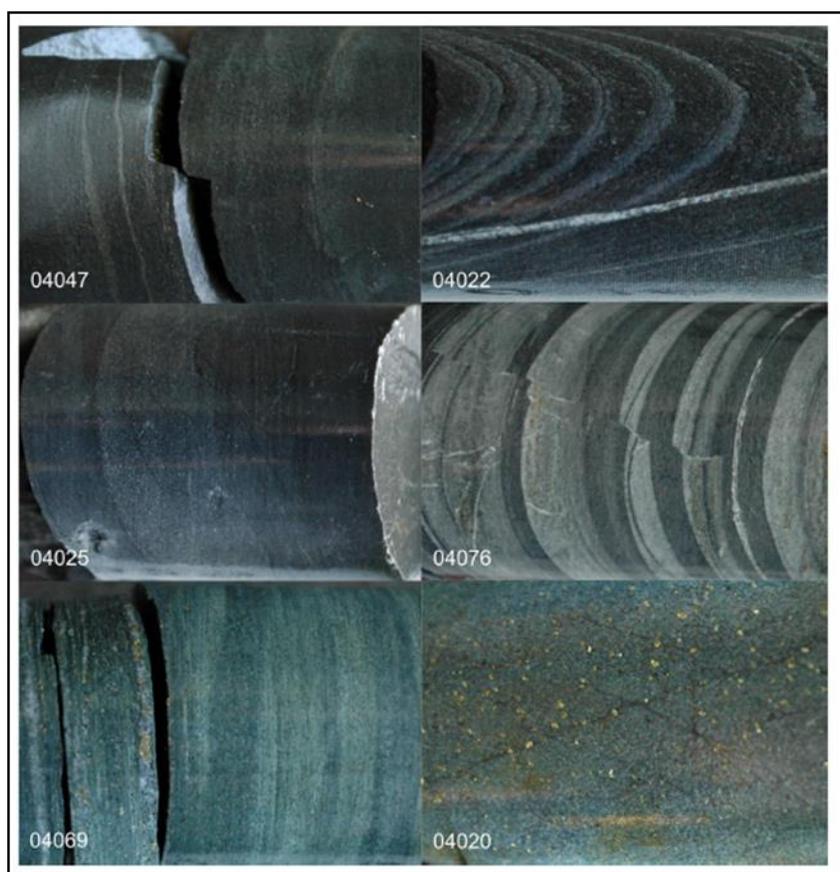

Discrimination des conducteurs électromagnétiques graphitiques et sulfurés

PROJET 2013-06



RAPPORT PRELIMINAIRE

PAR : SILVAIN RAFINI, GEO, PH.D.

AVRIL 2014

AVERTISSEMENT

Ce document présente certains résultats des travaux de recherche du CONSOREM (Consortium de Recherche en Exploration minérale) rendus publics pour le bénéfice de l'ensemble de la communauté géologique, ceci après la période de confidentialité prévue aux règlements généraux du CONSOREM.

Bien que ce document ait subi un processus d'évaluation interne, des erreurs ou omissions peuvent s'y retrouver et seul CONSOREM en assume la responsabilité.

Le contenu du document demeure la propriété de CONSOREM et peut être reproduit en totalité ou en partie à des fins non-commerciales en citant la référence suivante :

Rafini, S., 2014. Discrimination des conducteurs électromagnétiques graphitiques et sulfurés. Rapport, Projet CONSOREM 2013-06, 20 p.

Toutefois, la reproduction multiple de ce document, en tout ou en partie, pour diffusion à des fins commerciales est interdite, sauf avec la permission écrite de CONSOREM.

CONSOREM

Université du Québec à Chicoutimi
555, boulevard de l'Université
Chicoutimi, QC, G7H 2B1

Tél. : (418) 545-5011 poste 5634

Courriel : consorem@uqac.ca
Site Web: www.consorem.ca

RÉSUMÉ

Ce travail fait suite au projet 2010-04 « Réévaluation conceptuelle des modèles d'exploration pour les SMV en Abitibi » qui détaillait le potentiel en SMV de types non-conventionnels en Abitibi : le « type mafique » et le « type pélitique-mafique ». Ce projet concluait sur la proposition de nouvelles stratégies d'exploration associées à la recherche de ces types de SMV, notamment dans le ciblage des anomalies EM. Les critères utilisés pour la recherche des SMV conventionnels, de type « bimodal mafique », sont entre autre « anomalie EM isolée » et « coexistence de roches mafiques et de rhyolites ». Inversement, les nouvelles stratégies proposaient d'investiguer le potentiel d'environnements de roches sédimentaires et mafiques, qui constituent plus de 90% des volcanites de l'Abitibi. Le projet 2010-04 insistait sur la pertinence d'explorer, dans ces contextes, les anomalies EM situées le long des conducteurs linéaires formés par les horizons graphitiques qui étaient jusqu'ici systématiquement écartés, et sur l'importance d'y discriminer les réponses EM des conducteurs graphitiques et sulfurés. Des résultats préliminaires très prometteurs concernant cette discrimination étaient apportés, obtenus par l'analyse statistique des variations longitudinales du signal EM corrélées avec la présence de sulfures. La présente étude vise à poursuivre ce travail en distinguant toutefois les deux problématiques : 1) un décryptage approfondi de l'information contenue dans chacun des canaux du signal EM permet-il d'identifier des signatures caractéristiques discriminantes entre les anomalies causées par des conducteurs graphitiques et celles causées par des lentilles de sulfures massifs ? ; 2) l'analyse des variations longitudinales des anomalies contenues dans les conducteurs linéaires graphitiques permet-elle de détecter des lentilles de sulfures massifs « masquées » par la forte conductance du graphite ?

La première problématique a été abordée de manière exclusivement empirique, en cherchant des corrélations entre l'intensité du signal dB/dt des 20 canaux de réception (5 *on-time* et 15 *off-time*), et les caractéristiques géochimiques et/ou minéralogiques de l'intervalle conducteur responsable de l'anomalie, intercepté en forage. Les analyses géochimiques utilisées proviennent de Hannington (2012; MRD291), et correspondent à des argillites graphitiques sulfurées échantillonnées suivant un protocole spécifiquement attaché à cibler l'intervalle conducteur : 1) par MEGATEM et 2) par des critères pétrographiques directement sur les carottes de forage. Les indices géochimiques utilisés, S(%) pour la teneur en sulfures et C_graph(%) pour la teneur en graphite, ont été intégrés dans une base de données avec les valeurs de tous les canaux MEGATEM de l'anomalie mesurée à l'aplomb de l'intervalle échantillonné. Un code spécifique a été programmé afin de piquer les anomalies MEGATEM à partir des localisations des forages, d'extraire les données géophysiques associées et de calculer certains « attributs » des anomalies. Des corrélations ont par la suite été intensivement cherchées par l'entremise de méthodes statistiques avancées : analyses en composantes principales (ACP) et régression linéaire multiple (RLM). Il en résulte que :

- 1) Les données disponibles ne permettent pas de trancher catégoriquement sur la possibilité de discriminer entre sulfures et graphite. Ceci principalement pour deux raisons : a) la fiabilité discutable des critères pétrographiques pour reconnaître l'intervalle conducteur, cet aspect serait facilement réglé en échantillonnant avec un conductivimètre, et b) les sulfures massifs ne sont pas assez représentés.
- 2) Un nouveau paramètre est proposé, l'indice I1, correspondant au rapport des canaux *ontime* moyens sur les canaux *offtime* précoces et moyens. Les ACP démontrent que ce rapport contient l'essentiel de la variabilité du signal électromagnétique, et qu'il présente un potentiel

de discrimination. Il montre une corrélation claire avec la teneur en sulfures (pyrite, pyrrhotite), tandis qu'il est nettement moins influencé par la teneur en graphite.

- 3) La prédiction statistique, par RLM, de la teneur en carbone graphitique d'un conducteur à partir des attributs de l'anomalie MEGATEM est très satisfaisante.

La deuxième problématique a été étudiée en compilant les horizons graphitiques de l'Abitibi québécois couverts par des levés MEGATEM, dans lesquels des corps minéralisés caractérisés sont présents. Ces conducteurs linéaires ont été circonscrits et les anomalies les constituant ont été analysées afin d'étudier leur variabilité longitudinale. L'objectif de cet exercice était de vérifier l'hypothèse selon laquelle les lentilles de sulfures massifs produisent un signal anomal, qui se distingue du « bruit de fond » de l'horizon graphitique lié aux variations de la teneur en graphite et en sulfures primaires. Trois paramètres ont été considérés : la constante de temps *Tau* sur les canaux moyens, l'enveloppe d'énergie totale au canal 12 du champ B, et l'indice I1 décrit ci-dessus. Ces paramètres expriment la conductance du milieu rocheux de manière relativement indépendante, et ne sont sensiblement pas affectés par la couverture quaternaire. Les résultats obtenus sont extrêmement concluants : les lentilles de sulfures massifs sont détectées dans presque tous les cas. L'hypothèse se vérifie donc : le cumul de la conductance « de fond » de l'horizon graphitique avec celle des lentilles sulfurées fait que les trois paramètres ressortent nettement plus élevés à l'aplomb de lentilles que dans le reste de l'horizon graphitique. Ce travail a permis de réaliser un ciblage systématique des anomalies MEGATEM potentiellement associées à la présence de sulfures massifs au sein des conducteurs graphitiques de l'Abitibi. Quarante-cinq (95) cibles directes ont été générées par cette méthodologie.

TABLE DES MATIÈRES

1. Problématique et objectifs.....	2
2. Introduction méthodes EM.....	3
3. Recherche empirique d'un signal discriminateur dans la réponse MEGATEM des conducteurs linéaires : statistiques multivariée.....	4
Sources de données géologiques utilisées.....	4
Variables géochimiques utilisées.....	5
Analyse en Composantes Principales.....	6
4. Détection des sulfures massifs par l'analyse des variations longitudinales des anomalies MEGATEM le long des conducteurs linéaires graphitiques en Abitibi.....	10
Introduction de l'approche longitudinale.....	10
Variables géophysiques.....	11
Analyse des corrélations entre les paramètres utilisés.....	12
Levés MEGATEM et conducteurs linéaires utilisés.....	12
Cas 1 - JOUTEL.....	13
Cas 2 – GREVET OUEST.....	15
Cas 3 – MATAGAMI OUEST.....	16
Cas 4 – SELBAIE OUEST.....	16
Génération de cibles	17
5. Conclusions	18

Discrimination des conducteurs électromagnétiques graphitiques et sulfurés

Projet 2013-06

Silvain Rafini

Collaboration spéciale de Michel Allard



/1

PLAN DE LA PRÉSENTATION

1. Problématique et objectifs
2. Introduction méthodes EM
3. Approche statistique : analyse multivariée des relations entre la nature minérale d'un conducteur linéaire et la réponse MEGATEM associée
4. Approche spatiale : analyse de la variabilité longitudinale des anomalies MEGATEM le long des conducteurs linéaires en Abitibi – influence des sulfures massifs connus
5. Conclusions

/2

1. Problématique et objectifs : historique des projets précédents

MEGATEM et horizons graphitiques : la piste longitudinale (projet 2010-04)

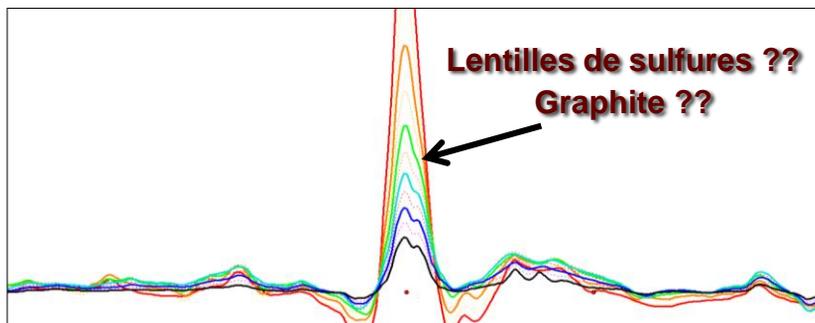
- **Modèle classique exploration SMV en Abitibi : « bimodal mafique » (Noranda)**
 → MEGATEM (2001-2006, 180 000 km) : ciblage focalisé sur anomalies **isolées** (1 indice)
- **Recherche de nouvelles avenues pour exploiter le MEGATEM**
- **Le potentiel des anomalies situées le long des conducteurs linéaires - le plus souvent horizons graphitiques associés à des bassins sédimentaires - n'a pas été exploré (modèle SMV péritique-mafique, cf. projet 2010-04)**
- **2010-04 : vision longitudinale horizons graphitiques ; variations réponse EM = sulfures ?**
- **Idee de chercher des sulfures massifs dans les horizons graphitiques à travers leur analyse longitudinale a été amorcée lors du projet 2010-04.**

→ Volonté d'approfondir cette approche

/3

1. Problématique et objectifs: Discrimination EM sulfures - graphite

- **Conductivités jusque 10^8 , très supérieure aux autres minéraux → Anomalies EM très contrastées, tant pour les sulfures que le graphite.**
 - **Discrimination : intérêt majeur pour la détection des SM, St Graal des géophysiciens (modélisation essentiellement).**
- **Regard d'un géologue : approche empirique, recoupement avec les données géologiques.**

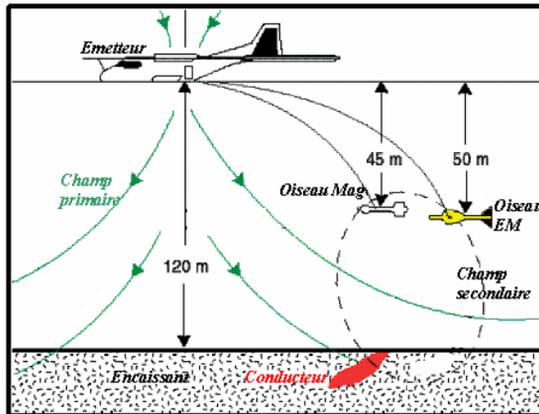


/4

2. Introduction MEGATEM

Systèmes AEM (Airbone Electro Magnetism)

1. Émission d'un champ magnétique par une source située dans l'avion : **le champ primaire**
2. Le champ primaire génère, dans les corps conducteurs enfouis, un courant électrique (*Eddy current*), induisant un **champ secondaire**
3. L'oiseau (**récepteur**) mesure le champ secondaire

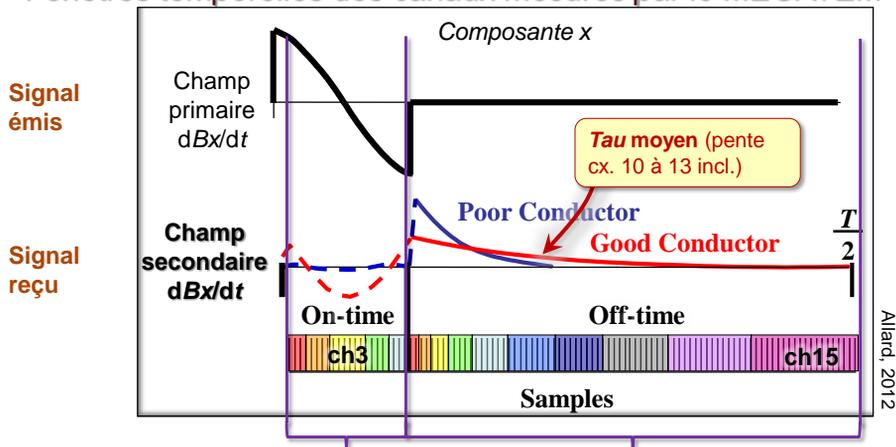


GEOTEM, MEGATEM : **magnétisme** de la terre est aussi mesuré → utilisé pour discriminer les sulfures (souvent associés à la pyrrhotite et donc magnétiques) des autres conducteurs (argiles, graphite, non magnétiques)

/5

2. Introduction MEGATEM

Fenêtres temporelles des canaux mesurés par le MEGATEM



Canaux 1 – 5 : On time

Rarement utilisés car le signal mesuré est une combinaison de la réponse du sous-sol (réponse en quadrature) et du **signal primaire** émis par l'avion (réponse en phase)
 → difficulté d'interprétation

Canaux 6 – 20 : Off time

Après extinction du champ primaire.
 Portion du signal utilisée par les géophysiciens

/6

PARTIE 3

Recherche empirique d'un signal discriminateur dans la réponse MEGATEM des conducteurs linéaires : statistiques multivariées

Données MEGATEM sur les conducteurs linéaires graphitiques de l'Abitibi

→ Analyse statistique des corrélations entre

- la **nature du conducteur** (données géologiques, sulfure vs graphite) et
- sa **réponse MEGATEM** (données géophysiques)

/7

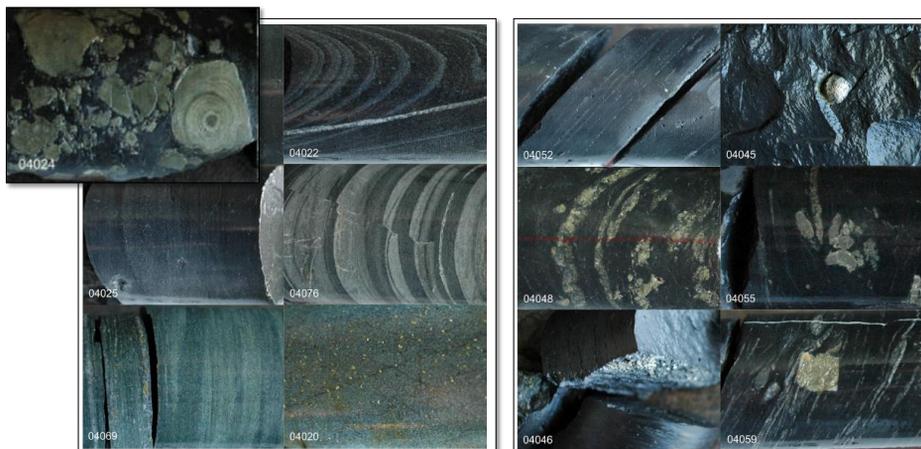
Sources de données géologiques utilisées

1. Hannington et al, 2001

- Proportions minérales dans 402 argilites graphitiques sulfurées (Kidd Munro, Ont.)
- Données homogènes et de très bonne qualité

2. MRD 291 (Hannington et al, 2012)

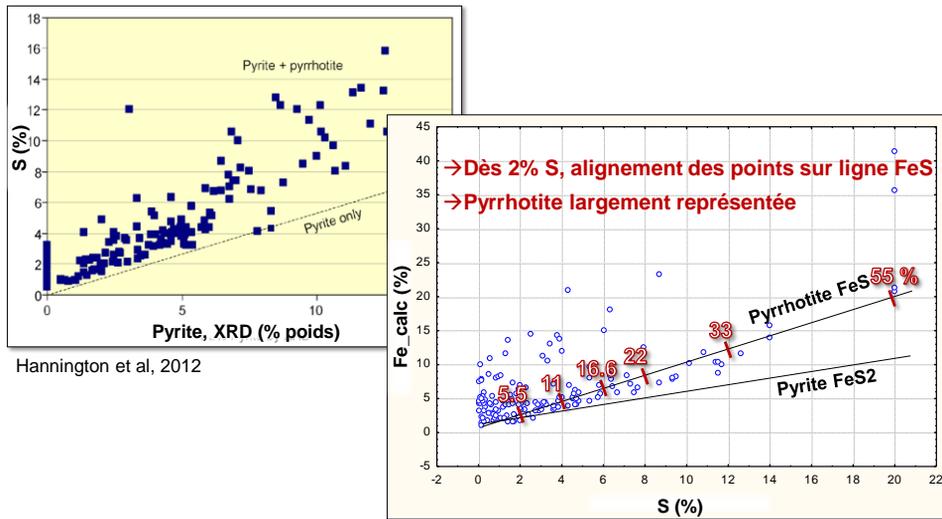
- 564 analyses géochimiques complètes d'argilites graphitiques sulfurées (Kidd Munro, Ont.)



/8

3. Variables géochimiques utilisées, distribution sulfures

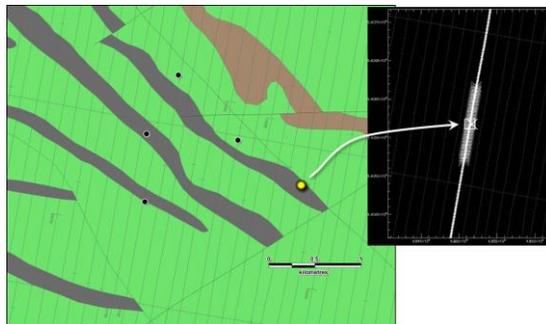
- Échantillonnage de l'intervalle conducteur générant l'anomalie MEGATEM (Hannington, et al., 2001, 2012)
- **S (%)** : indicateur de la teneur en sulfures
- **C_graph (%)** : indicateur de la teneur en graphite $C_{graph} = C_{total} - CO_2/3.66$



3. Variables géochimiques utilisées

Codage (IDL) :

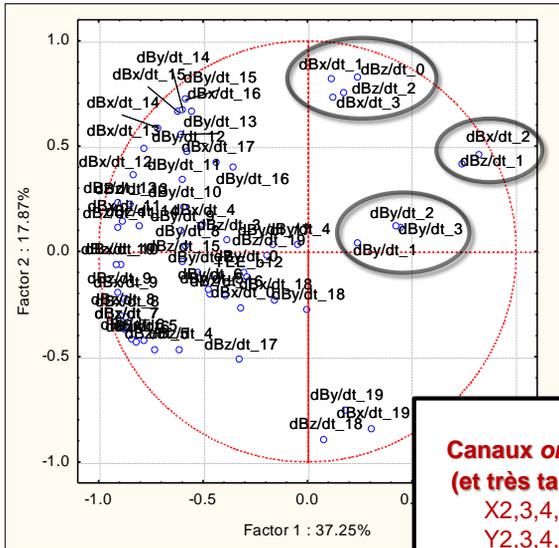
1. Récupération automatique des données MEGATEM brutes sur l'intervalle anomalique à l'aplomb de chaque échantillon des databases de Hannington : canaux 1 à 20, axes X, Y, Z
1. Calcul automatique des « attributs » de chaque anomalie : position du pic d'anomalie sur chaque canal/axe, détection d'un deuxième pic, du creux, calcul du Tau et de la longueur d'onde de l'anomalie etc.)



/10

3. Analyse en Composantes Principales

Données MEGATEM seulement → composantes 1 et 2



Composante 1	
Variable	R (coordonnée)
dBx/dt_2	0.823289
dBz/dt_1	0.736848
dBy/dt_2	0.443905
dBy/dt_3	0.426668
dBx/dt_19	0.306295
dBy/dt_1	0.238485
dBz/dt_0	0.237903
dBy/dt_19	0.180040
...	...
dBx/dt_11	-0.885186
dBz/dt_8	-0.891103
dBx/dt_10	-0.897473
dBz/dt_12	-0.905053
dBz/dt_9	-0.909111
dBz/dt_11	-0.909270
dBz/dt_10	-0.916972

Résumé* :	
Canaux ontime (et très tardifs)	Canaux offtime moyens et précoces
X2,3,4,20	X6→16
Y2,3,4,20	Y6→16
Z1,2,3	Z6→16

* Numérotation standard (1→20)

/11

3. Analyse en Composantes Principales

Données MEGATEM et S (%), C_graph (%)

Composante 1 (53.53%)

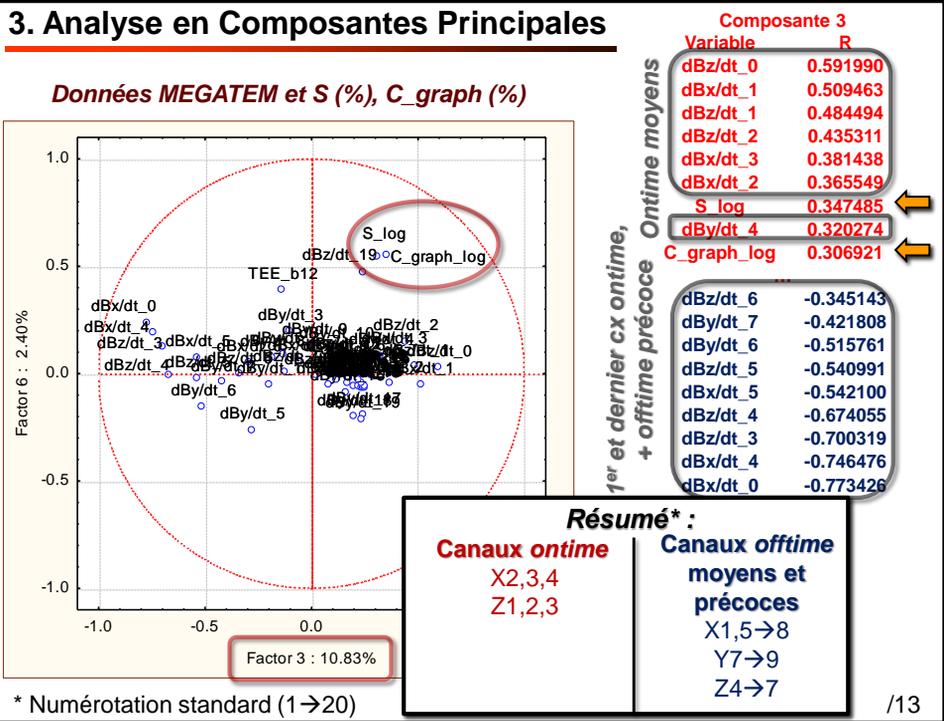
canaux ontime moyens X2→4, Y2→4, Z1→3

vs

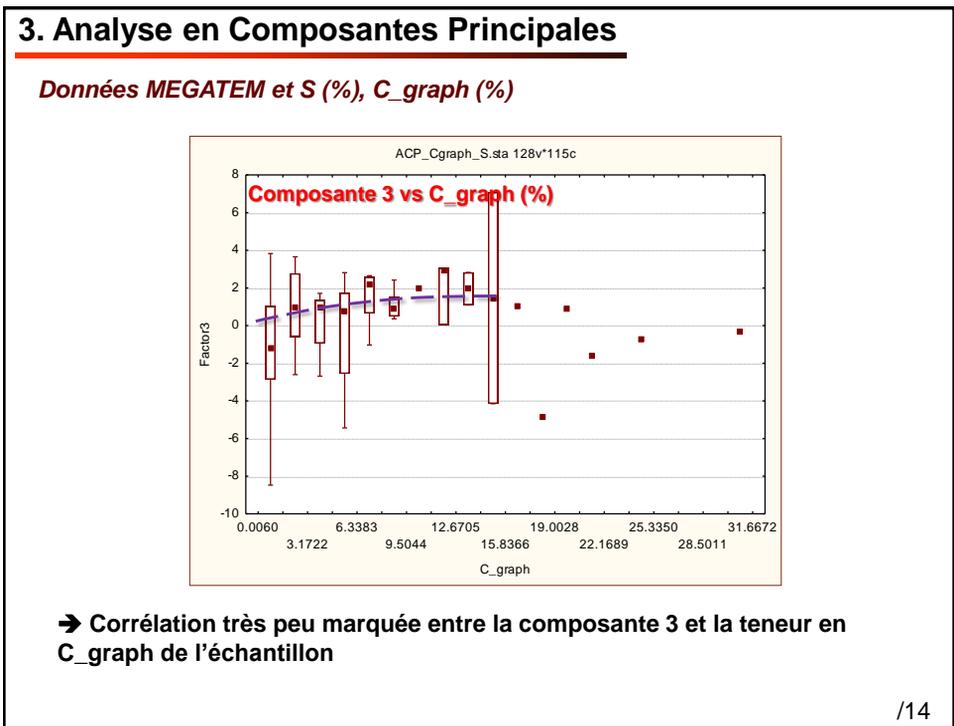
canaux offtime précoces et moyens 6→16 (X,Y,Z)

→ Idem composante 1 de l'ACP précédente (données géophysiques seulement)

/12



/13

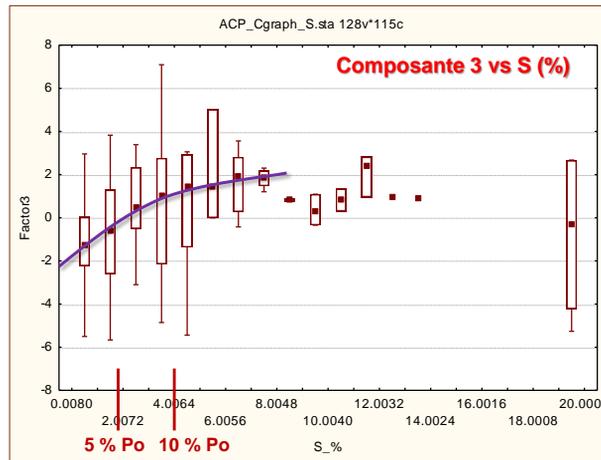


/14

3. Analyse en Composantes Principales

Données MEGATEM et S (%), C_graph (%)

Composante 3 vs nature sulfurée ou graphitique du conducteur

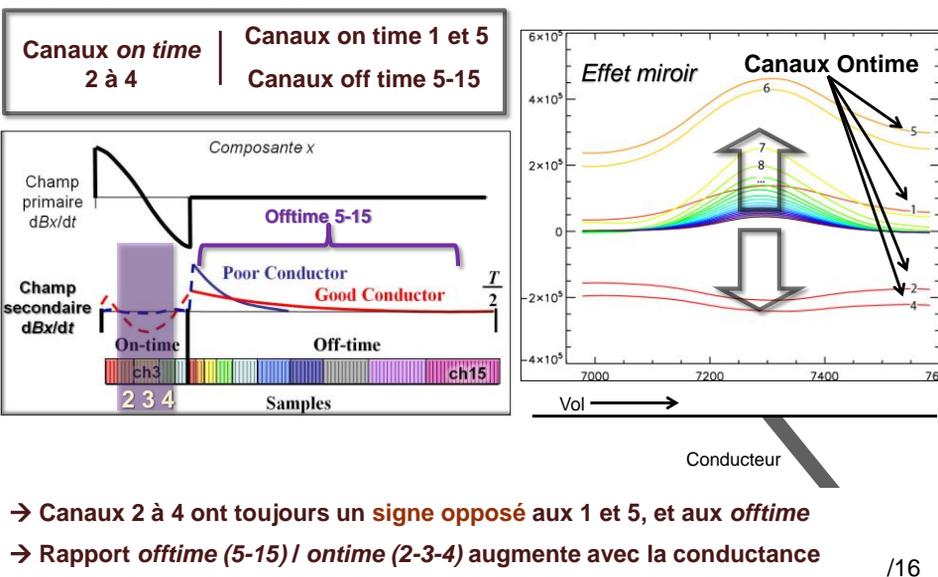


- Corrélation positive très claire entre la composante 3 et la teneur en S
- Composante 3 = potentiel pour discrimination...

/15

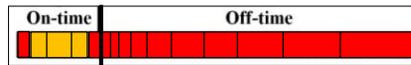
3. Analyse en Composantes Principales: Synthèse

L'essentiel de la variabilité des anomalies MEGATEM sur les conducteurs graphitiques indique l'opposition suivante :



/16

3. Analyse en Composantes Principales: Conclusions



1. Une portion dominante de la variabilité des réponses MEGATEM exprime l'opposition suivante :

Cx ontime moyens (X2→4, Y2→4, Z1→3)

versus

Cx ontime précoce et tardifs (X1,5, Z4,5)

Cx offtime précoces et moyens 5→15 (X,Y,Z)

On propose donc l'indice I1 :

$$I1 = \text{Moy}(X5 \rightarrow 15 ; Z5 \rightarrow 15) / \text{Moy}(X2,3,4 ; Z1,2,3)$$

2. **I1 est corrélé à la teneur en sulfures du conducteur**

/17

3. Analyse en Composantes Principales: Conclusions

3. **I1 est moins clairement corrélé à la teneur en graphite du conducteur**

→ Présente *un certain potentiel* de discrimination sulfure/graphite

4. Plusieurs méthodes statistiques (ACP, régression multiple : voir présentation CGS novembre) ont été utilisées pour **tester le potentiel discriminatoire du signal MEGATEM**. Les données disponibles **ne permettent pas de trancher** en raison :

1. d'une incertitude subsistante sur le fait que **l'intervalle échantillonné est l'horizon conducteur** et que **l'échantillon est représentatif** de cet intervalle ;
2. d'une quantité insuffisante de sulfures massifs graphitiques dans bases disponibles.

Options → 1. échantillonner avec un conductivimètre ; 2. échantillonner des sulf. mass. graphitiques

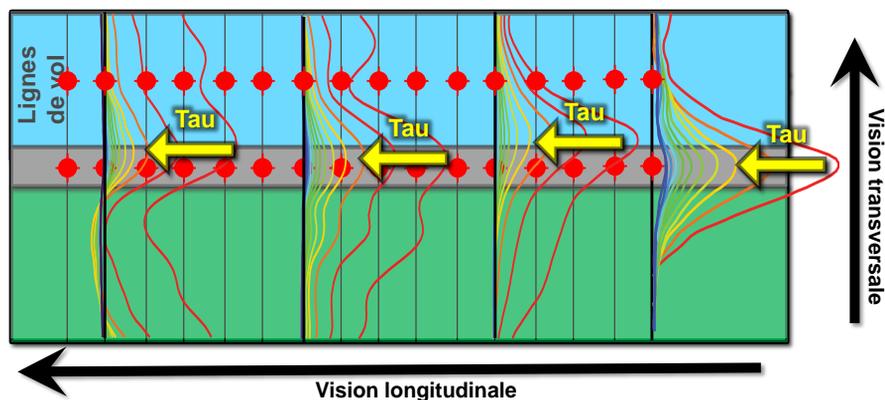
/18

4. Détection des sulfures massifs par l'analyse des variations longitudinales des anomalies MEGATEM le long des conducteurs linéaires graphitiques en Abitibi

/19

4. Introduction de l'approche longitudinale

Étude de la variabilité longitudinale le long des conducteurs linéaires minéralisés (contenant des gîtes/indices connus en métaux de base)

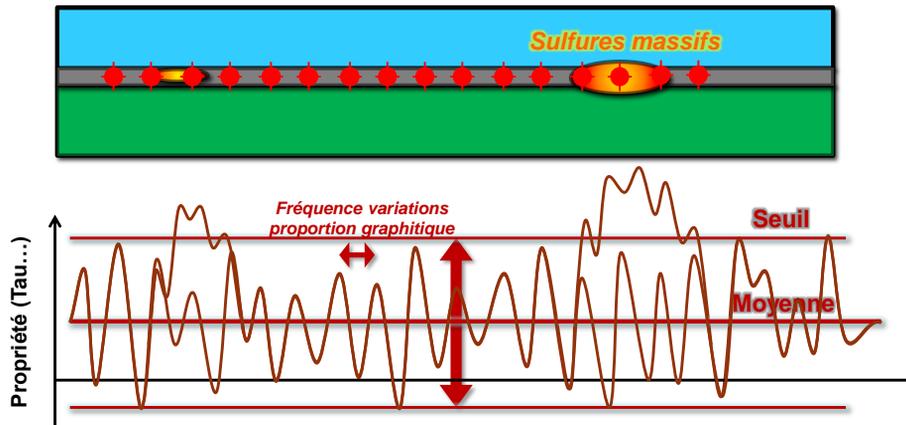


- Propriétés de l'anomalie (paramètres Tau etc.), intensité.
- Vision longitudinale : **variations** des propriétés des anomalies (Tau...) : variations de la conductivité du conducteur linéaire traduisant des **changement de composition (teneurs en graphite et sulfures diagénétiques ou hydrothermaux)**

/20

4. Introduction de l'approche longitudinale

Étude de la variabilité longitudinale le long des conducteurs linéaires minéralisés
 (contenant des gîtes/indices connus en métaux de base)



1. Variabilité du bruit de fond due aux variations des proportions de la roche en graphite et sulfures primaires → écart-type, moyenne, fréquences caractéristique etc.
2. Conductivités sont *cumulatives* → si une lentille sulfurée est présente, son vortex devrait se superposer à celui de l'horizon graphitique (*bruit de fond*)
 → anomalie excède ponctuellement la variabilité du bruit de fond

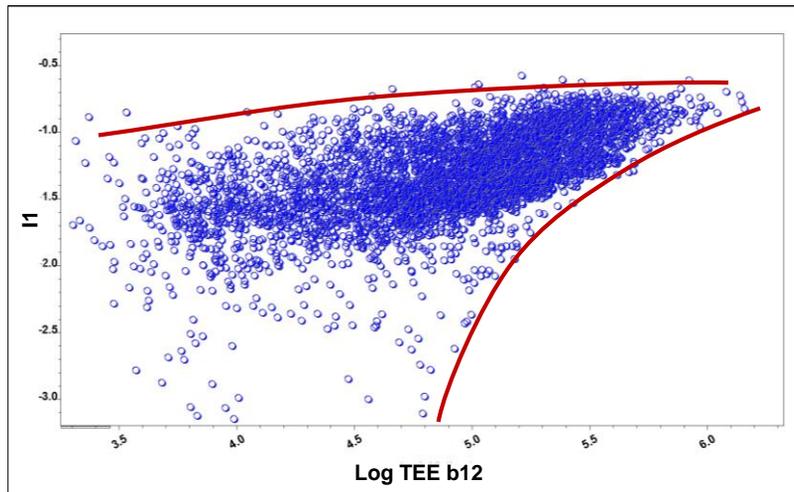
/21

4. Variables géophysiques

- Anomalies piquées manuellement par XStrata-Zn
- Réparties par XStrata-Zn en 6 catégories qualitatives d'«intensité » plus 2 autres
 - cat. 1 : anomalie sur canaux 10 à 11 incl.
 - cat. 2 : anomalie sur canaux 10 à 13 incl.
 - cat. 3 : anomalie sur canaux 10 à 15 incl.
 - cat. 4 : anomalie sur canaux 10 à 17 incl.
 - cat. 5 : anomalie sur canaux 10 à 19 incl.
 - cat. 6 : anomalie sur canaux 10 à 20 incl.
 - cat. 7 : anomalie anthropique
 - cat. 8 : anomalie profonde (surtout bz, canaux tardifs)
- Caractéristiques quantitatives utilisées dans cette étude
 - Indice I1 → amplitudes relatives
 - TEE b12 → amplitude absolue
 - Tau précoce, moyen, tardif → décroissance temporelle
 - Longueur d'onde dbx
- Ces paramètres ne sont sensiblement pas influencés par l'épaisseur de mort-terrain

/22

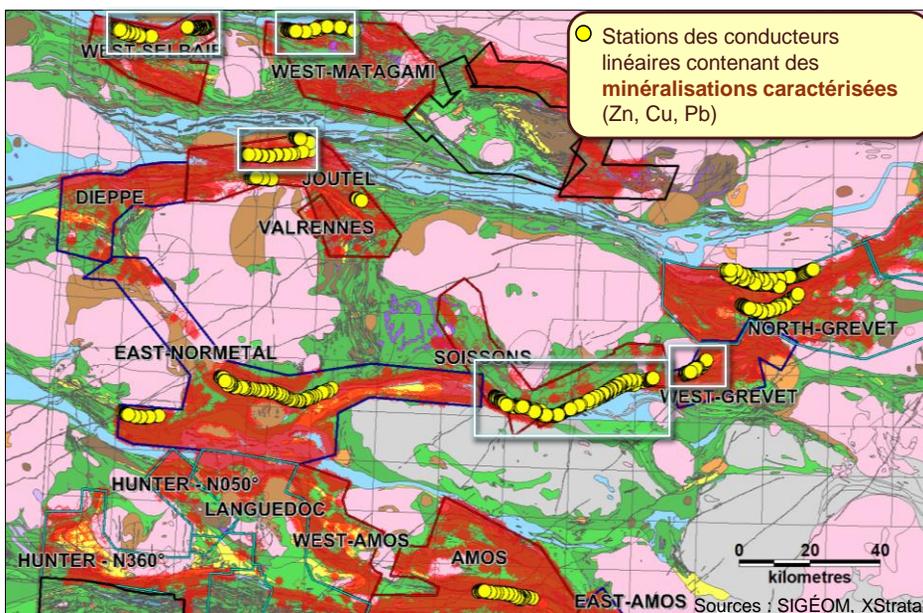
4. Analyse des corrélations entre les paramètres utilisés



Bonne corrélation dans les hautes valeurs, dispersion dans valeurs basses
 → Les deux variables devraient **converger dans les zones d'intérêt** (hautes valeurs)
 → Anomalies **concomitantes TEEb12 et I1**

/23

4. Levés MEGATEM et conducteurs linéaires utilisés

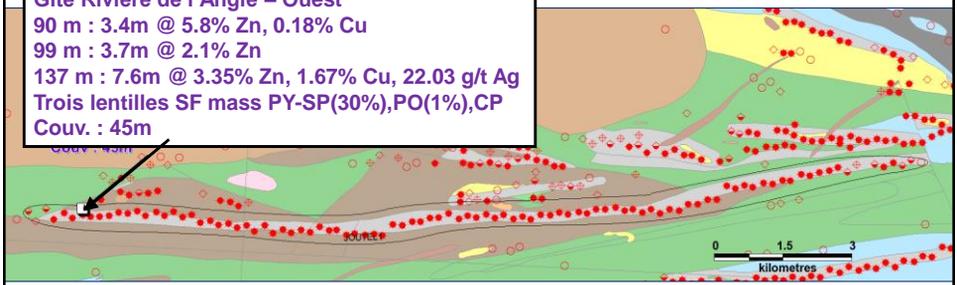


/24

4. Cas 1 - JOUTEL

JOUTEL1
 Tuf graphitique (V3B[TUJ-S6,GP])
 Groupe d'Orvilliers-Desmazures

Gîte Rivière de l'Angle – Ouest
 90 m : 3.4m @ 5.8% Zn, 0.18% Cu
 99 m : 3.7m @ 2.1% Zn
 137 m : 7.6m @ 3.35% Zn, 1.67% Cu, 22.03 g/t Ag
 Trois lentilles SF mass PY-SP(30%),PO(1%),CP
 Couv. : 45m



- | | | |
|----------|----------|--------------------------------|
| ○ Cat. 1 | ⬠ Cat. 4 | ■ Granitoïdes |
| ○ Cat. 2 | ⬠ Cat. 5 | ■ Roches sédimentaires |
| ⊕ Cat. 3 | ⬠ Cat. 6 | ■ Roches volcaniques felsiques |
| | | ■ Tufs graphitiques |
| | | ■ Roches volcaniques mafiques |

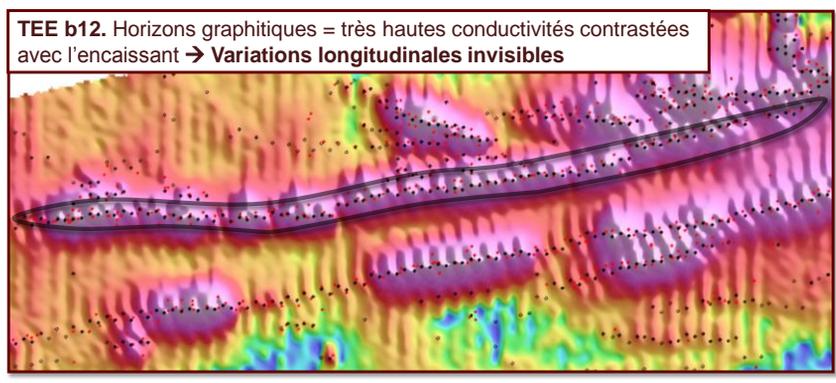
Source : XStrata

Toutes les anomalies le long de l'horizon graphitique sont de même « intensité » :
catégorie 6 (canaux 10 à 20 inclus)

/25

4. Cas 1 - JOUTEL

TEE b12 en vision conventionnelle (carte) → variations longitudinales invisibles le au sein du conducteur



Portion de la figure précédente

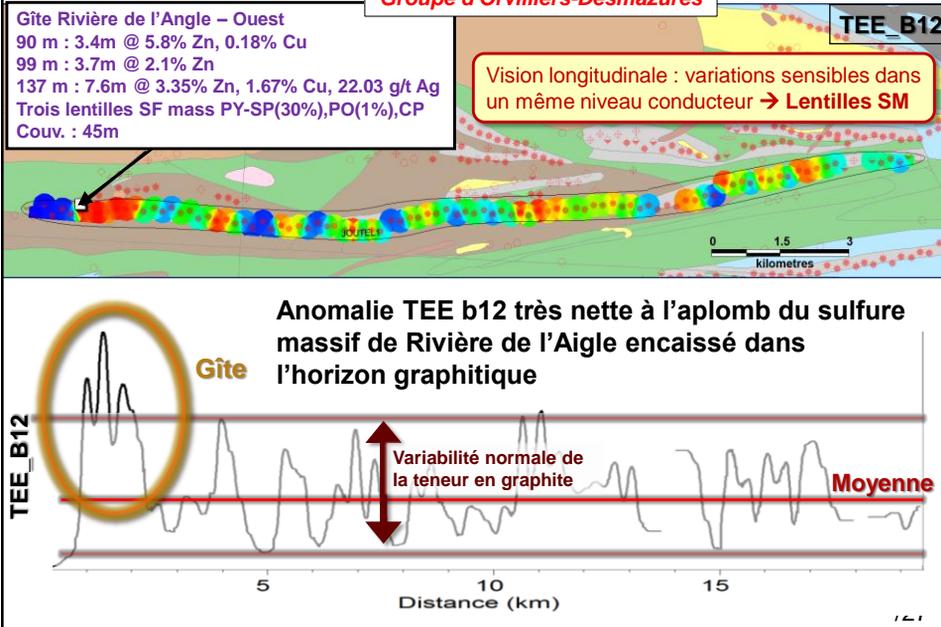
Source : XStrata

4. Cas 1 - JOUTEL

JOUTEL1
 Tuf graphitique (V3B[TU]-S6,GP)
 Groupe d'Orvilliers-Desmazures

Gîte Rivière de l'Angle – Ouest
 90 m : 3.4m @ 5.8% Zn, 0.18% Cu
 99 m : 3.7m @ 2.1% Zn
 137 m : 7.6m @ 3.35% Zn, 1.67% Cu, 22.03 g/t Ag
 Trois lentilles SF mass PY-SP(30%),PO(1%),CP
 Couv. : 45m

Vision longitudinale : variations sensibles dans un même niveau conducteur → **Lentilles SM**

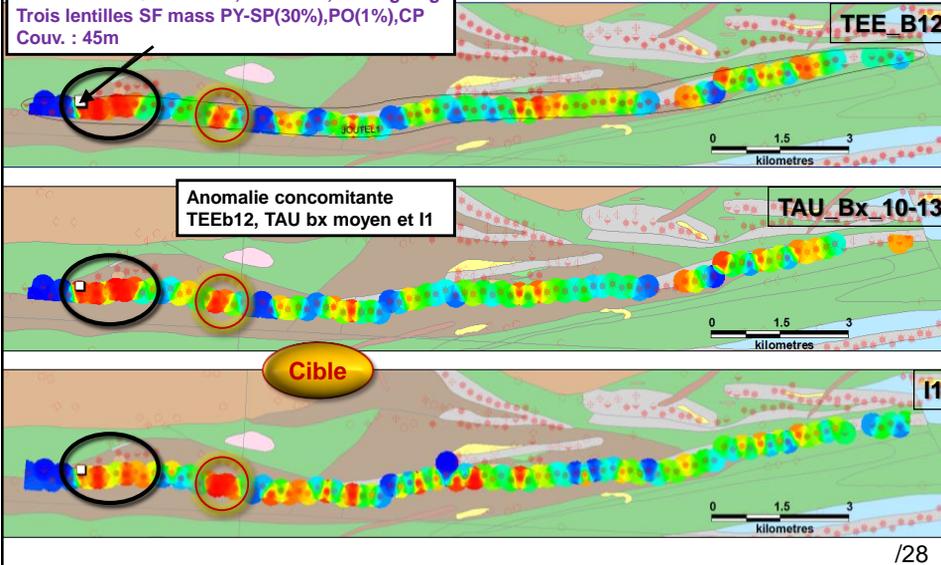


4. Cas 1 - JOUTEL

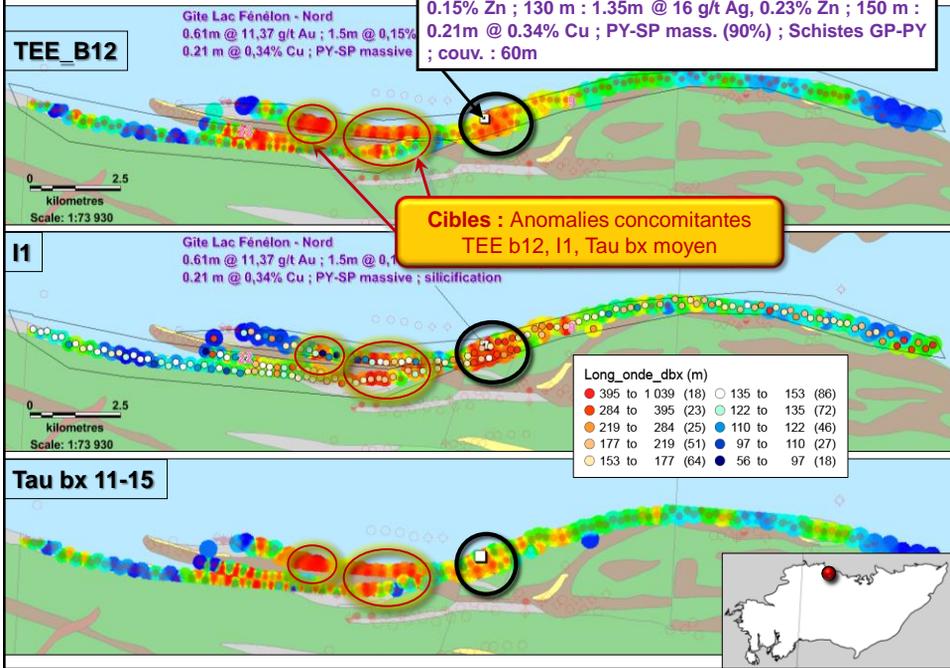
JOUTEL1
 Tuf graphitique (V3B[TU]-S6,GP)
 Groupe d'Orvilliers-Desmazures



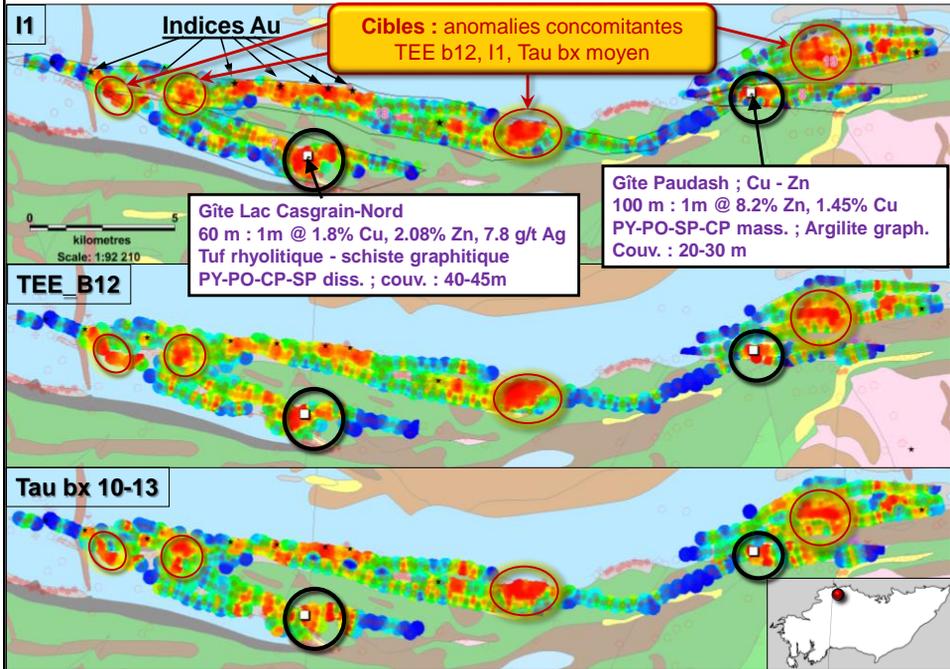
Gîte Rivière de l'Angle – Ouest
 90 m : 3.4m @ 5.8% Zn, 0.18% Cu
 99 m : 3.7m @ 2.1% Zn
 137 m : 7.6m @ 3.35% Zn, 1.67% Cu, 22.03 g/t Ag
 Trois lentilles SF mass PY-SP(30%),PO(1%),CP
 Couv. : 45m

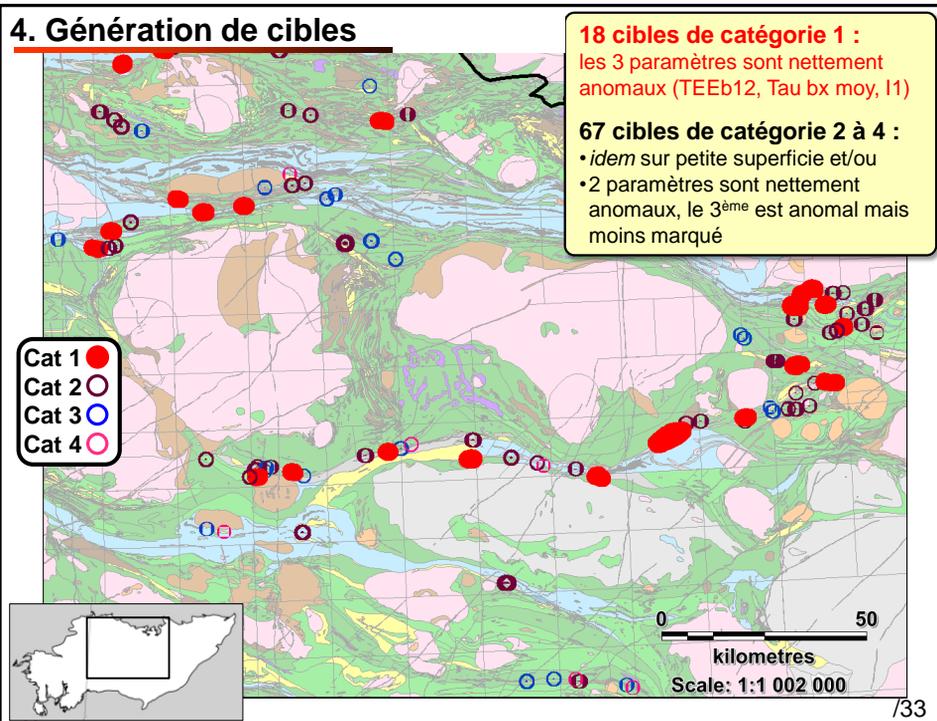


4. Cas 4 - Matagami-Ouest



4. Cas 5 - Selbaie-Ouest





5. CONCLUSIONS

- Les données disponibles ne permettent pas de trancher catégoriquement sur la possibilité de discriminer entre sulfures et graphite par le signal EM, toutefois l'indice I1 présente un potentiel (à confirmer par un levé de carottes plus approprié).
- La vision longitudinale le long des conducteurs linéaires ouvre un nouveau champ d'interprétation très prometteur pour le MEGATEM.
- Il est démontré sur 5 cas de minéralisations connues en Abitibi que cette approche permet de reconnaître l'empreinte EM d'un sulfure massif encaissé dans un horizon graphitique, par la superposition des réponses des deux types de conducteurs.

/34

5. CONCLUSIONS (suite)

- À défaut de pouvoir discriminer *sensu stricto* la nature graphitique ou sulfurée du conducteur, cette étude développe une méthodologie permettant de détecter des sulfures massifs encaissés dans des horizons graphitiques
- Les paramètres les plus efficaces à cet effet sont :
 1. L'enveloppe d'énergie totale (TEE) au canal 12 (canal peu affecté par l'effet mort-terrain et néanmoins très sensible à la présence de conducteurs), un paramètre calculé par FUGRO
 2. L'indice I1 (développé dans cette étude), qui englobe l'essentiel de la variabilité du signal électromagnétique, et qui oppose les canaux ontime aux canaux offtime
 3. Tau bx moyen (cx 10-20 ou cx 10-13)
 4. Les longueurs d'onde des anomalies : valeurs très basses et très hautes

La méthode a été appliquée sur l'ensemble des levés MEGATEM de l'Abitibi québécois → génération de 95 cibles directes

/35