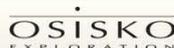


Relations entre les minéralisations aurifères et les isogrades métamorphiques en Abitibi

(projet 2013-03)

Stéphane Faure

17 novembre 2014 – Atelier CONSOREM, Québec Mines



AGNICO EAGLE

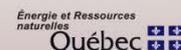


UQÀM

URSTM/UQAT

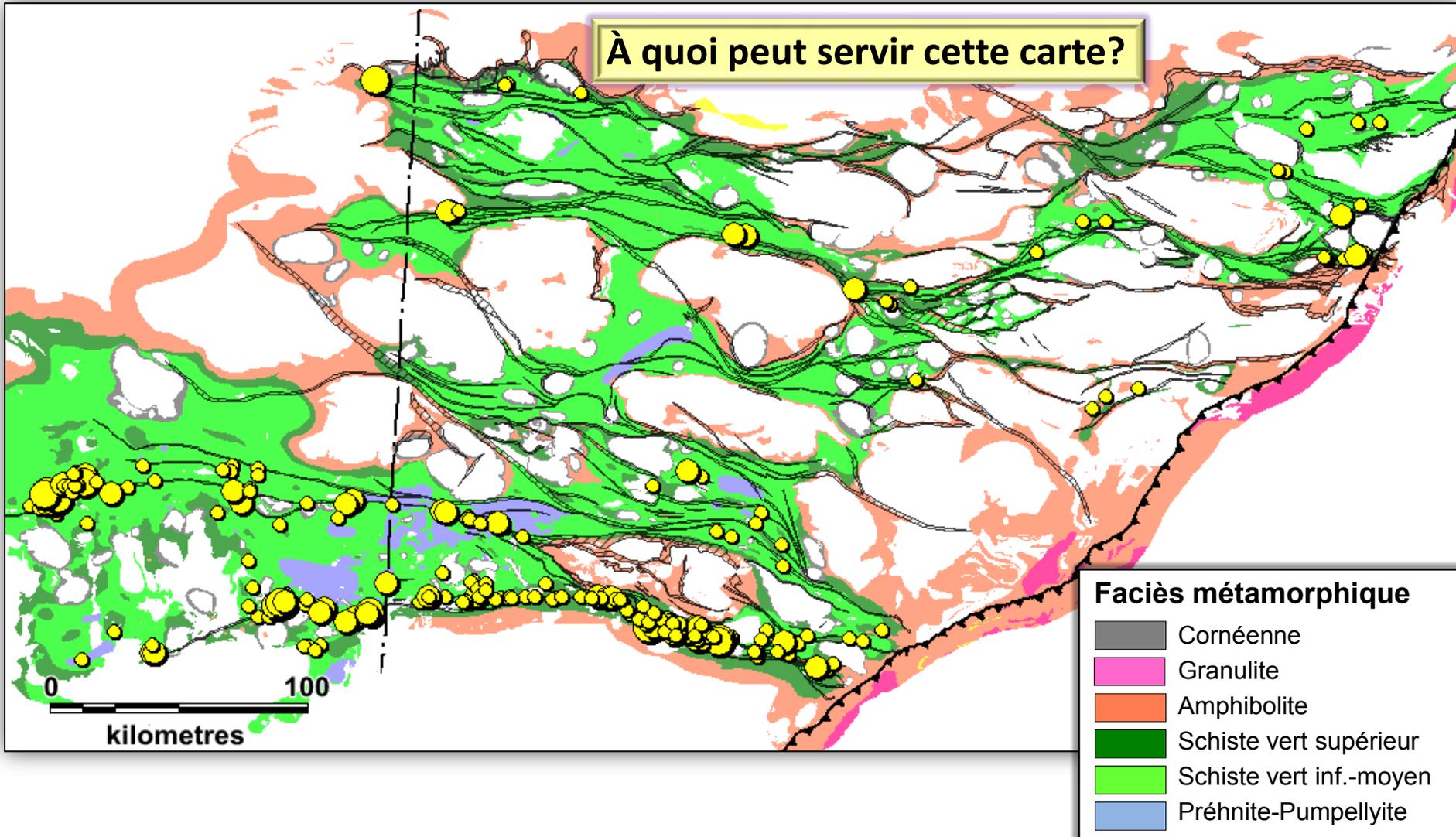


GLENCORE



UQAC

Nouvelle carte métamorphique de l'Abitibi



Plan de la présentation

1. Introduction

- Modèles pour l'or orogénique
- Minéralisations aurifères par rapport au métamorphisme en Abitibi
- Problématique et objectifs

2. Retour sur les données et la méthodologie pour la réalisation de la carte

- Données et documents
- Approche classique par assemblages de minéraux métamorphiques
- Approche géochimique avec les volatiles et la Norme Consorem

3. Analyses spatiales et cibles d'exploration régionale

4. Conclusion

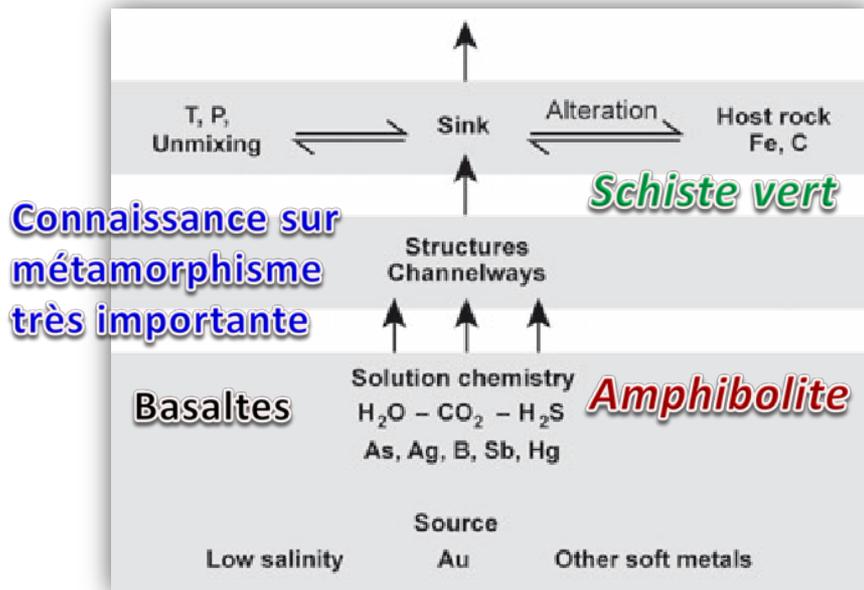
1. Introduction

1. Introduction

Modèles

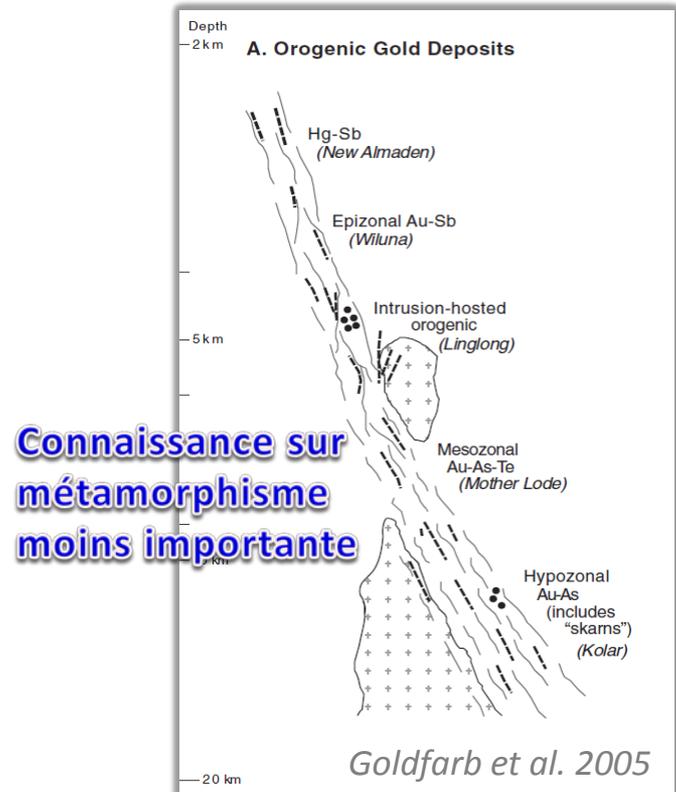
Depuis les travaux de Etheridge et al. (1983), Colvine (1984, 1988) et McCuaig et Kerrich (1998), plusieurs auteurs australiens démontrent que les gisements aurifères syn à tardi métamorphiques (orogéniques) se mettent en place dans le faciès schiste vert près de la limite des grades schiste vert supérieur et amphibolite inférieur.

Travaux de Phillips et Powell (2010) et de Large et al. (2011)



Phillips et Powell 2010

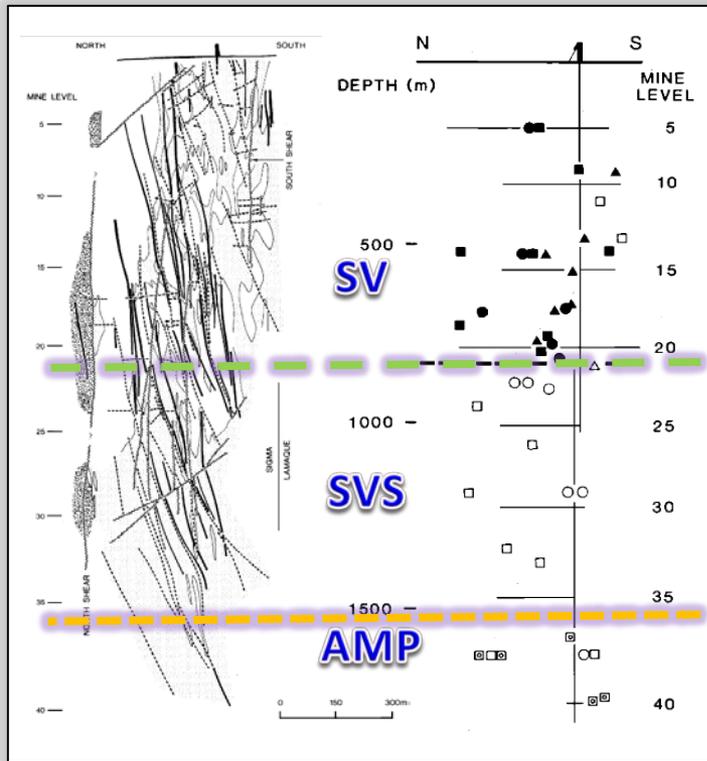
Travaux de Kerrich (1989) et Groves (1996) Continuum crustal



1. Introduction

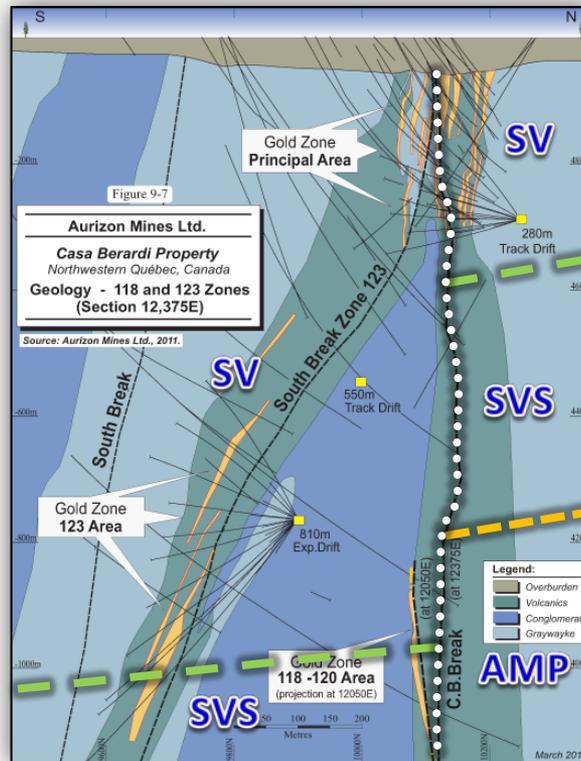
Exemples de mines en Abitibi qui cadreraient dans le modèle de dévolatilisation

Sigma-Lamaque (250 T Au)



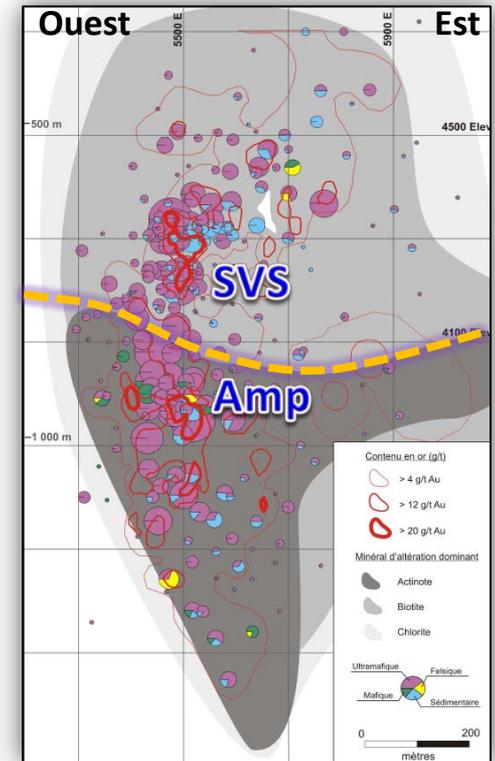
Robert et Brown 1986

Casa Berardi (65 T Au)



Salmon et al. 2011 et M. Demers (com. pers. 2014)

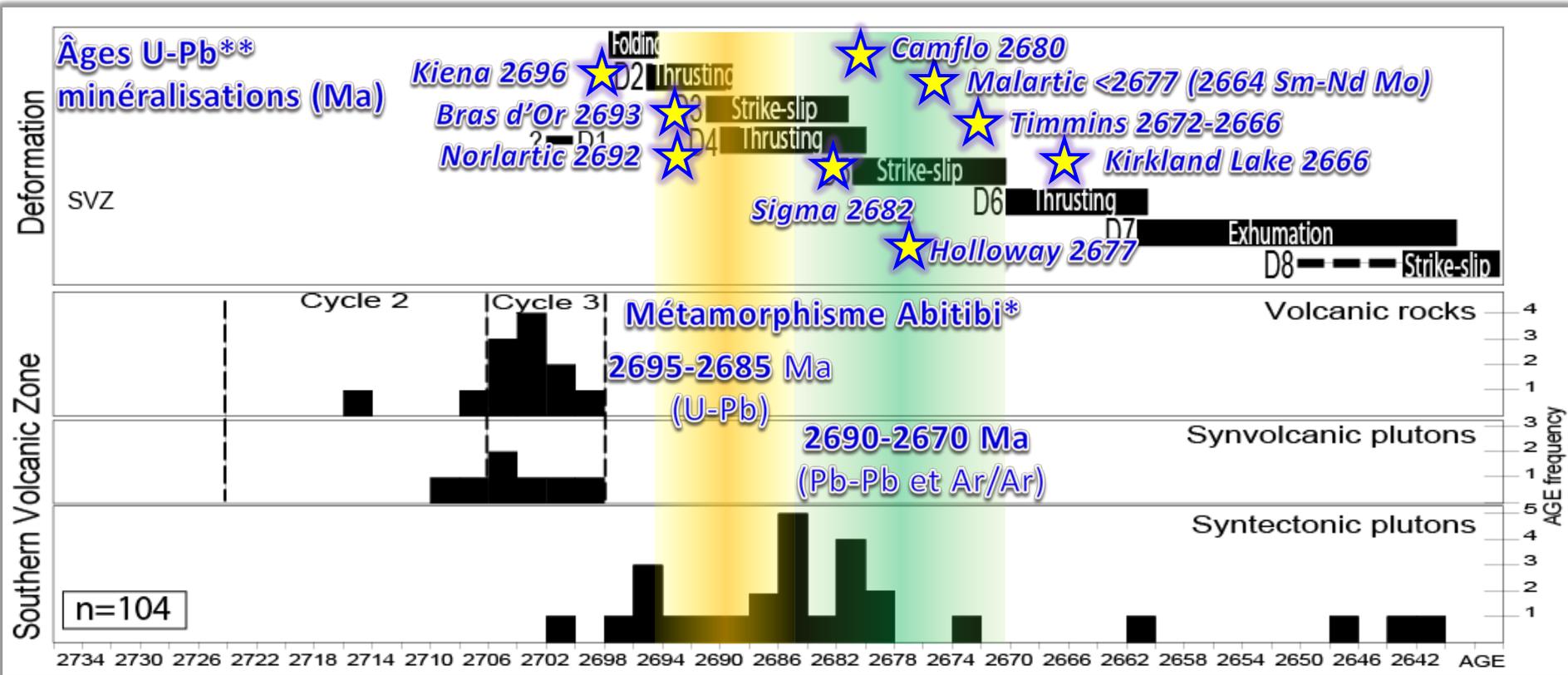
Lapa (21 T Au)



Simard 2011

1. Introduction

Périodes de minéralisations aurifères (non VMS) dans la Zone volcanique sud (Abitibi)
Dans la majorité des cas, les minéraux d'altération aux épontes des veines minéralisées recourent les minéraux métamorphiques, mais sont en équilibre rhéologique et thermique avec les roches hôtes (syn à tardi métamorphique)



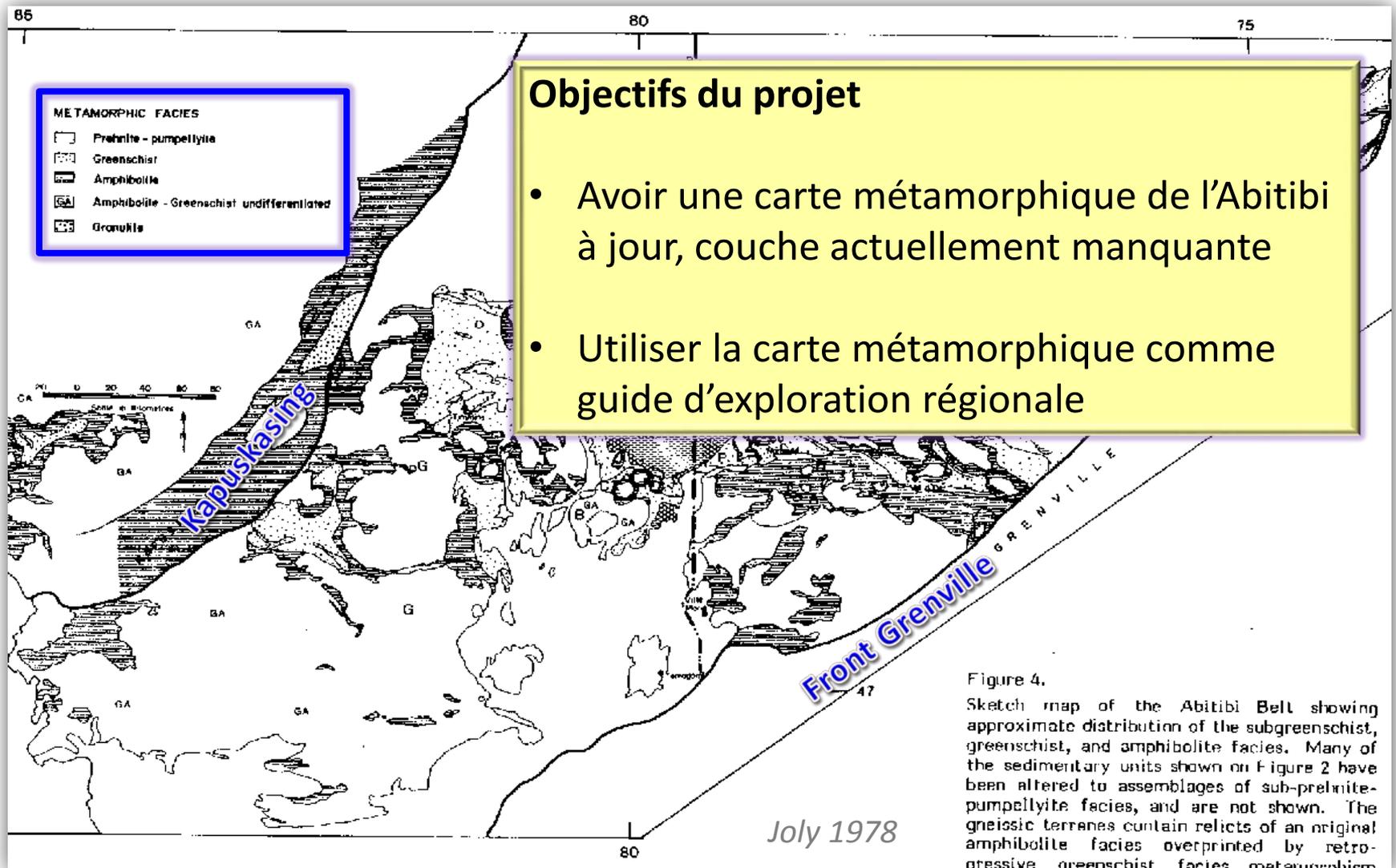
* Kerrich et Wyman 1994; Kerrich et Ludden 2000, Beakhouse 2011

Daigneault et al. 2002

** Répertoire des données scientifiques de la CGC (2014)

1. Introduction

Problématique: considérant et privilégiant le modèle de dévolatilisation crustale, il est difficile de reconnaître des secteurs d'intérêts en Abitibi avec les connaissances actuelles



2.

Données et méthodes

2. Données et méthodes

3 approches

Carte métamorphique de base

1- **Compilation** à partir de cartes, de rapports du Sigéom, d'articles

2- **Minéralogie** observée à l'affleurement ou en forage

- Assemblage métamorphique macroscopique (rarement lames minces)

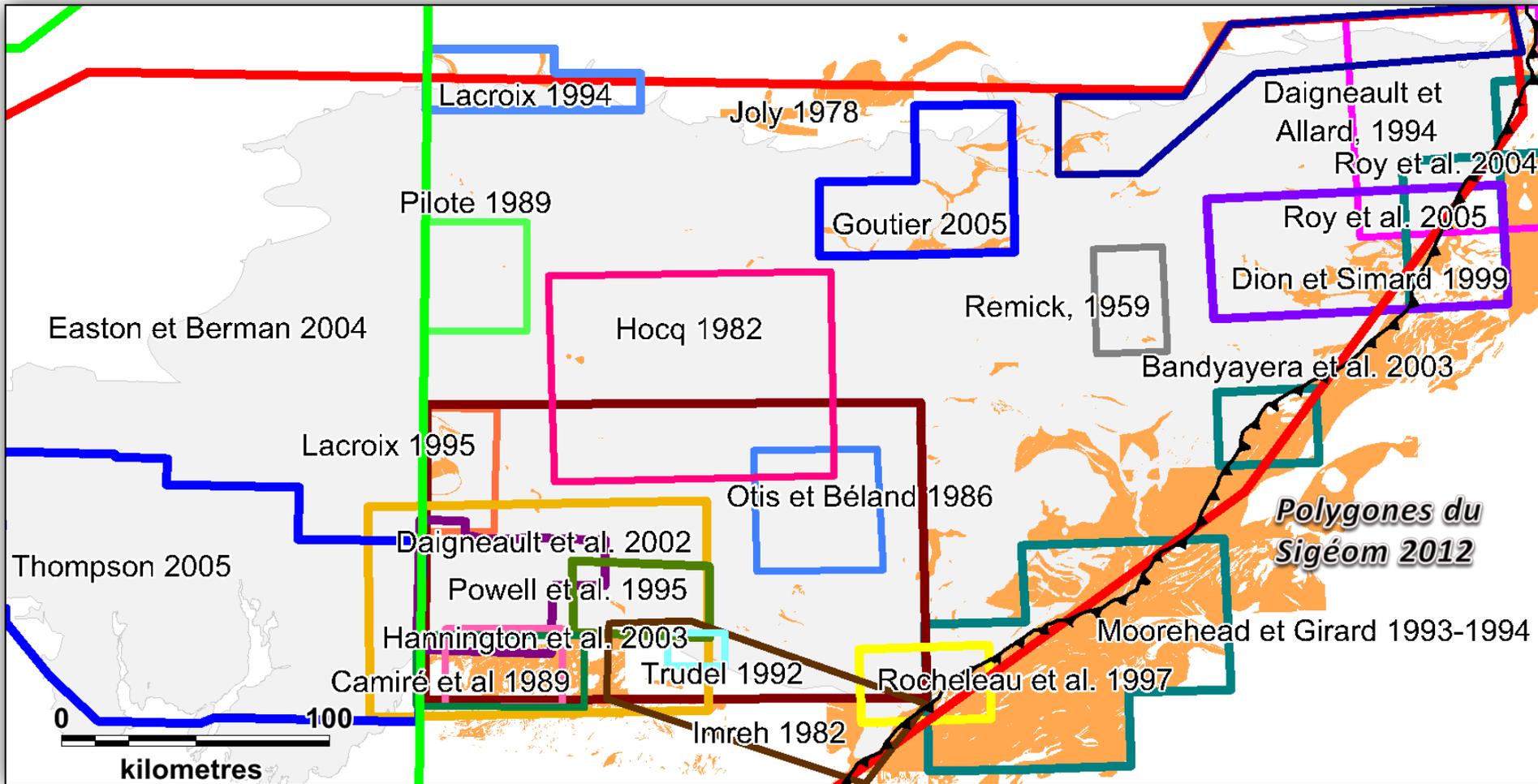
3- **Tests complémentaires pouvant améliorer la carte métamorphique**

- Tester la transition Pyrite-Pyrrhotine (limite Schiste Vert-Amphibolite)
- Approches lithogéochimiques

2. Données et méthodes

1- Compilation

Compilation à partir de cartes, de rapports du Sigéom et d'articles scientifiques



2. Données et méthodes

2- Approche classique par assemblages de minéraux métamorphiques pour les roches mafiques et les sédiments clastiques

(métamorphisme à l'intérieur des plutons n'a pas été abordé)

Grade métamorphique (roches mafiques) →

Metamorphic Facies	Zeolite	Prehnite-Pumpellyite	Metamorphic Facies	Greenschist	Transitional States	Amphibolite	Granulite			
Albite	-----		Albite		-----					
Heulandite	-----		Plagioclase > An ₁₂		-----		Andesine			
Laumontite	-----		Epidote		-----					
Analcime	-----		Actinolite		-----					
Epidote Mins.	-----		Hornblende	-----						
Prehnite		-----	Augite			-----				
Pumpellyite		-----	Orthopyroxene			-----				
Chlorite	-----		Chlorite	-----						
Actinolite		-----	Garnet		-----					
Calcite	-----		Biotite	-----						
Quartz	-----		Quartz	-----						
Phengite	-----		Phengite	-----						
			Cummingtonite		-----					
			Zone for associated metapelites	Chlorite Zone	Biotite Zone	Garnet Zone	Staurolite and Kyanite Zones	Sillimanite-Muscovite Zone	K-feldspar-Sillimanite Zone	Cordierite-Garnet Zone

Équivalent pour les sédiments ►

Winter (2001)

2. Données et méthodes

2- Approche classique par assemblages de minéraux métamorphiques pour les roches mafiques et les sédiments clastiques

Minéraux caractéristiques identifiables macroscopiquement
(description affleurement/forage)

Metamorphic Facies	Zeolite	Prehnite-Pumpellyite	Metamorphic Facies	Greenschist	Transitional States	Amphibolite	Granulite			
Prehnite		Epidote	.....					
Pumpellyite		Actinolite	.....					
			Hornblende		.....	.....	.....
			Augite			.....	.....	
			Orthopyroxene				.....		
			Chlorite	.....					
			Garnet		.....		.....
			Biotite	.....					
			Zone for associated metapelites	Chlorite Zone	Biotite Zone	Garnet Zone	Staurolite and Kyanite Zones	Sillimanite-Muscovite Zone	K-feldspar-Sillimanite Zone	Cordierite-Garnet Zone

Winter (2001)

Équivalent pour les sédiments ►

Schiste vert supérieur

2. Données et méthodes

2- Approche assemblages de minéraux métamorphiques (Schiste vert)

Descriptions macroscopiques de minéraux Affleurement/Forage
(Sigéom 2012 + base de données compagnies Consorem)

Faciès métamorphique

- | | | |
|--|-------------------------|---|
|  | Auréole SVS-AMP |  |
|  | Granulite/migmatite |  |
|  | Amphibolite |  |
|  | Schiste vert supérieur |  |
|  | Schiste vert inf.-moyen |  |
|  | Préhnite-Pumpellyite |  |

Ont. Lames minces

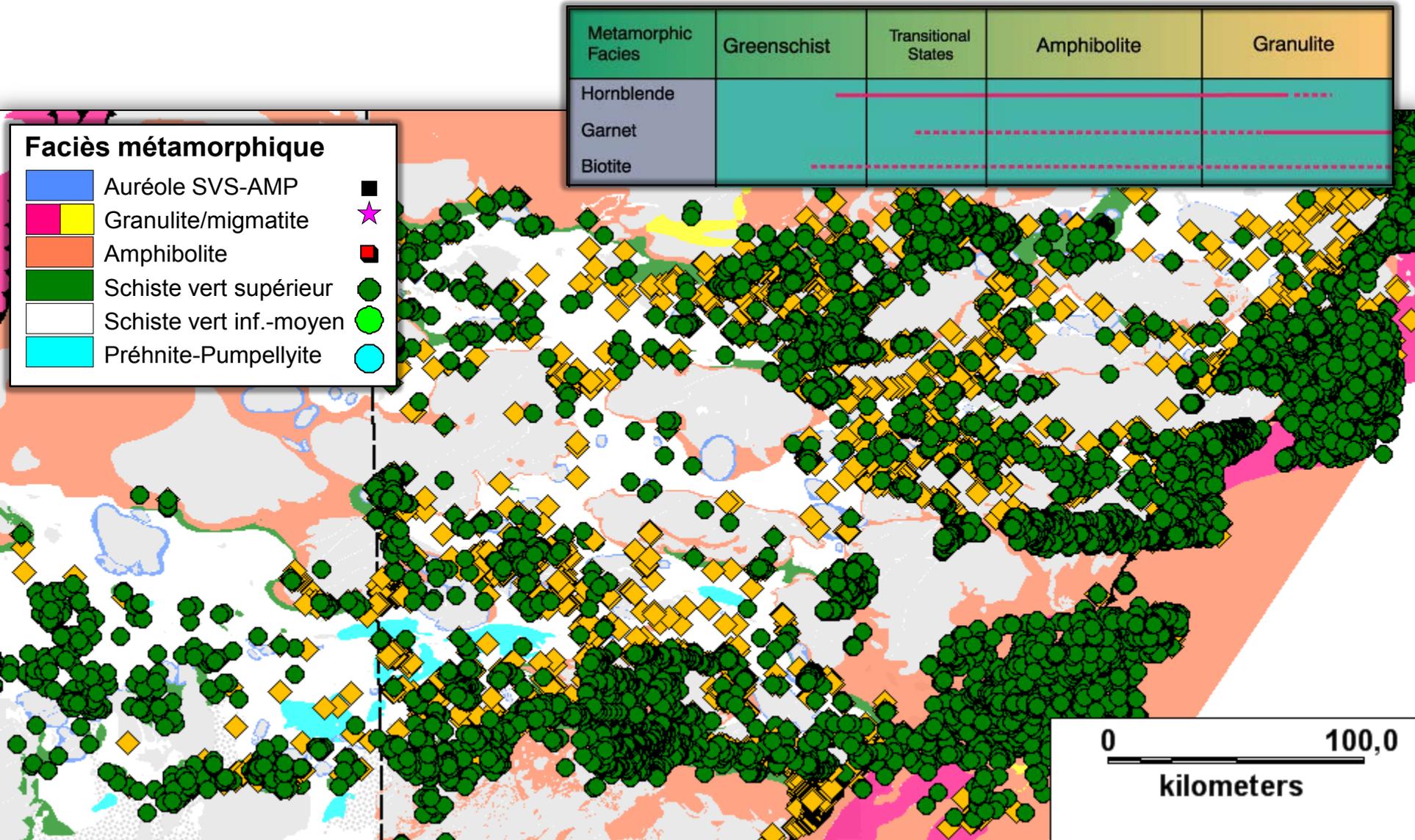
(travaux de Thompson 2005)

Un défi sachant que les données sont très hétérogènes et qu'il n'y a pas une approche systématique avec acquisition de données et/ou étude de lames minces

0 100,0
kilomètres

2. Données et méthodes

2- Approche assemblages de minéraux métamorphiques (Schiste vert sup.±Amp)



2. Données et méthodes

2- Approche assemblages de minéraux métamorphiques (lames minces)

Nouvelles données: 686 lames minces

- 265 lames: R. Daigneault (travaux historiques)
- 421 lames: CONSOREM (Lucas Briao-Koth, 2014) sous la supervision de R. Daigneault (*Majorité des éch. dans ou près des couloirs qui sont au schiste vert*)

Faciès métamorphique

- Amphibolite 
- Schiste vert supérieur 
- Schiste vert inf.-moyen 

Résultats obtenus *après la construction* de la carte avec les nouvelles données du Consorem

➤ Correspondance pour 315 lames

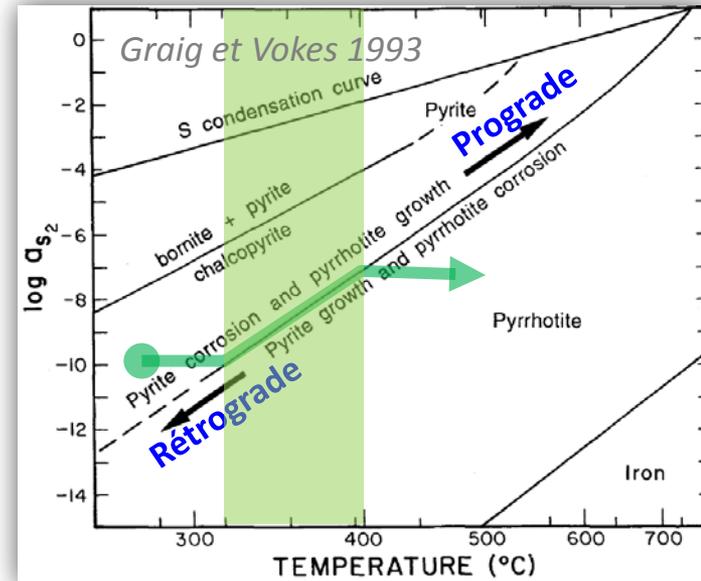
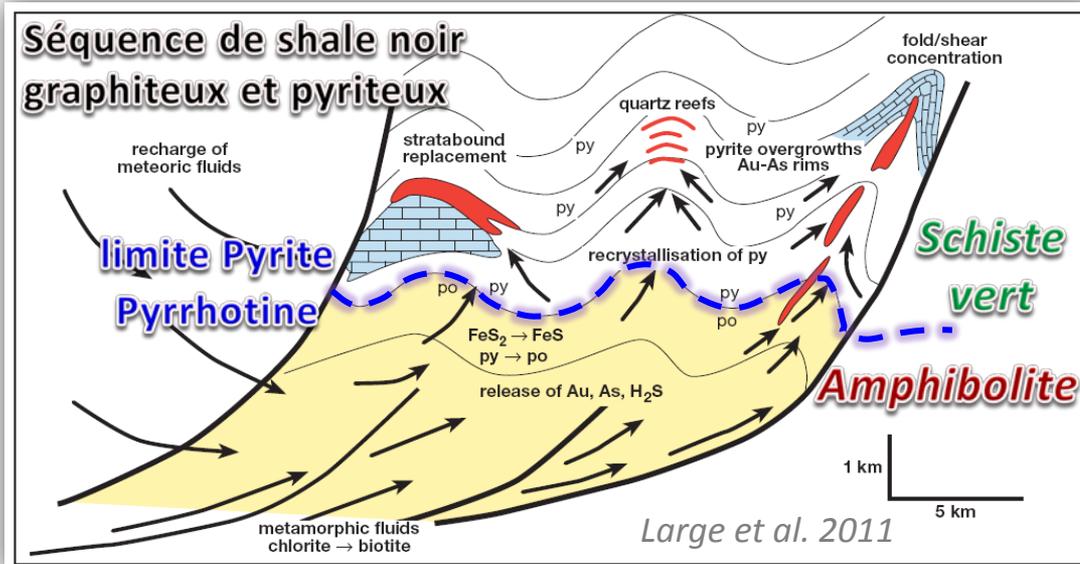
- SV = 58,4% (108/185)
- SVS = 82% (50/61)
- AMP = 84,1% (58/69)

0 100
kilometres

2. Données et méthodes

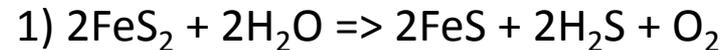
3- Autre approche minéralogique testée

Transition pyrite - pyrrhotine



Transformation pyrite – pyrrhotine (Tomkins 2006)

Transformation en présence d'eau (prograde)

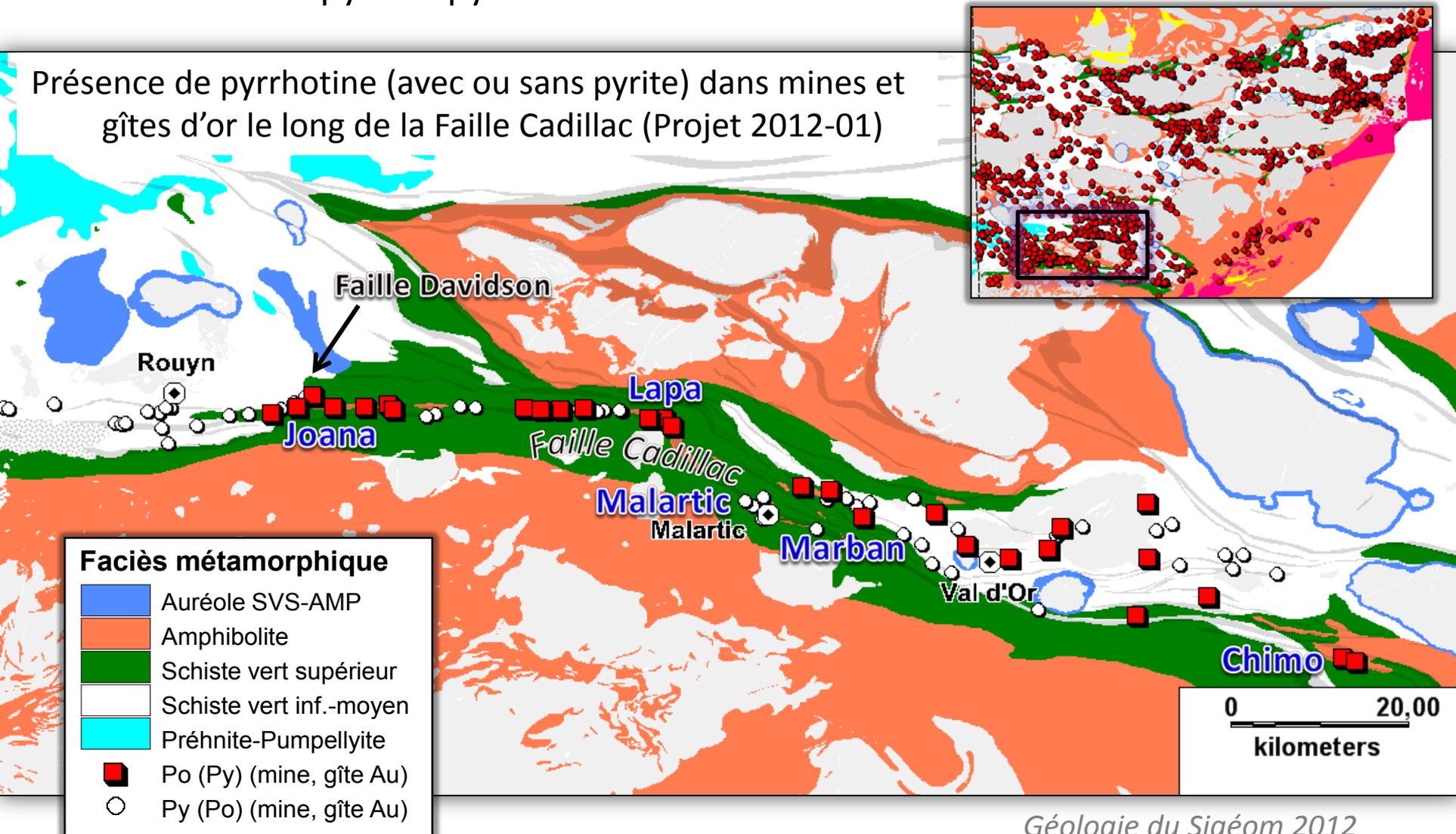


2. Données et méthodes

3- Autre approche minéralogique testée

Transition pyrite - pyrrhotine

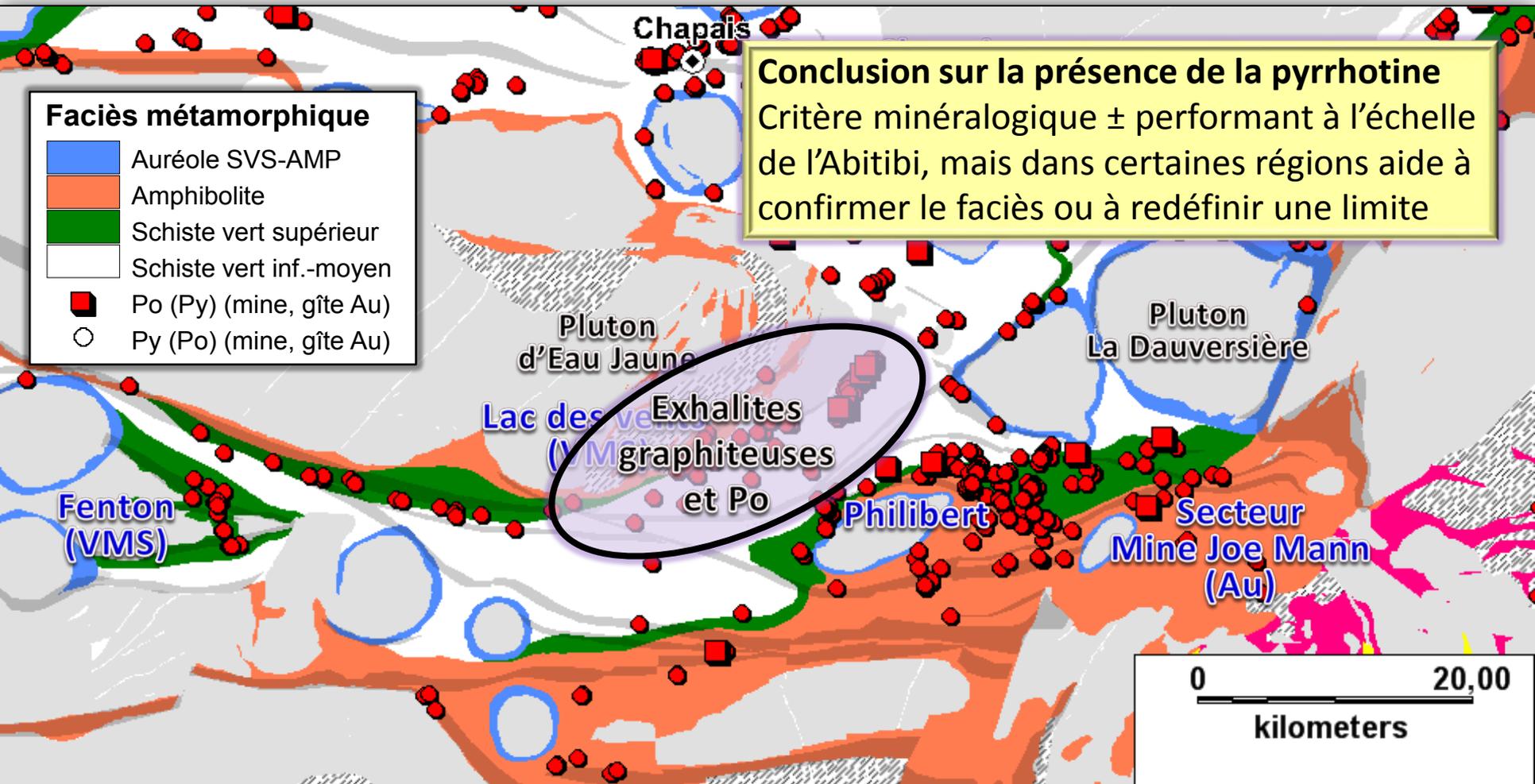
Présence de pyrrhotine (avec ou sans pyrite) dans mines et gîtes d'or le long de la Faille Cadillac (Projet 2012-01)



2. Données et méthodes

3- Autre approche minéralogique testée

Gîtes, indices et affleurements/forages où Po est dominante (Sud de Chibougamau)



Géologie du Sigéom 2012

2. Données et méthodes

3- Autres approches

Approche lithogéochimique avec Lithomodeleur

Faciès déterminés selon les Normes de Lithomodeleur (modèles)

- Norme 350C = Schiste vert moyen
- Norme 450C = Schiste vert supérieur
- Norme 575C = Amphibolite moyen

Conditions: H₂O et CO₂ mesurés

Si H₂O prédit par la norme pour former les minéraux normatifs est similaire à H₂O⁺ analysé
= bon grade;

Si déficit en H₂O → métamorphisme de niveau supérieur à la norme choisie;

Si excès en H₂O → métamorphisme de niveau inférieur à la norme choisie.

Correspondance spatiale entre le faciès métamorphique d'après la norme Lithomodeleur et la carte métamorphique de l'Abitibi québécoise

Faciès carte* métamorphique	Nb éch. classé SV (norme 350°C)	Nb éch. classé SVS (norme 450°C)	Nb éch. classé AMP (norme 575°C)	Correspondance avec carte métamorphique
SV	471	169	28	70,5% (471/668)
SVS	92	188	20	62,7% (188/300)
AMP	36	66	66	39,3% (66/168)

3. Cibles d'exploration régionale

3. Cibles d'exploration régionale

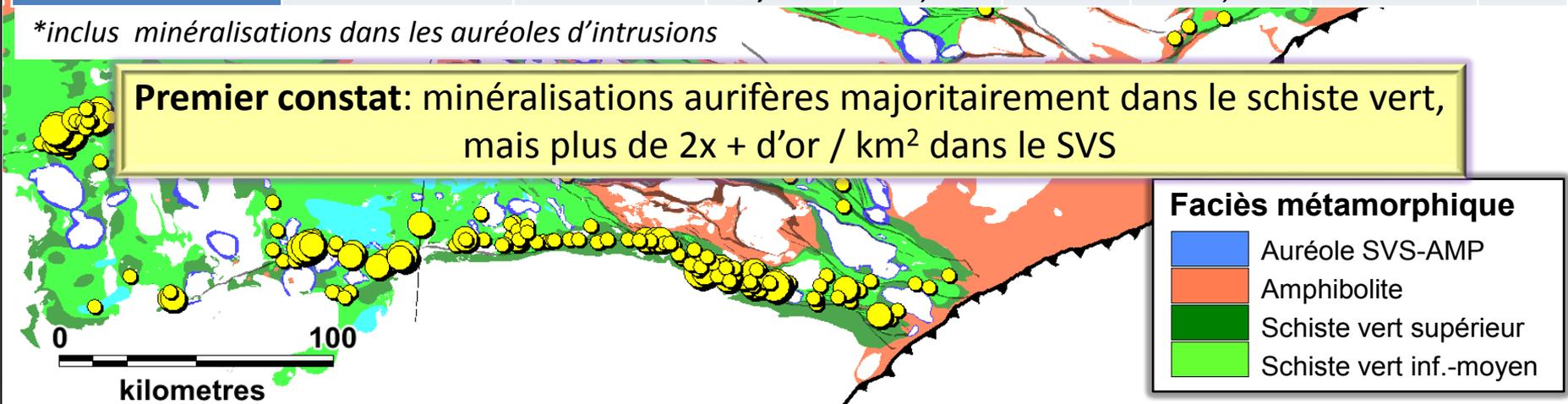
Carte métamorphique et minéralisations aurifères*

Nombre de mines et gîtes d'or orogénique par faciès métamorphique en Abitibi

Faciès métamorphique	Superficie (km ²)	Tonnes Au	Tonne /km ²	% Tonne Au	Nb mine	% mine	Nb gisement	Nb gîte
SSV	1857	524	0,28	7,8	4	3,1	1	12
SV	30060	3290	0,11	49,0	80	61,1	64	413
SVS*	8978	2188	0,24	32,6	30	22,9	32	139
AMP	12890	709	0,06	10,6	17	12,9	10	37

*inclus minéralisations dans les auréoles d'intrusions

Premier constat: minéralisations aurifères majoritairement dans le schiste vert, mais plus de 2x + d'or / km² dans le SVS



Faciès métamorphique

- Auréole SVS-AMP
- Amphibolite
- Schiste vert supérieur
- Schiste vert inf.-moyen

* Minéralisations non-volcanogènes, principalement dans des cisaillements et des veines

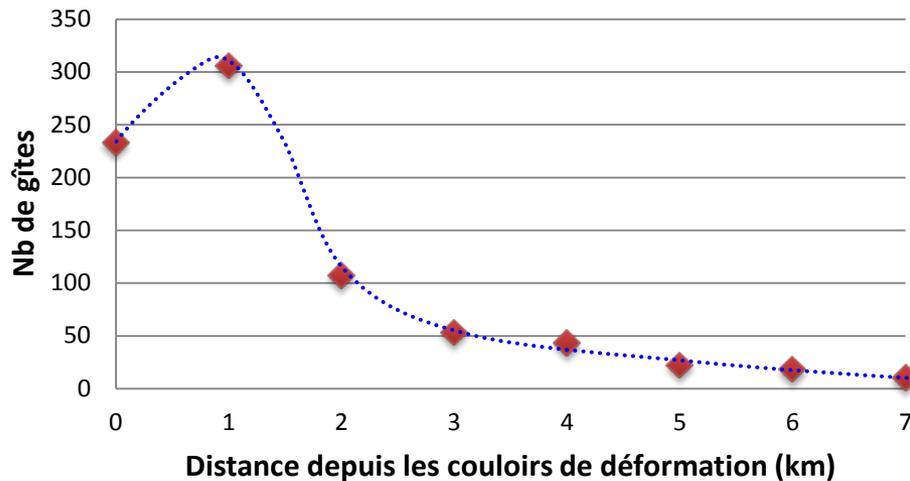
Base de données de Gosselin et Dubé (2007), OGS, Sigéom, mise à jour Consorem

3. Cibles d'exploration régionale

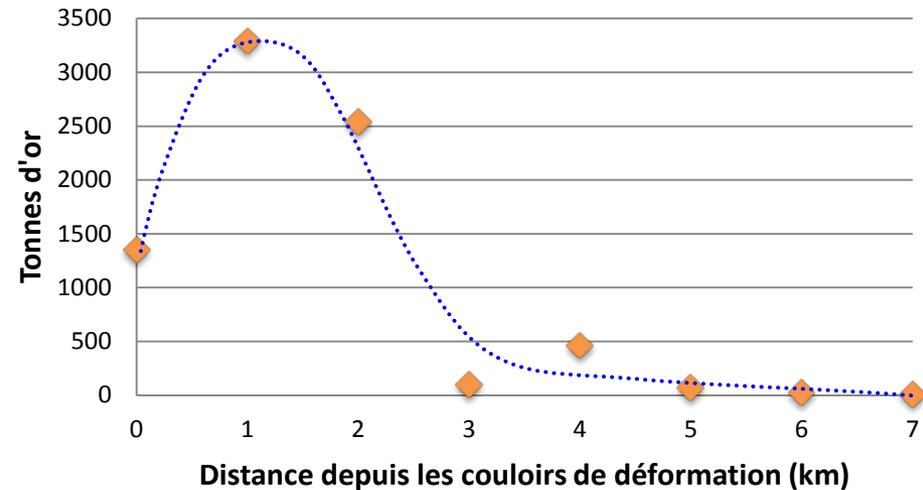
2- Minéralisations aurifères le long des failles et métamorphisme

Deuxième constat : minéralisations aurifères situées le long des couloirs de déformation, à moins de 2 km de la zone de déformation

Distance des gîtes d'or par rapport aux couloirs*



Tonnage d'or par rapport à distance aux couloirs



*Distance depuis les bordures des couloirs de déformation de R. Daigneault (2014)

Sources des données: Gosselin et Dubé (2007), OGS, Sigéom 2013, et mise à jour Consorem

3. Cibles d'exploration régionale

3 manières d'utiliser la carte métamorphique pour l'exploration

- 1- Formations fer au faciès SVS – AMP dans et en marge des couloirs de déformation
- 2- Couloirs de déformation, contraste métamorphique et bassins sédimentaires
- 3- Distance à l'isograde schiste vert supérieur dans et en marge des couloirs de déformation

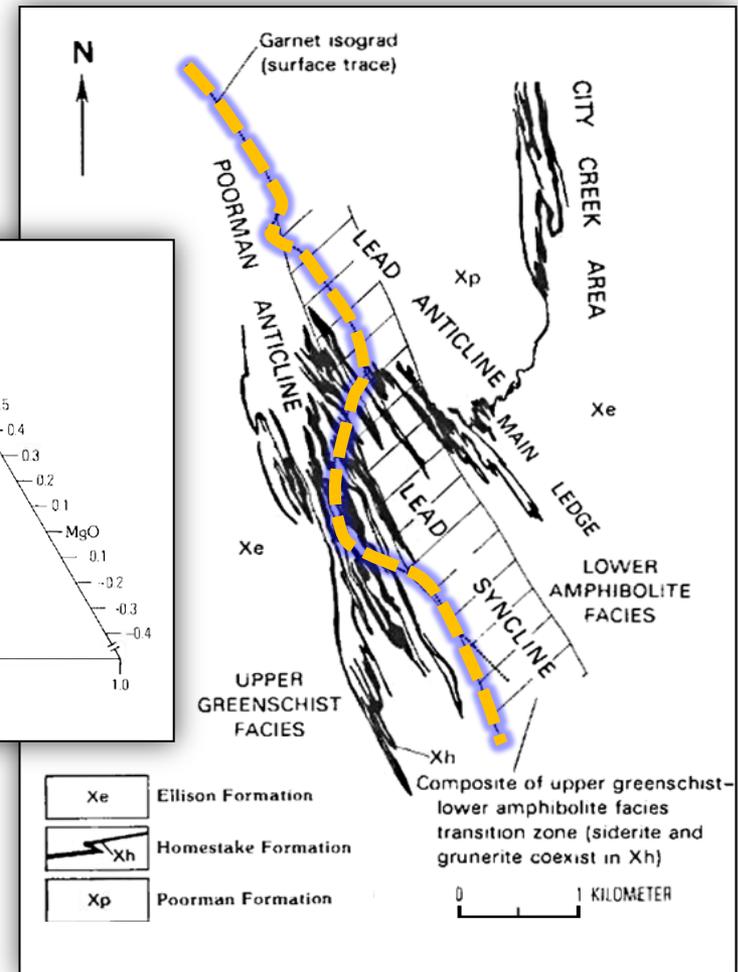
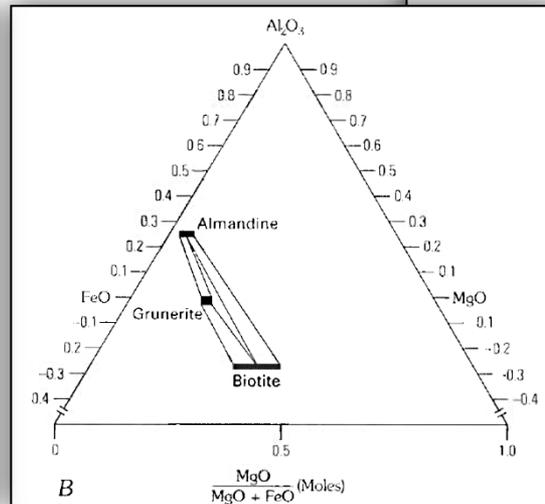
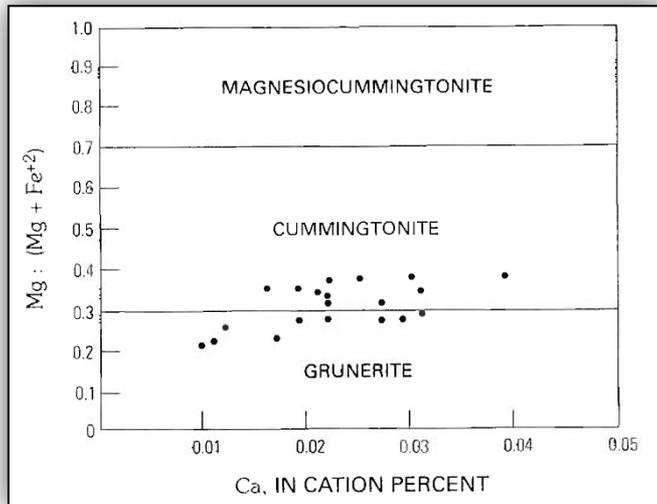
3. Cibles d'exploration régionale

1- Or dans les formations de fer

Il est connu que les **formations de fer sont minéralisées en or** seulement si elles atteignent les faciès schiste vert supérieur – amphibolite.

Raisons: roches réactives (sulfuration) et compétentes (Rapport 2003-02A, Trépanier 2007)

- Homestake (40 Moz) dans le sud du Dakota
- Lupin, Musselwhite et Meadowbank au Canada
- Nombreux gîtes dans le Grand Nord au Québec



Stanton et al. 1991

- Xe Elison Formation
- Xh Homestake Formation
- Xp Poorman Formation

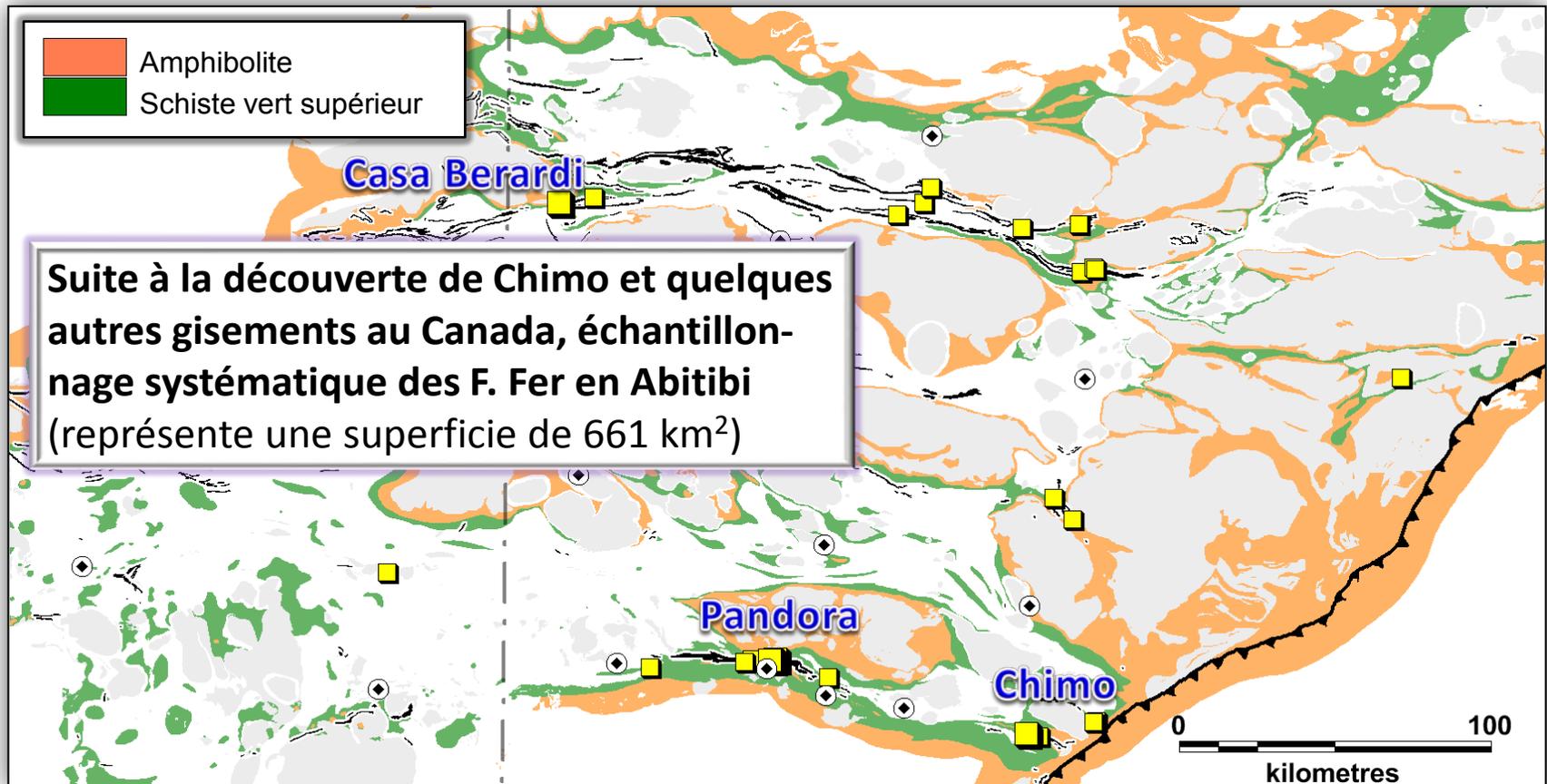
Composite of upper greenschist-lower amphibolite facies transition zone (siderite and grunerite coexist in Xh)

0 1 KILOMETER

3. Cibles d'exploration régionale

1- Or dans les formations de fer

- En Abitibi, 11 mines ou gisements évalués, et 31 gîtes ou indices d'or encaissés en partie dans formations de fer cisillées et au SVS ou AMP (Sigéom, 2012 et OGS)
- La plus importante mine exploitée en partie dans les formations de fer, est celle de Chimo à l'est de Val-d'Or (production 379 000 Oz Au*) = faciès amphibolite



Formations fer de l'OGS et Sigéom 2012, et autres retracées sur le mag

* DV 86-04 et DV 97-01

3. Cibles d'exploration régionale

1- Or dans les formations de fer (Mine Chimo)

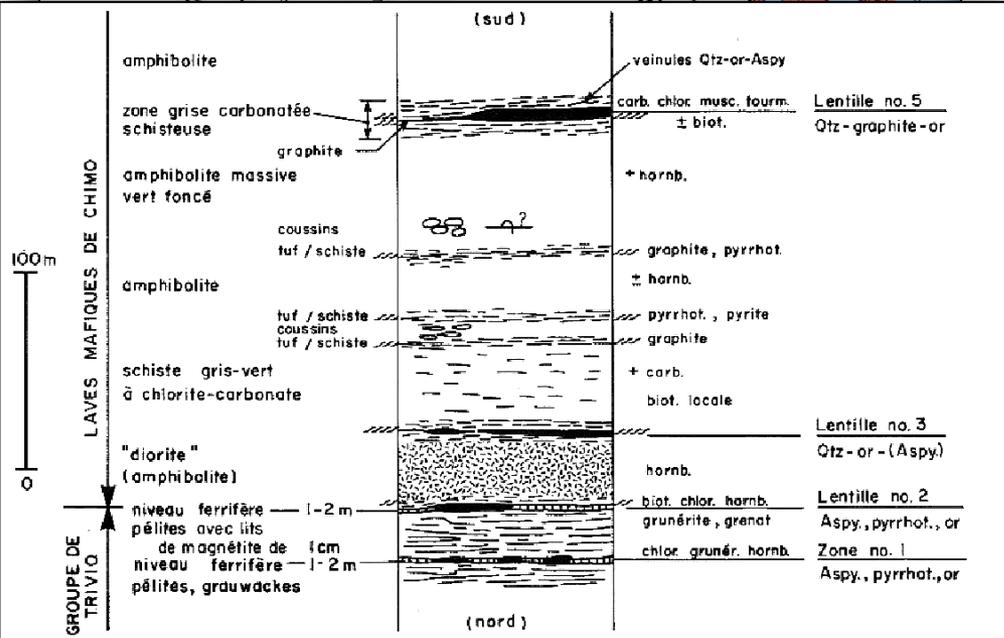
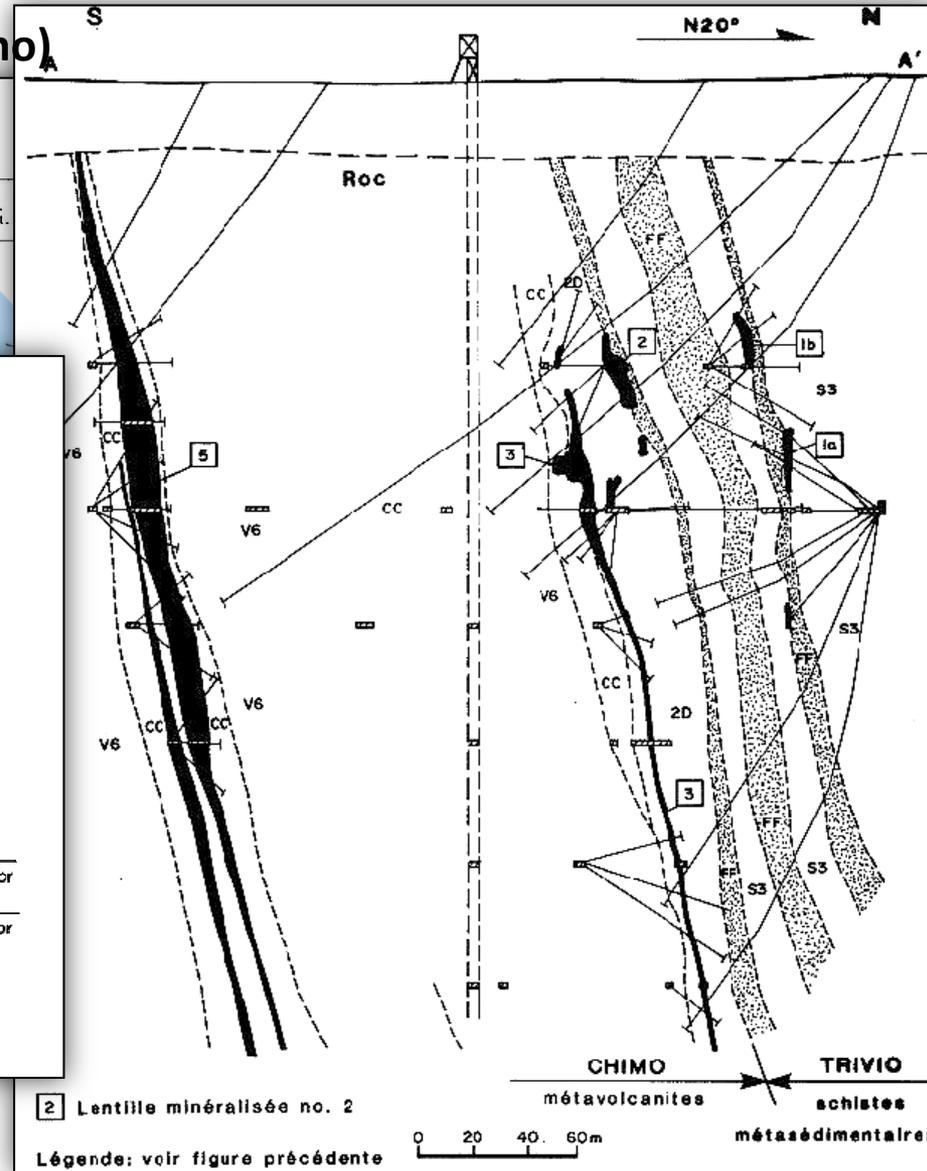
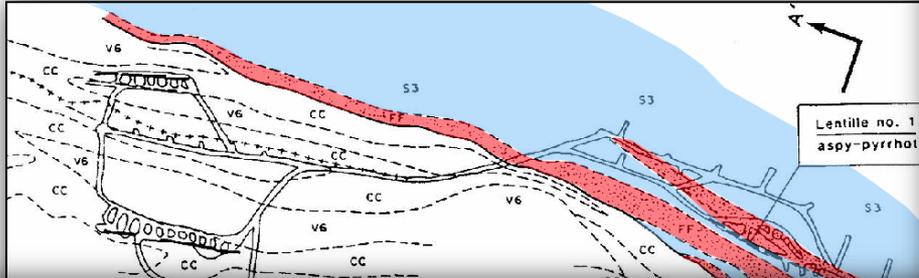


Figure 3. Coupe schématique montrant les lithologies et la distribution des lentilles minéralisées près du puits de la mine Chimo.

Sauvé et al. 1987 (MB 87-05)

3. Cibles d'exploration régionale

1- Or dans les formations de fer

Cibles d'exploration: intersections entre formations de fer et faciès SVS ou Amphibolite

Formations de fer en Abitibi aux faciès SVS ou AMP

Amphibolite
Schiste vert supérieur

Superficie des formations de fer passe de 661 à 279 km² (réduction 58%)

0 100
kilomètres

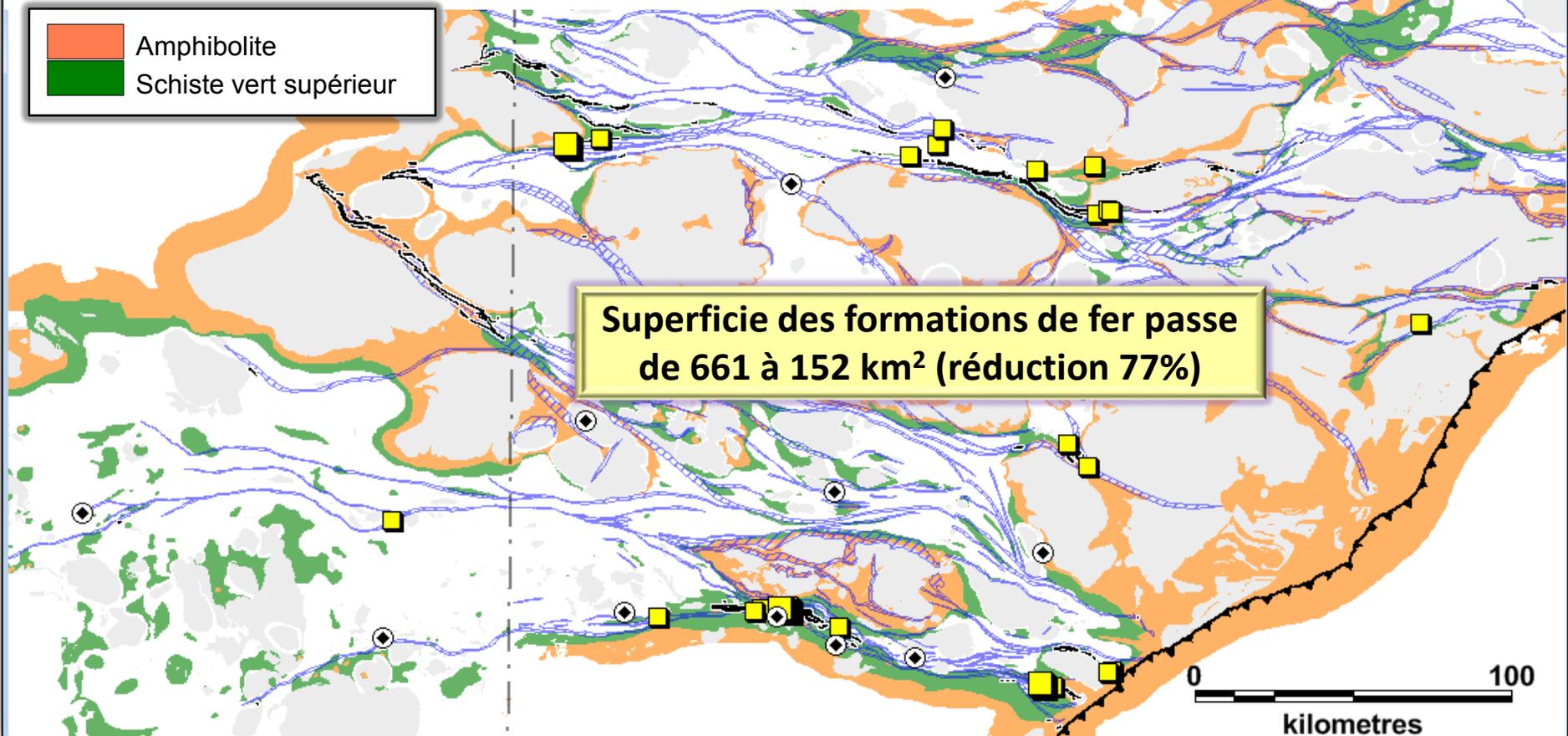
Formations fer de l'OGS et Sigéom 2012, et autres retracées sur le mag

3. Cibles d'exploration régionale

1- Or dans les formations de fer

Cibles d'exploration: intersections entre formations de fer et faciès SVS ou Amphibolite et dans, ou à moins de 2 km, des couloirs de déformation

Formations de fer en Abitibi aux faciès SVS ou AMP

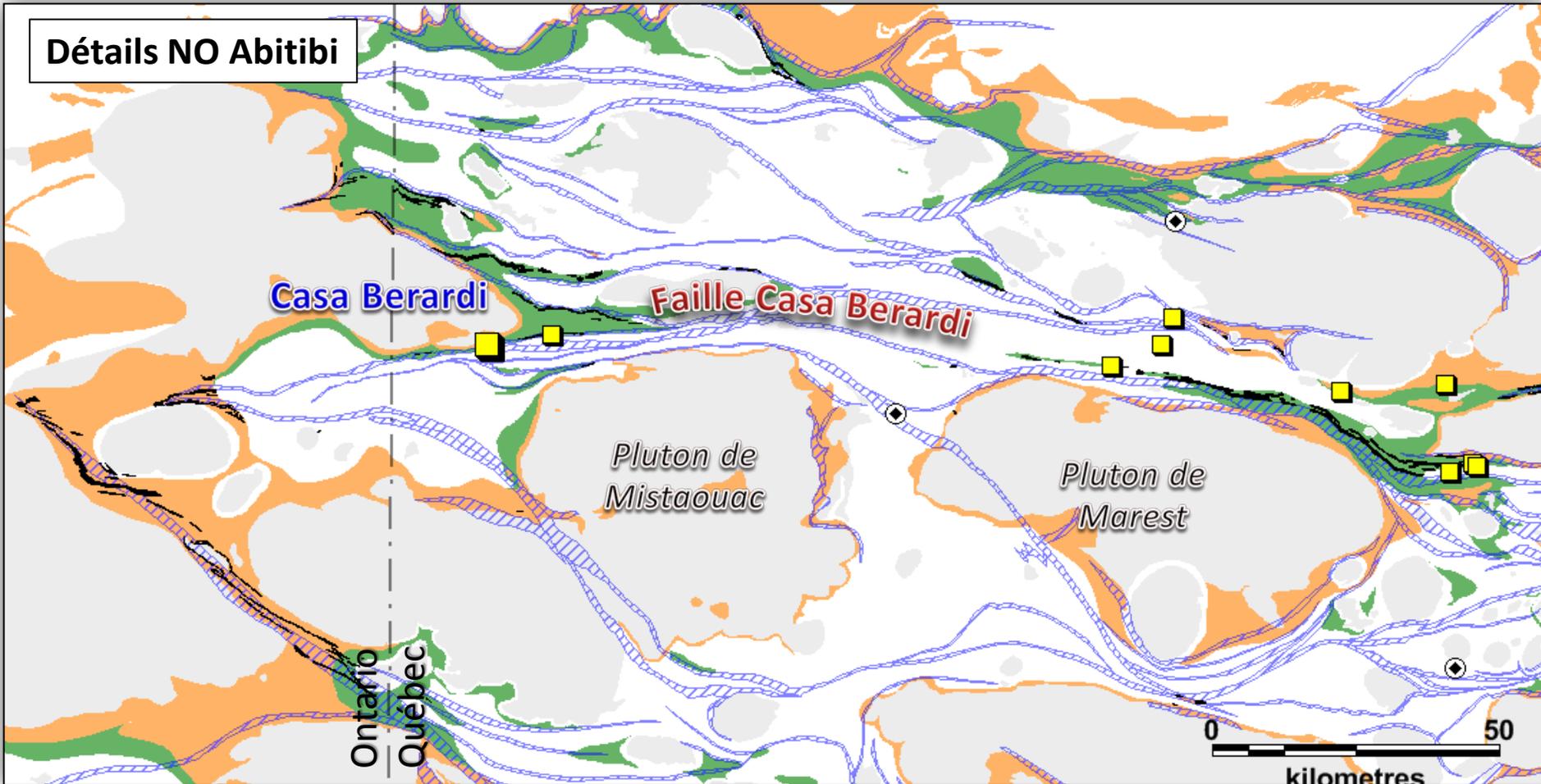


Formations fer de l'OGS et Sigéom 2012, et couloirs de Daigneault (2014)

3. Cibles d'exploration régionale

1- Or dans les formations de fer

Cibles d'exploration: intersections entre formations de fer et faciès SVS ou Amphibolite et dans, ou à moins de 2 km, des couloirs de déformation



Formations fer de l'OGS et Sigéom 2012, et couloirs de Daigneault (2014)

2- Minéralisations aurifères le long des failles et métamorphisme

Approche:

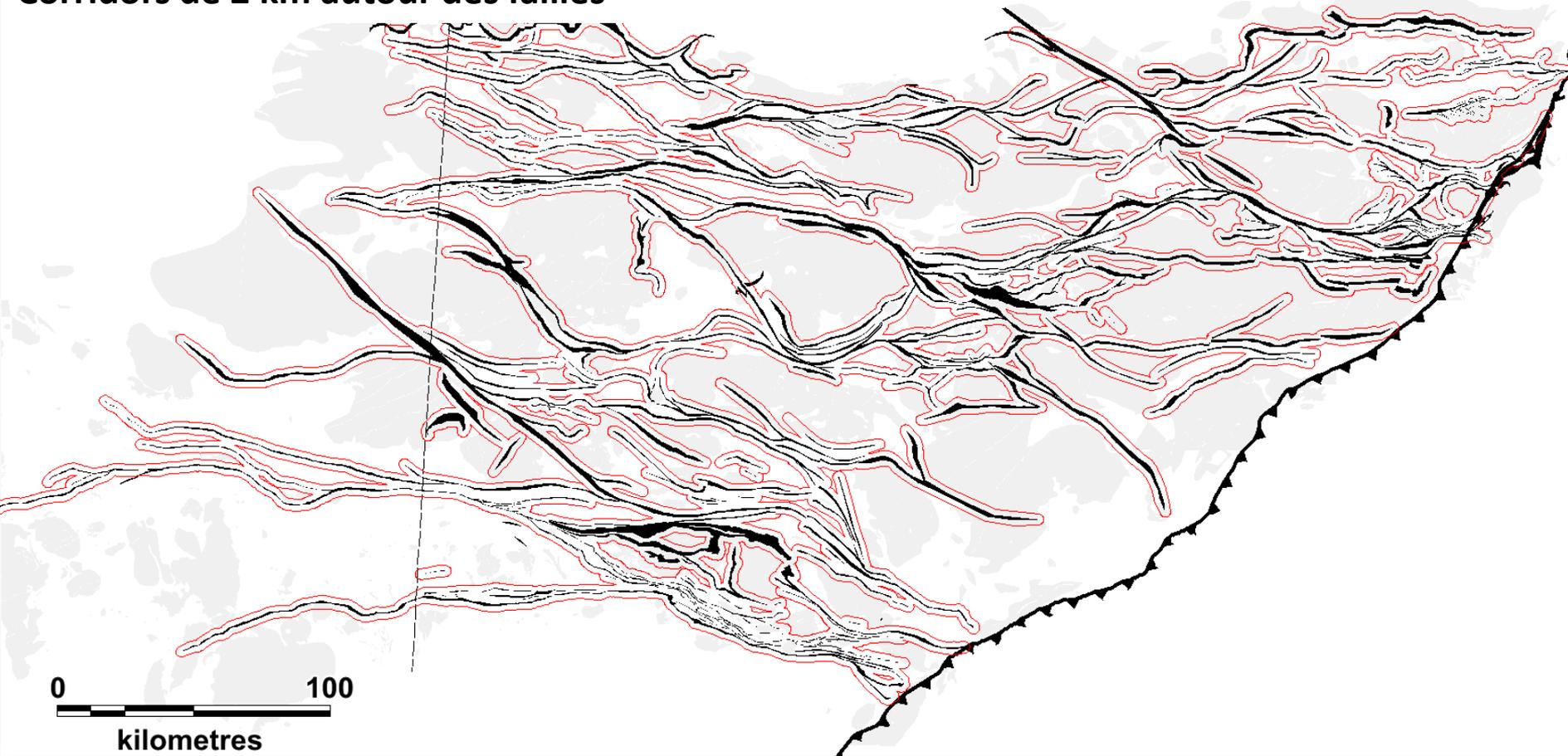
Identifier les couloirs de déformation majeurs avec des mouvements verticaux importants (normal ou inverse)

- Par contraste de métamorphisme de part et d'autre des couloirs de déformation (Références: Powell et al. 1995, Daigneault et al. 2002)
 - Présence de bassins sédimentaires (longue activité, failles précoces réactivées lors de l'orogénie par ex. (Références: Goldfarb et al. 2005, Robert 2001, et autres références)
- La majorité des failles avec des contrastes de métamorphisme coïncident avec des bassins sédimentaires.

3. Cibles d'exploration régionale

2- Minéralisations aurifères le long des failles et métamorphisme

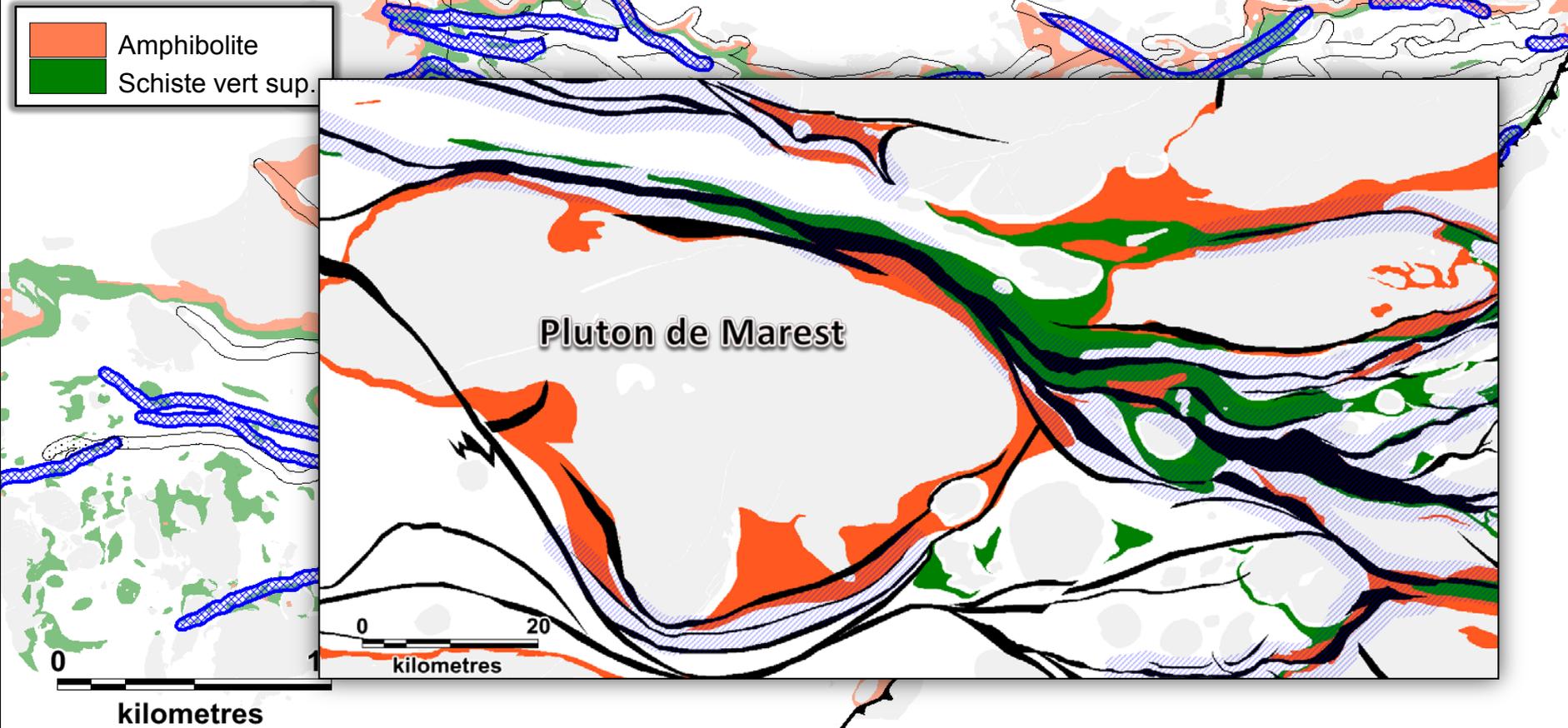
Corridors de 2 km autour des failles



3. Cibles d'exploration régionale

2- Minéralisations aurifères le long des failles et métamorphisme

Couloirs présentant des contrastes de métamorphisme



Couloirs de déformation de Daigneault (v.4, 2014)

3. Cibles d'exploration régionale

2- Minéralisations aurifères le long des failles et métamorphisme

Couloirs présentant des contrastes de métamorphisme

Nombre de mines et gîtes d'or orogénique et quantité d'or associés aux segments de failles avec un contraste de métamorphisme en Abitibi

Type de failles	Nb de segments de failles	Surface (km ²)	Tonnes Au	Ratio T Au/ km ²	Nb mines et gîtes	Ratio gîtes/km ²
Avec contraste métamorphique	77	18 150	4321	0,238	452	0,025
Sans contraste métamorphique	214	20 230	2115	0,104	202	0,010

2,3 x Au /km²

2,5 x +gîtes

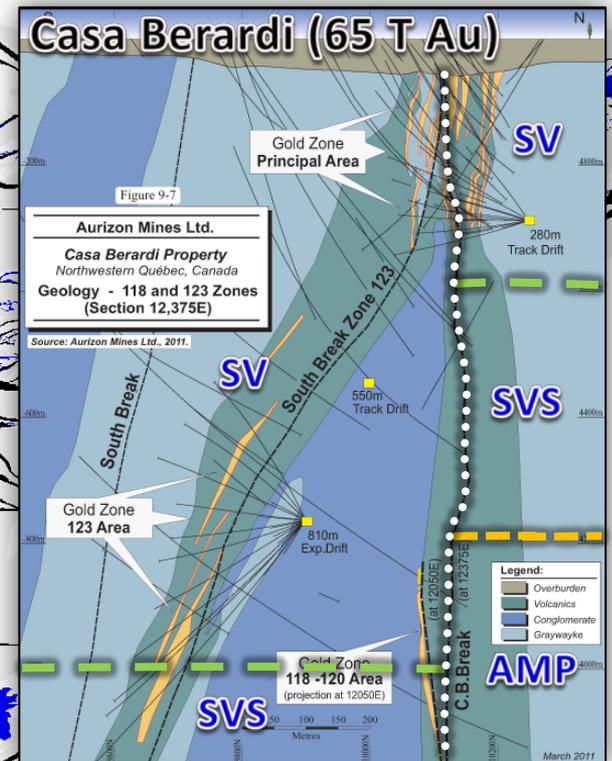
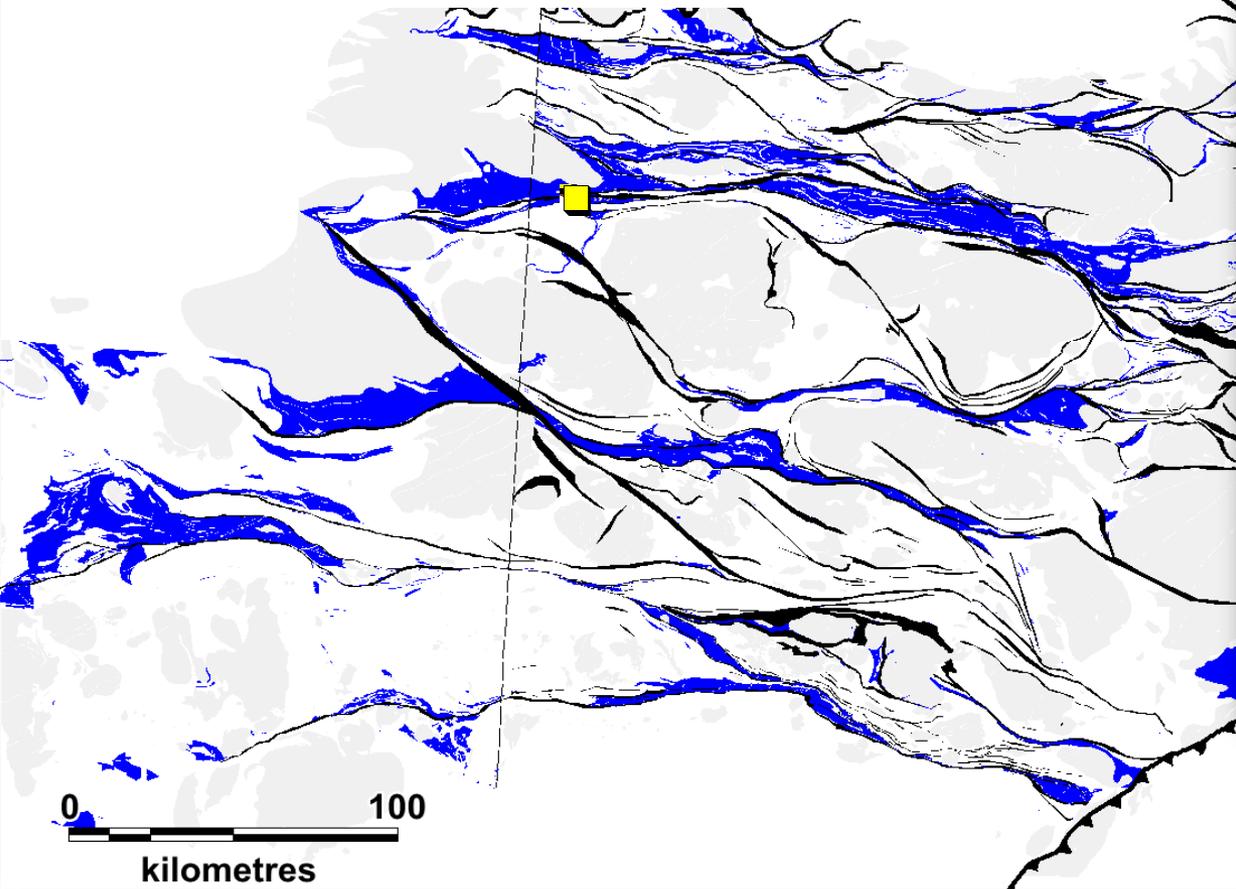
0 100
kilometres

Sources des données sur l'or: Gosselin et Dubé (2007), OGS, Sigéom 2013, et mise à jour Consorem

3. Cibles d'exploration régionale

2- Minéralisations aurifères le long des failles, métamorphisme et bassins sédimentaires

Bassins sédimentaires et couloirs de déformation



Salmon et al. 2011 et M. Demers
(com. pers. 2014)

3. Cibles d'exploration régionale

2- Minéralisations aurifères le long des failles, métamorphisme et bassins sédimentaires

Bassins sédimentaires et couloirs de déformation

Nombre de mines et gîtes d'or orogénique et quantité d'or associés aux segments de failles avec un contraste de métamorphisme et bordant un bassin sédimentaire en Abitibi

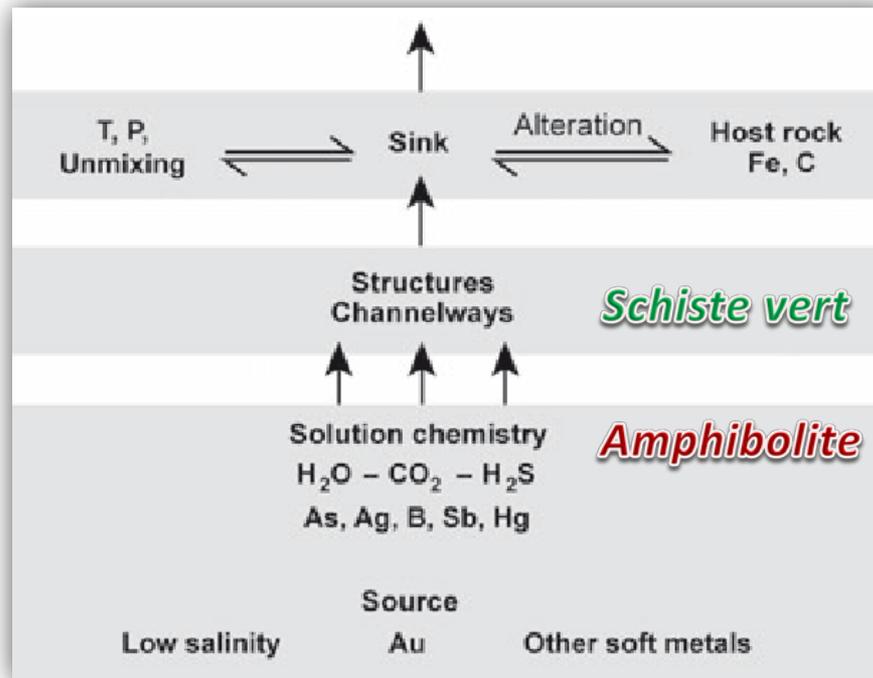
Type de failles	Nb de segments de failles	Surface (km ²)	Tonnes Au	Ratio T Au/ km ²	Nb mines et gîtes	Ratio gites/km ²
Avec contraste métamorphique et bassins séd.	38	12 020	4130	0,344	329	0,027
Autres segments de faille	252	26 360	2307	0,088	325	0,012
				3,9 x Au /km²		2,3 x +gîtes

0 100
kilometres

Sources des données sur l'or: Gosselin et Dubé (2007), OGS, Sigéom 2013, et mise à jour Consorem

3. Cibles d'exploration régionale

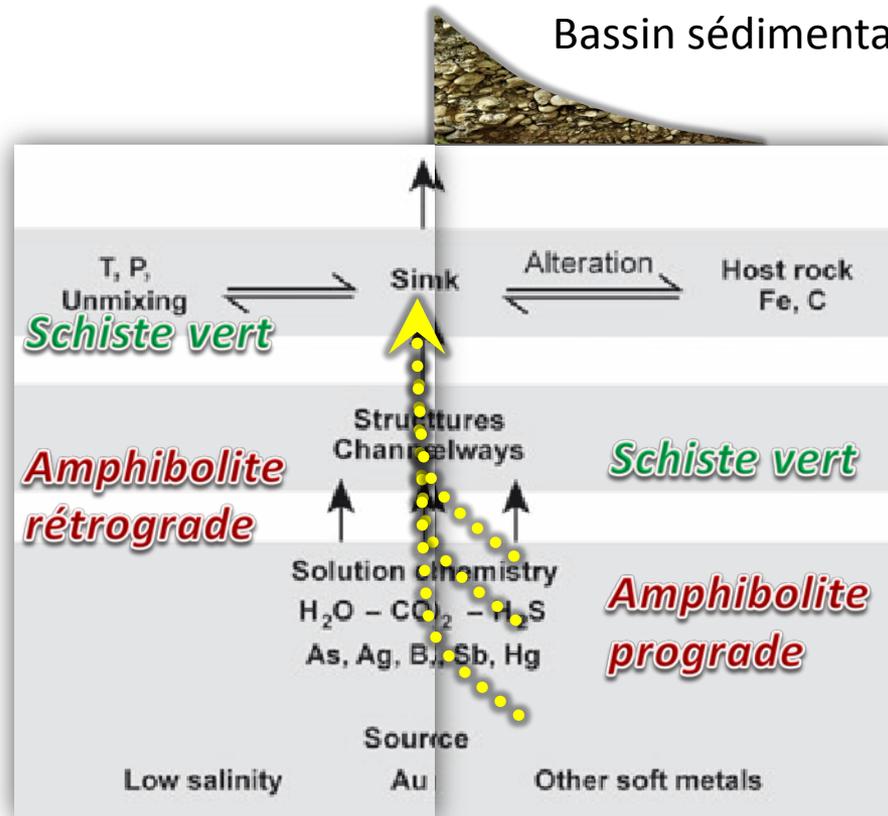
2- Minéralisations aurifères le long des failles – importance du métamorphisme



Phillips et Powell 2010

3. Cibles d'exploration régionale

2- Minéralisations aurifères le long des failles – importance du métamorphisme

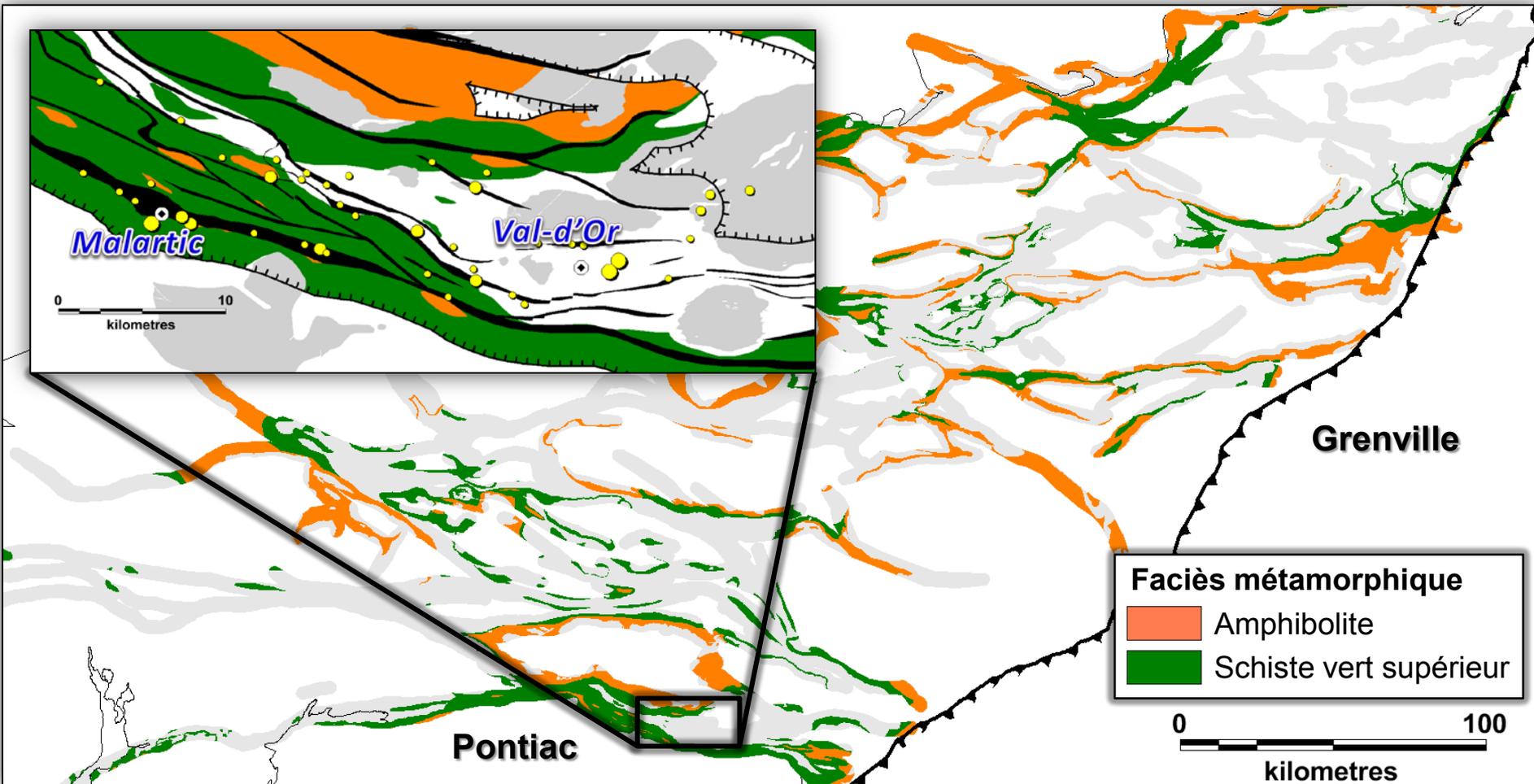


Phillips et Powell 2010

3. Cibles d'exploration régionale

2- Distance à l'isograde schiste vert supérieur dans les couloirs de déformation

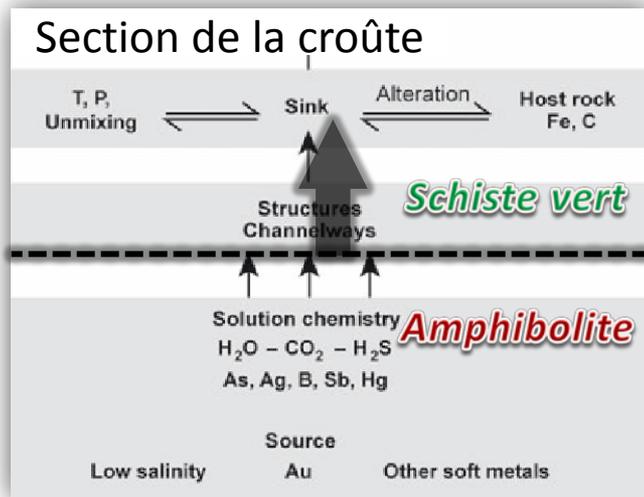
Métamorphisme dans les couloirs de déformation et leur enveloppe de 2km



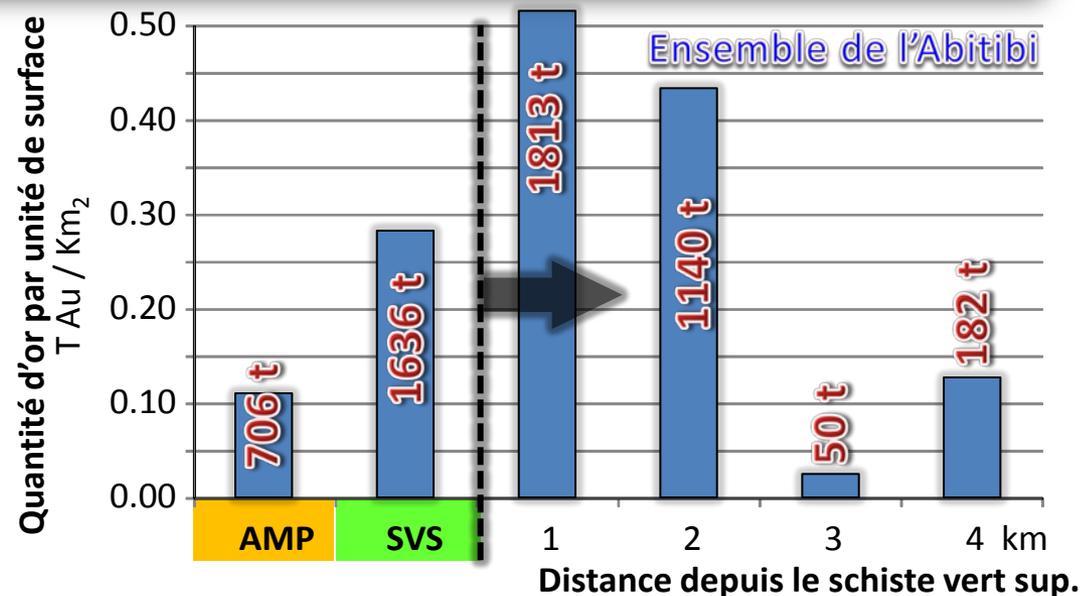
3. Cibles d'exploration régionale

2- Distance à l'isograde schiste vert supérieur dans les couloirs de déformation

Métamorphisme dans les couloirs de déformation et leur enveloppe de 2km



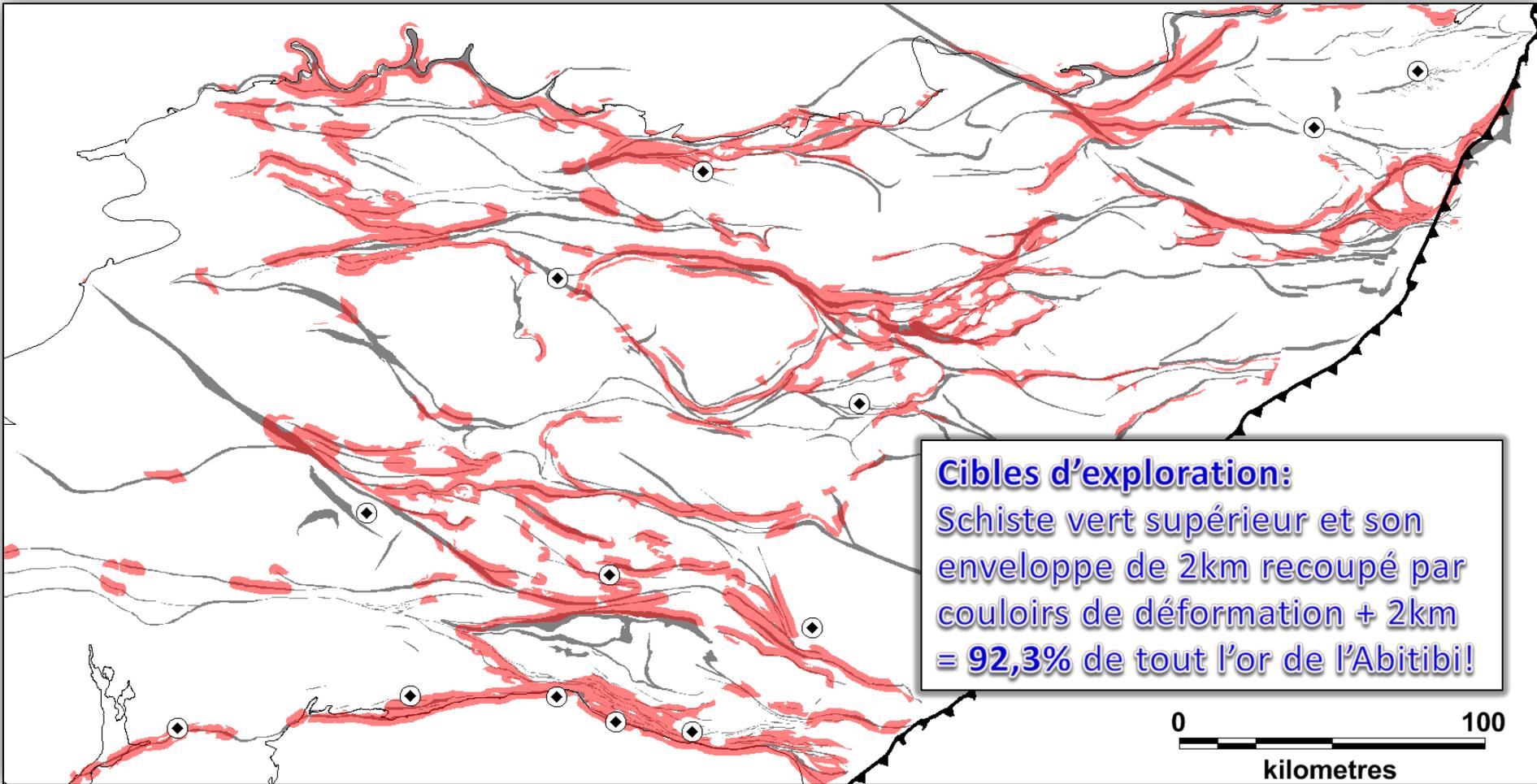
Phillips et Powell 2010



3. Cibles d'exploration régionale

2- Distance à l'isograde schiste vert supérieur dans les couloirs de déformation

Métamorphisme dans les couloirs de déformation et leur enveloppe de 2km



4. Conclusions

- Première carte métamorphique précise de l'Abitibi du côté québécois qui permet de mieux cibler les secteurs d'intérêt selon le modèle de gisement recherché.
- Relation entre le métamorphisme et l'or orogénique semble être démontrée avec les données utilisées.
- Analyse spatiale appuie le modèle de dévolatisation de la croûte et l'hypothèse que les minéralisations d'or orogénique se forment dans le schiste vert supérieur et dans le schiste vert très près de la limite du schiste vert supérieur (1 à 2 km en plan pour l'Abitibi).
- Guides d'exploration
 - Formations de fer dans les faciès SVS et amphibolites.
 - Le contraste de métamorphisme et la présence de bassins sédimentaires le long de certains segments de failles expliquent un facteur d'enrichissement en or de 2 à 4 fois plus important que dans les autres segments.

Merci de votre attention

Remerciements

Ministère: Jean Goutier, Pierre Pilote, Pierre Doucet

Virginia: Sylvain Trépanier

Consorem: Réal Daigneault et Lucas Briao-Koth (UQAC)