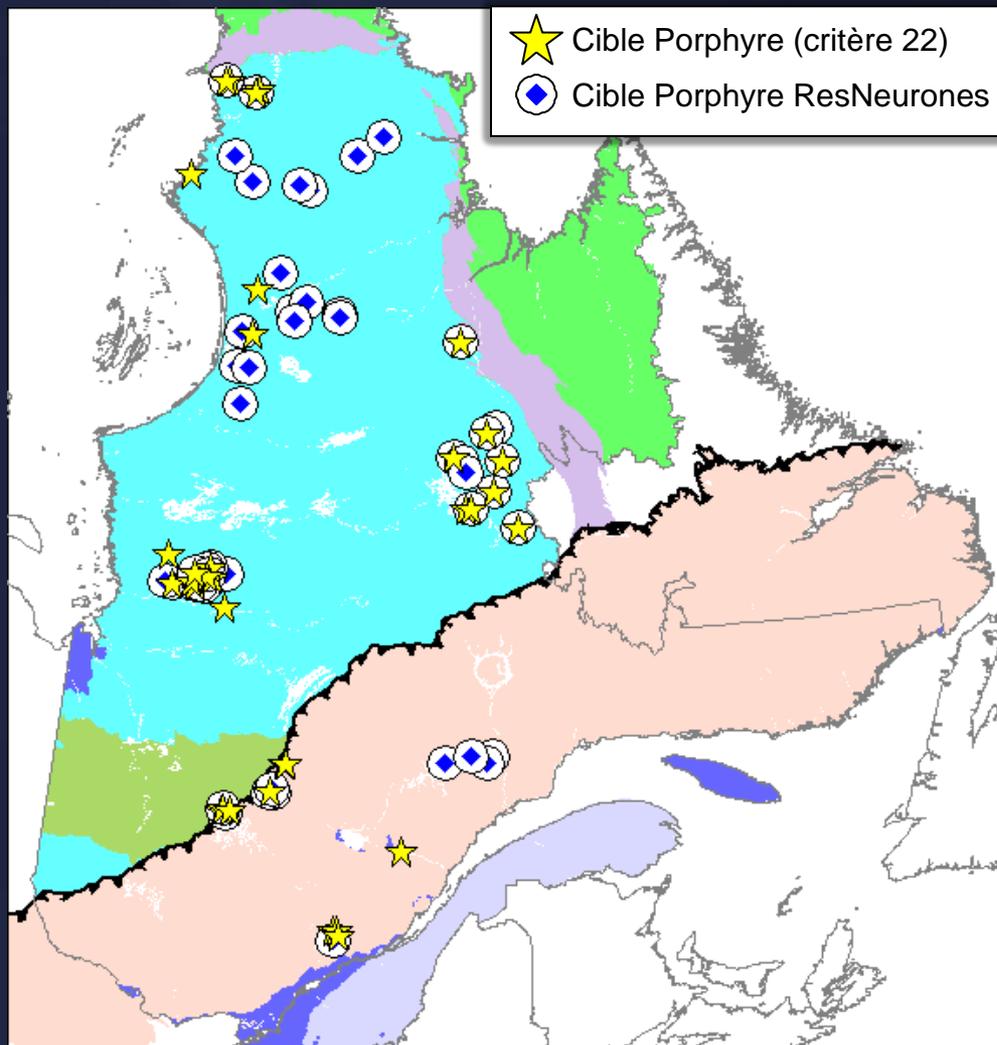
-  Cible Porphyre (critère 22)
-  Cible Porphyre ResNeurones
-  Échantillon lithogéochimique
-  Intrusion interprétée fertile



Résultats de ciblage – Porphyres Cu-Au

Les autres secteurs sont également intéressants!

Rapport complet bientôt sur notre site www.consorem.ca



Conclusion

Les intrusions porphyriques minéralisées en Cu-Au ont des signatures distinctes d'éléments majeurs et traces. Il est donc possible d'utiliser certains de ces éléments clés et des ratios discriminants comme méthode de ciblage et de reconnaissance de fertilité d'intrusions

La chimie des intrusions porphyriques Cu-Au archéennes et protérozoïques ne semble pas différente de celle des porphyres plus récents

La méthode de ciblage en particulier dans le Moyen-Nord explique certaines minéralisations reconnues comme étant porphyriques, notamment celles du Lac Ell (près d'Éléonore) et du Lac Pau, démontrant ainsi son potentiel d'application

Les échantillons de la banque Porphyres Cu-Au retenus* par le se comparent entre autre à ces gisements:

Aitik Cu-Au (Suède)	1,34 Gt 0,4% Cu, 0,2 g Au/t
Granberg Cu-Au (Suède)	Inconnu
Tallberg Cu-Au-Mo (Suède)	44 Mt @ 0,27% Cu, 0,2 g/t Au
Baguio Cu-Au (Philippines)	Total région: 35 Moz Au, 3 Mt Cu
Colosa Au (Colombie)	468,8 Mt 0,86 g/t Au
Duobuza Cu-(Au) (Tibet)	62,9 Mt @ 0,94%Cu, 0,21 Au
El Arco Cu-(Au) (Mexique)	1016 Mt @ 0,518% Cu, 0,12 g/t Au
Endeavour Cu-Au (Australie)	131,7 Mt @ 1,12% Cu, 0,51 g/t Au
Michiquillay Cu-Au-Mo (Pérou)	631 Mt @ 0,69% Cu, 0,15 g/t Au
Minas Conga Au-Cu (Pérou)	631 Mt @ 0,69% Cu, 0,15 g/t Au
Oyu Tolgoi Cu-Au (Mongolie)	1150 Mt 1,27% Cu, 0,48 g/t Au
Hugo Dummett Cu-Au (Mongolie)	820 Mt at 1.82% Cu, 0.42 g/t Au
District Baguio Cu-Au (Indonésie)	Total région: 35 Moz Au, 3 Mt Cu
Reko Diq Cu-Au (Afghanistan)	5,9 GT @ 0,41% Cu, 0,22 g/t Au
Saindak Au-Cu (Afghanistan)	440 Mt @ 0,41% Cu, 0,5 g/t Au
Shaxi Cu-Au (Chine)	258 500 t Cu, Au inconnu

* à cause entre autre de la disponibilité des éléments analysés