

# Discrimination des conducteurs électromagnétiques graphitiques et sulfurés

Projet 2013-06

Silvain Rafini

Collaboration spéciale de Michel Allard

Atelier CONSOREM – Québec Mines – 17 novembre 2014



## 1. 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 ?**

---

## 2. Discrimination sulfures - graphite

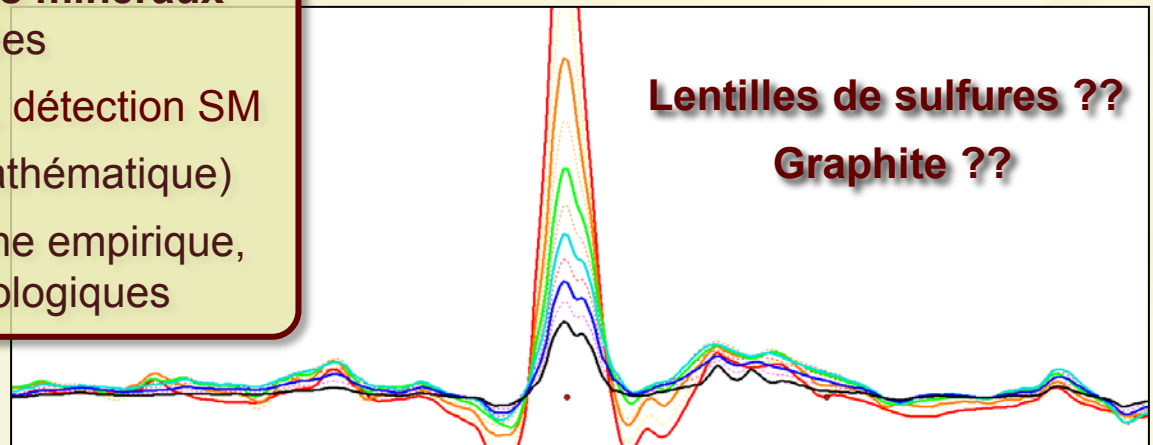
**Conductivités  $10^{-10}$  >> autres minéraux**

→ Anomalies EM très contrastées

Discrimination : **intérêt majeur**, détection SM

St Graal des géophysiciens (mathématique)

Regard d’un géologue : approche empirique, recoupement avec données géologiques



## 1. Introduction méthodes EM

## 2. PARTIE I

Recherche de **discrimination** des conducteurs sulfurés vs graphitiques

→ *Analyse statistique des corrélations entre la nature d'un conducteur et sa réponse MEGATEM*

## 3. PARTIE II

Analyse de la **variabilité longitudinale** des caractéristiques des anomalies MEGATEM le long des conducteurs formationnels en Abitibi

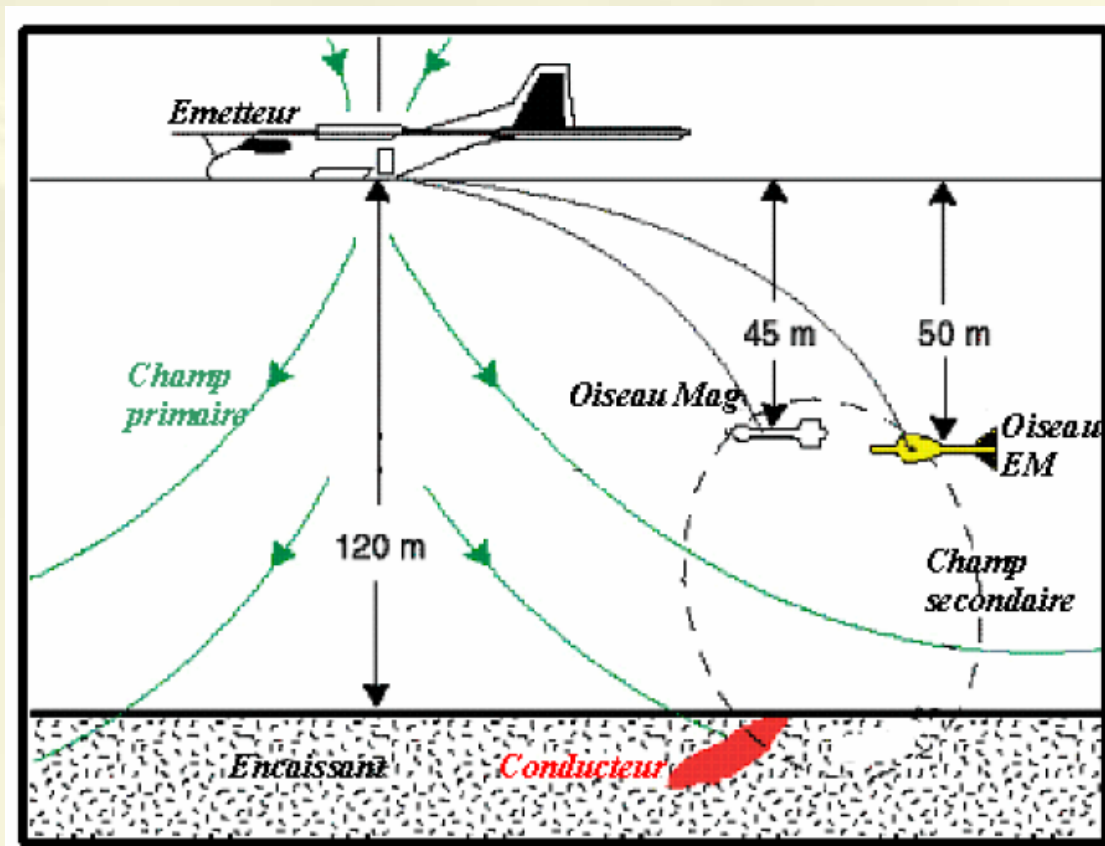
→ *Potentiel pour la détection des lentilles de sulfures massifs*

## 4. Conclusions

## Introduction MEGATEM

## Systèmes AEM

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

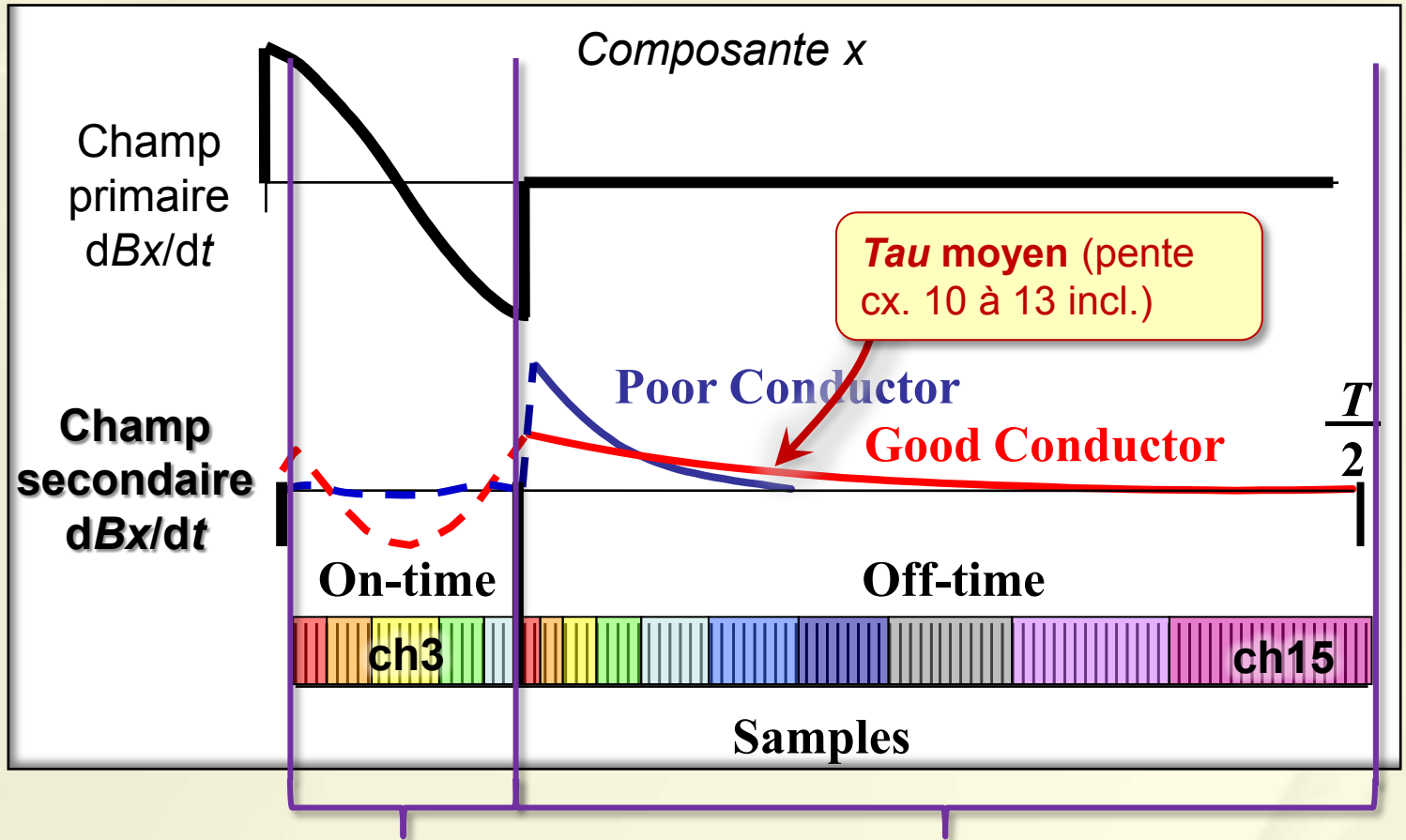


Smith et al 2005

**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)

Signal émis

Signal reçu



Allard, 2012

**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

## PARTIE I

### Recherche empirique de discrimination des conducteurs sulfurés et graphitiques

- **Analyse statistique des corrélations entre**
  - la **nature du conducteur** (données géologiques) et
  - sa **réponse MEGATEM** (données géophysiques)



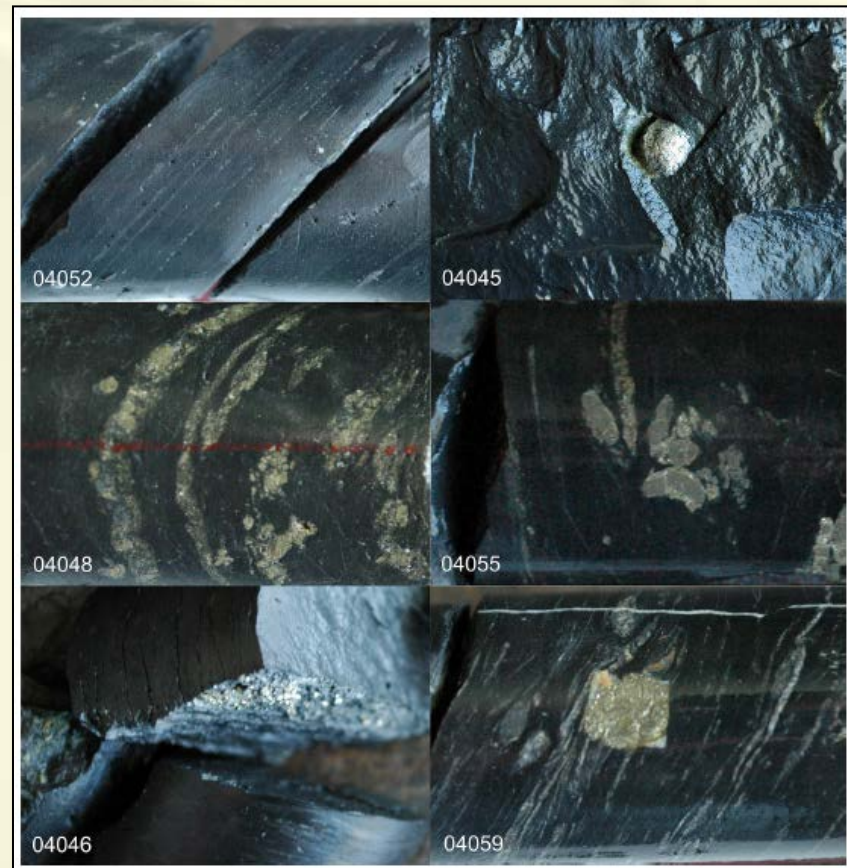
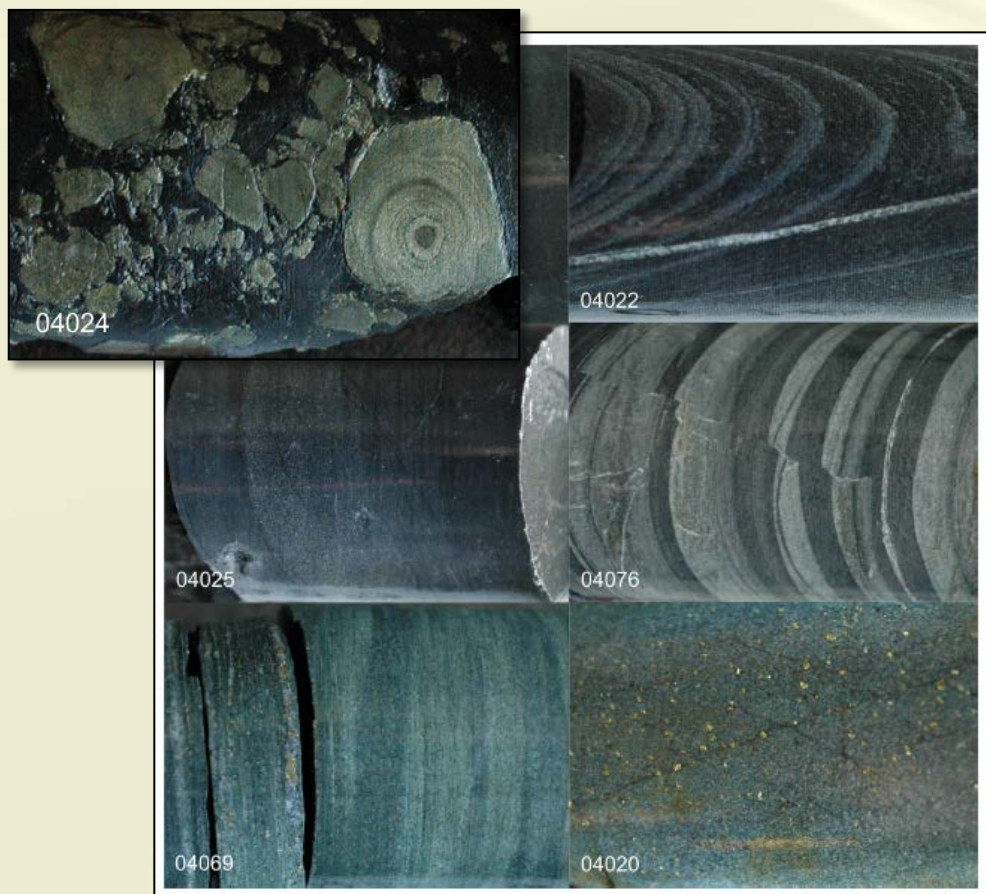
## 1. Hannington et al, 2001

**Proportions minérales dans 402 argilites** graphitiques sulfurées (Kidd Munro, Ont.)

Données homogènes et de très bonne qualité

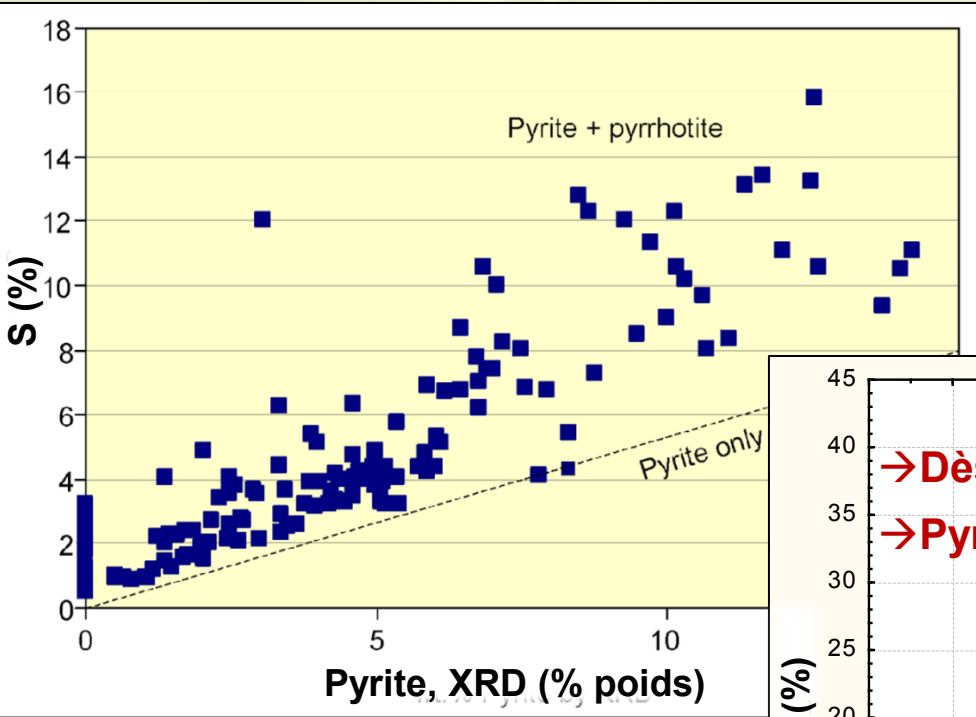
## 2. MRD 291 (Hannington et al, 2012)

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

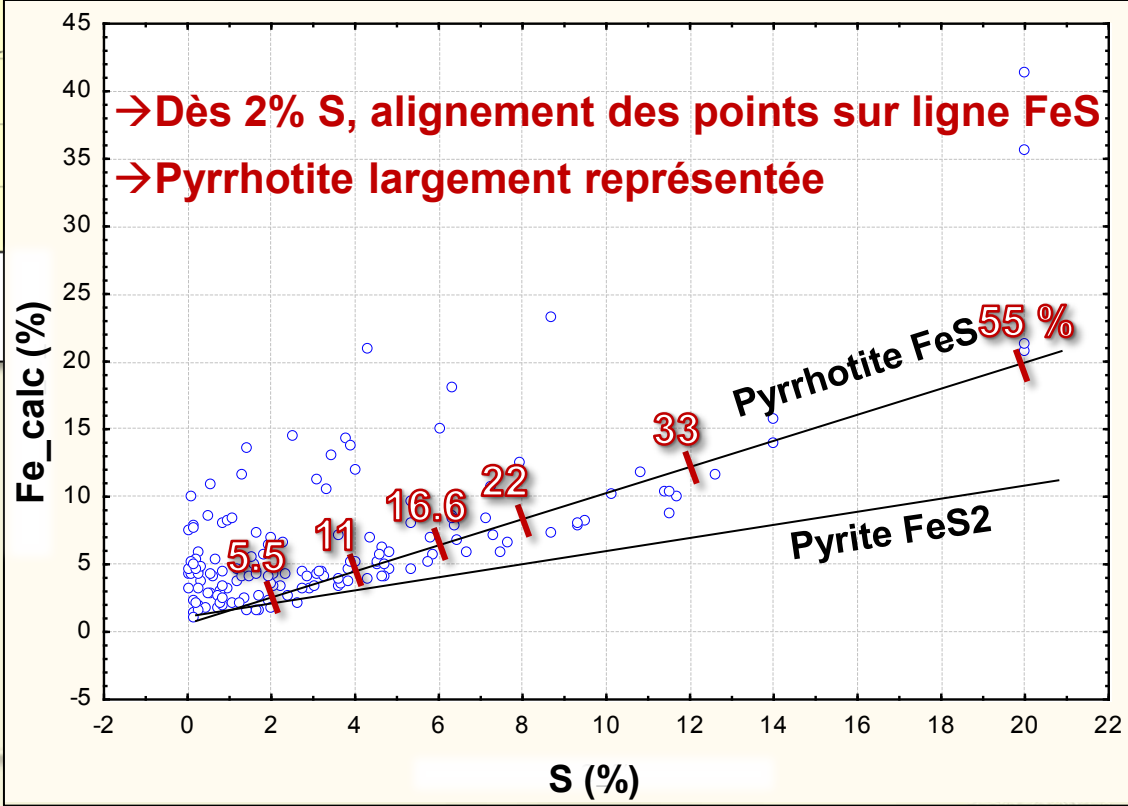


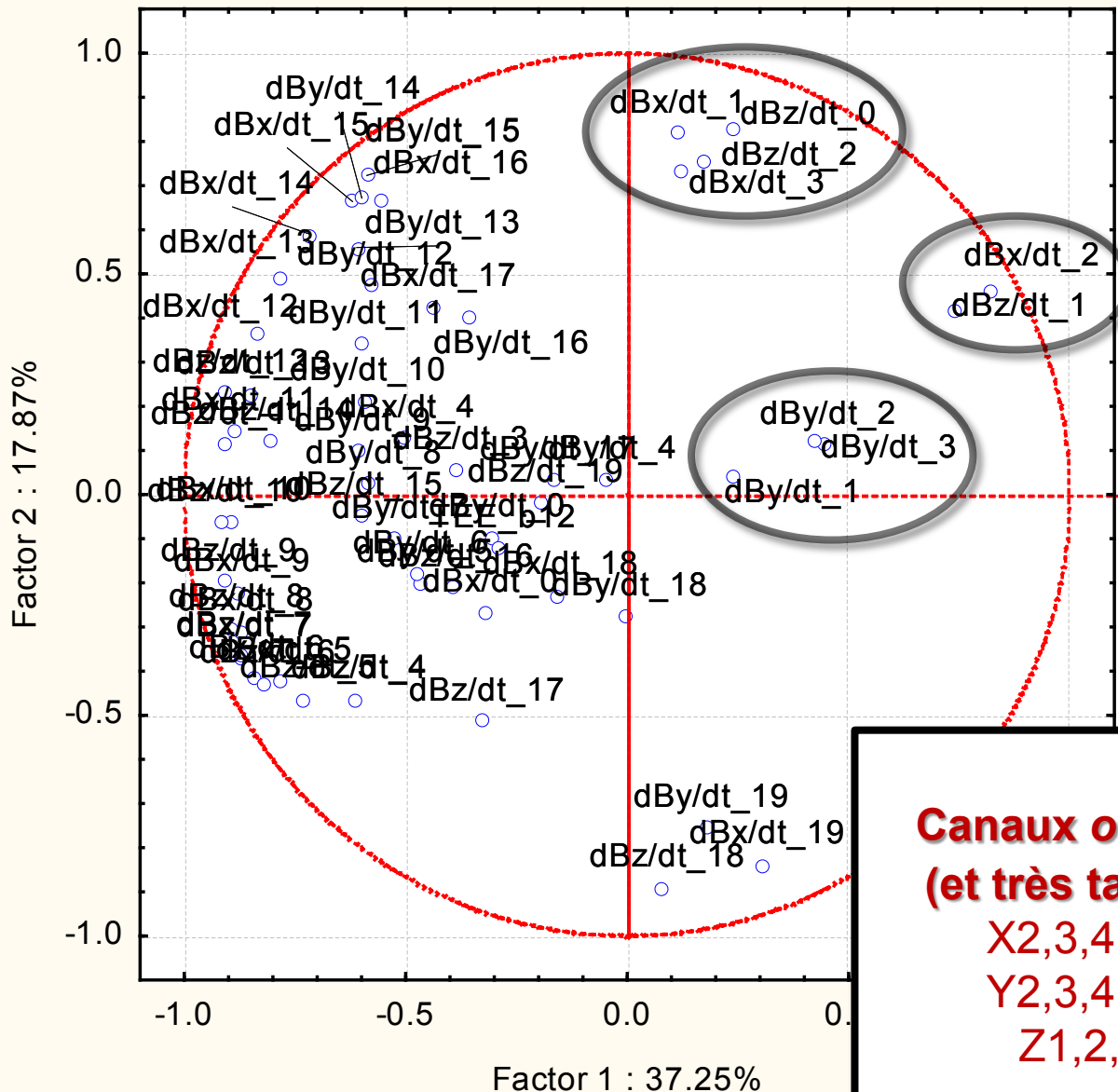


- **S (%)** : indicateur de la teneur en sulfures
- **C\_graph (%)** : indicateur de la teneur en graphite  $C\_graph = C\_total - CO2/3.66$



Hannington et al, 2012





Overtime

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

### Résumé\* :

**Canaux ontime  
(et très tardifs)**

X2,3,4,20  
Y2,3,4,20  
Z1,2,3

**Canaux offtime  
moyens et  
précoces**

X6→16  
Y6→16  
Z6→16

**Composante 1 (53.53%)**

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

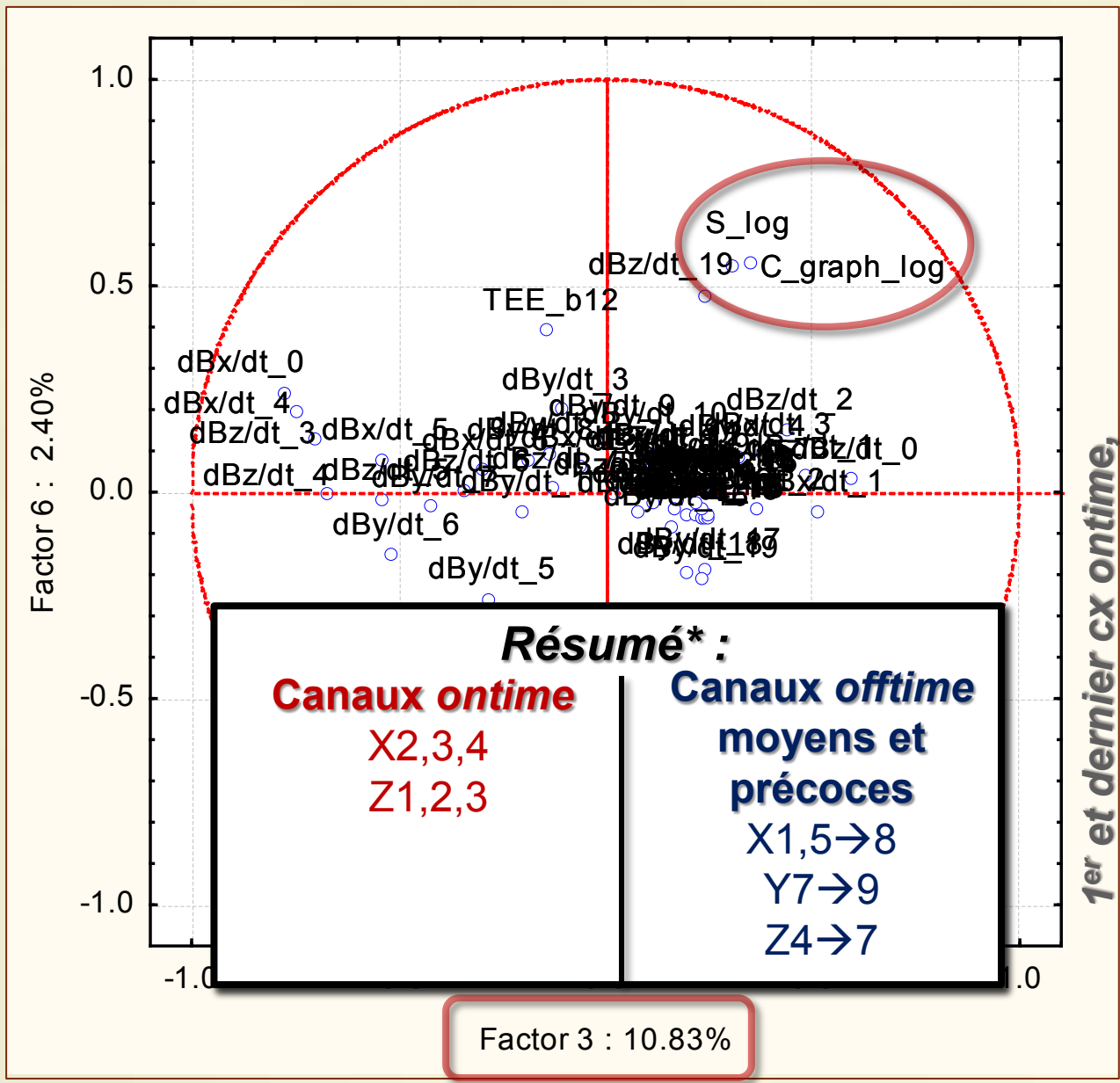
vs

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

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

# Analyse en Composantes Principales

## 1. Données MEGATEM et S (%), C\_graph (%)



**Composante 3**

Variable	R
<b>dBz/dt_0</b>	<b>0.591990</b>
<b>dBx/dt_1</b>	<b>0.509463</b>
<b>dBz/dt_1</b>	<b>0.484494</b>
<b>dBz/dt_2</b>	<b>0.435311</b>
<b>dBx/dt_3</b>	<b>0.381438</b>
<b>dBx/dt_2</b>	<b>0.365549</b>
<b>S_log</b>	<b>0.347485</b>
<b>dBy/dt_4</b>	<b>0.320274</b>
<b>C_graph_log</b>	<b>0.306921</b>
...	...
<b>dBz/dt_6</b>	<b>-0.345143</b>
<b>dBy/dt_7</b>	<b>-0.421808</b>
<b>dBy/dt_6</b>	<b>-0.515761</b>
<b>dBz/dt_5</b>	<b>-0.540991</b>
<b>dBx/dt_5</b>	<b>-0.542100</b>
<b>dBz/dt_4</b>	<b>-0.674055</b>
<b>dBz/dt_3</b>	<b>-0.700319</b>
<b>dBx/dt_4</b>	<b>-0.746476</b>
<b>dBx/dt_0</b>	<b>-0.773426</b>

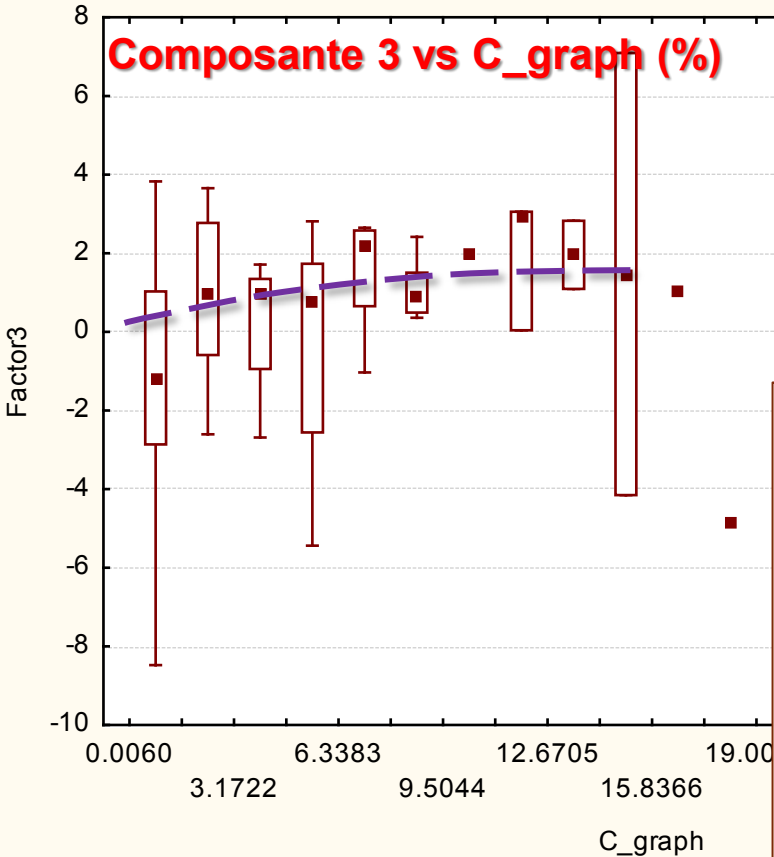
**On-time moyens** (variables with R > 0.3)

**+ offtime précoces** (variables with R < 0)

**Composante 3 vs nature sulfurée ou graphitique du conducteur**

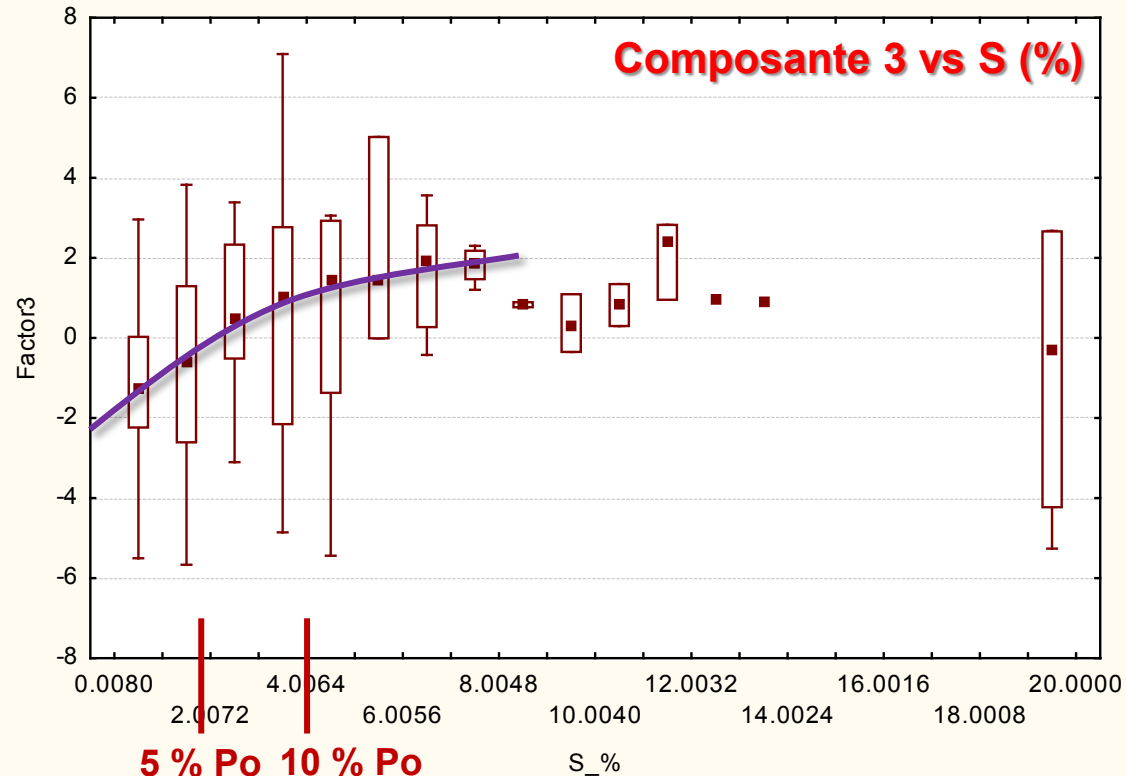
ACP\_Cgraph\_S.sta 128v\*115c

**Composante 3 vs C\_graph (%)**



ACP\_Cgraph\_S.sta 128v\*115c

**Composante 3 vs S (%)**



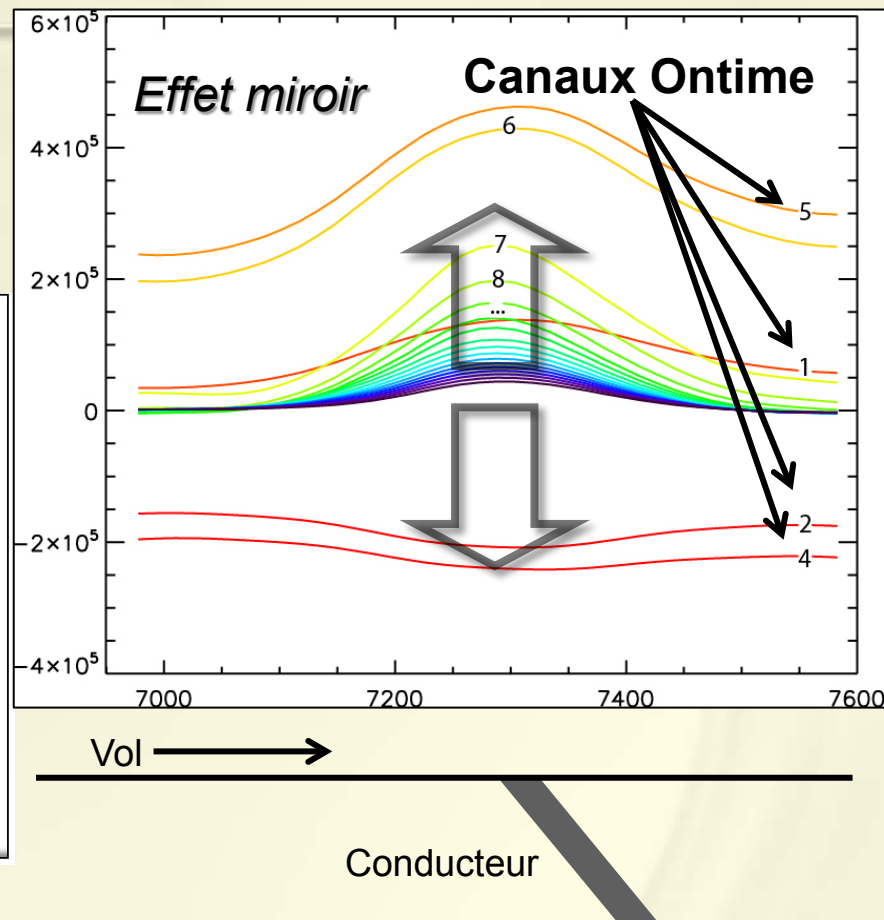
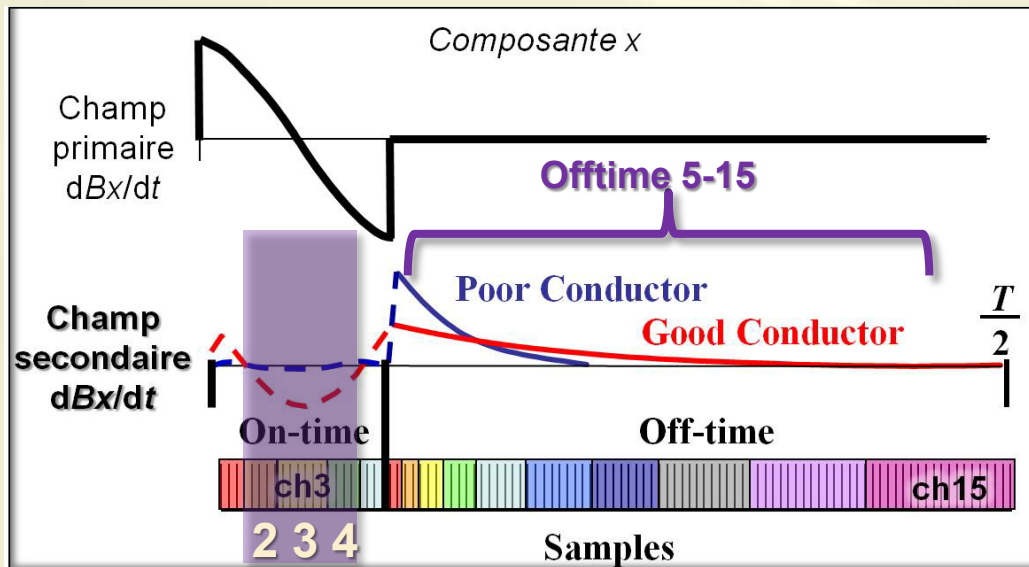
**Composante 3**

- Clairement reliée aux teneurs en sulfures, moins clairement en graphite
- Discrimination ?



## Opposition

- Canaux *on time* 2 à 4
- Canaux *on time* 1 et 5
- Canaux *off time* 5-15



→ Canaux 2 à 4 ont toujours un **signe opposé** aux 1 et 5, et aux *offtime*

→ Rapport *offtime* (5-15) / *ontime* (2-3-4) augmente avec la conductance

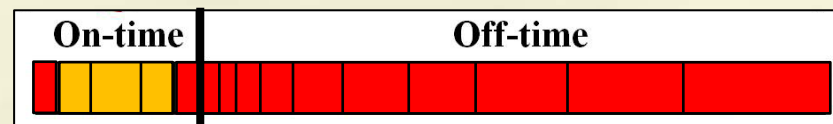
1. Une portion dominante de la variabilité des réponses MEGATEM exprime l'opposition suivante :

**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 :**

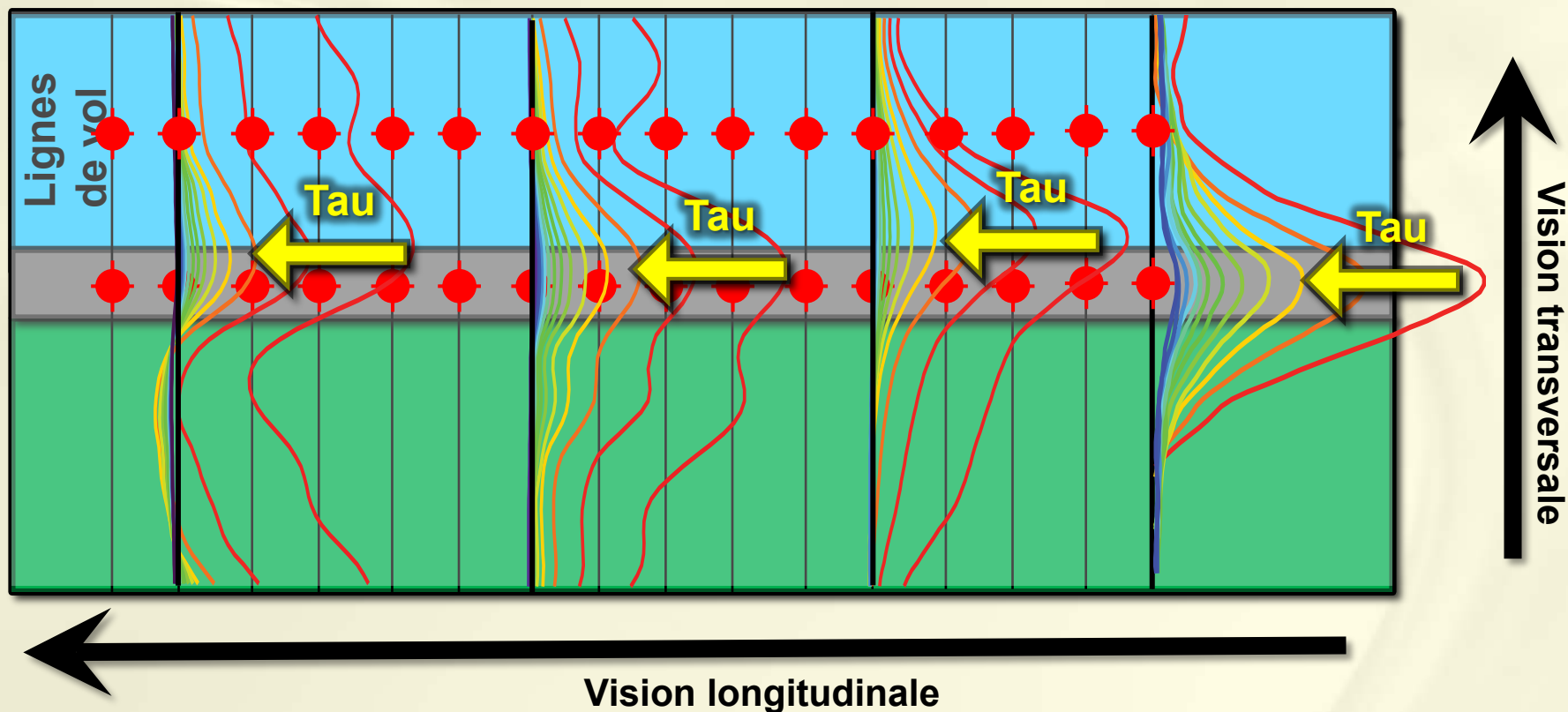
$$I1 = \text{Moy}(X5 \rightarrow 15 ; Z5 \rightarrow 15) / \text{Moy}(X2,3,4 ; Z1,2,3)$$

2. **I1 est corrélé à la teneur en sulfures** du conducteur
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) ont été utilisées pour **tester le potentiel discriminateur 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
- 1. échantillonner avec un conductivimètre ; 2. échantillonner des sulf. mass. graphitiques

## PARTIE II

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

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

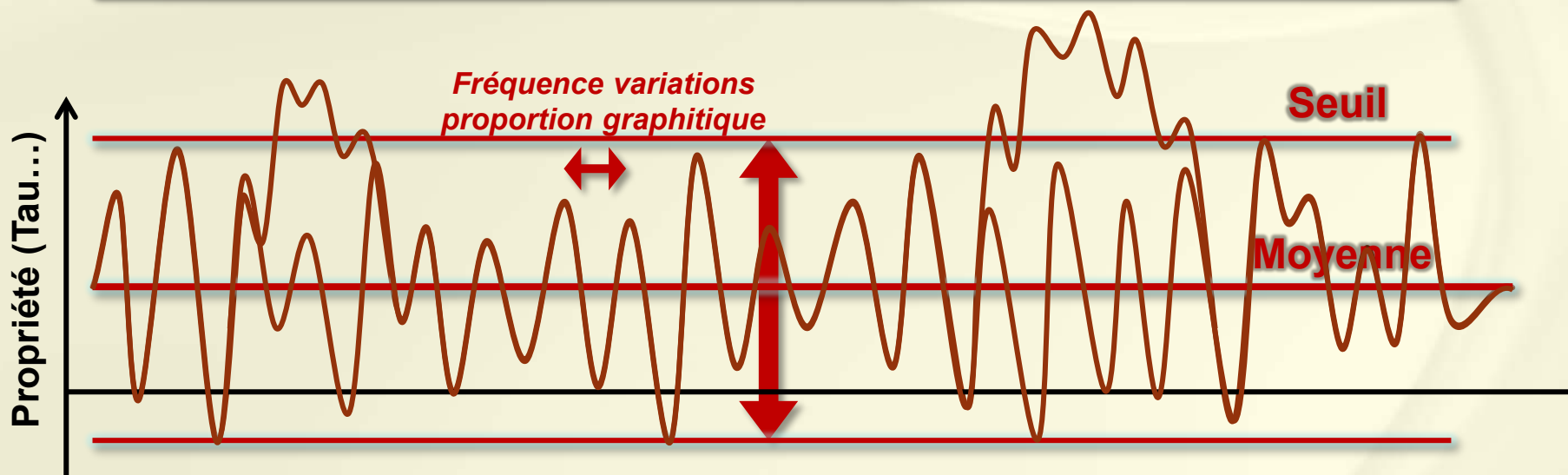
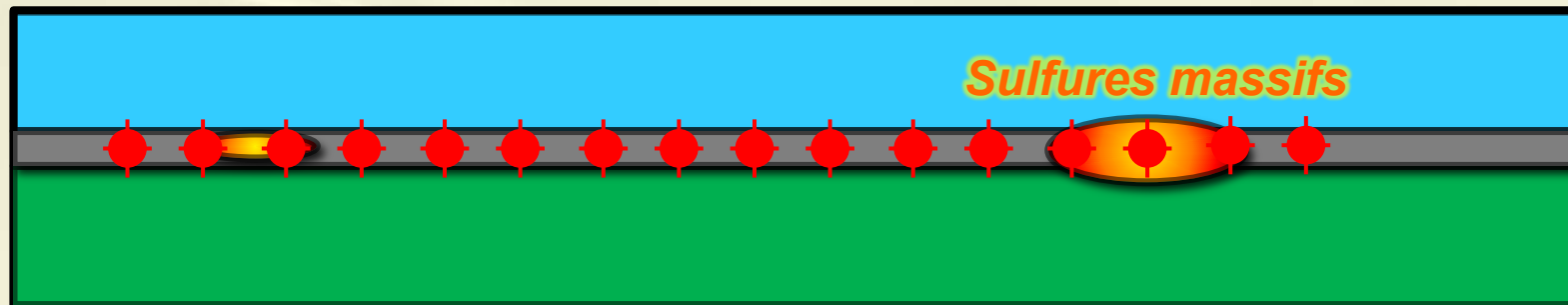


Propriétés de l'anomalie (paramètres Tau, etc.), intensité.

### Vision longitudinale

**variations** des propriétés des anomalies (Tau...) : variations de la conductivité du conducteur linéaire traduisant des **changements de composition (teneurs en graphite et sulfures diagenétiques ou hydrothermaux)**

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



1. **Variabilité *background*** due aux variations des proportions de la roche en graphite et sulfures primaires → écart-type, moyenne, fréquences caractéristique etc.

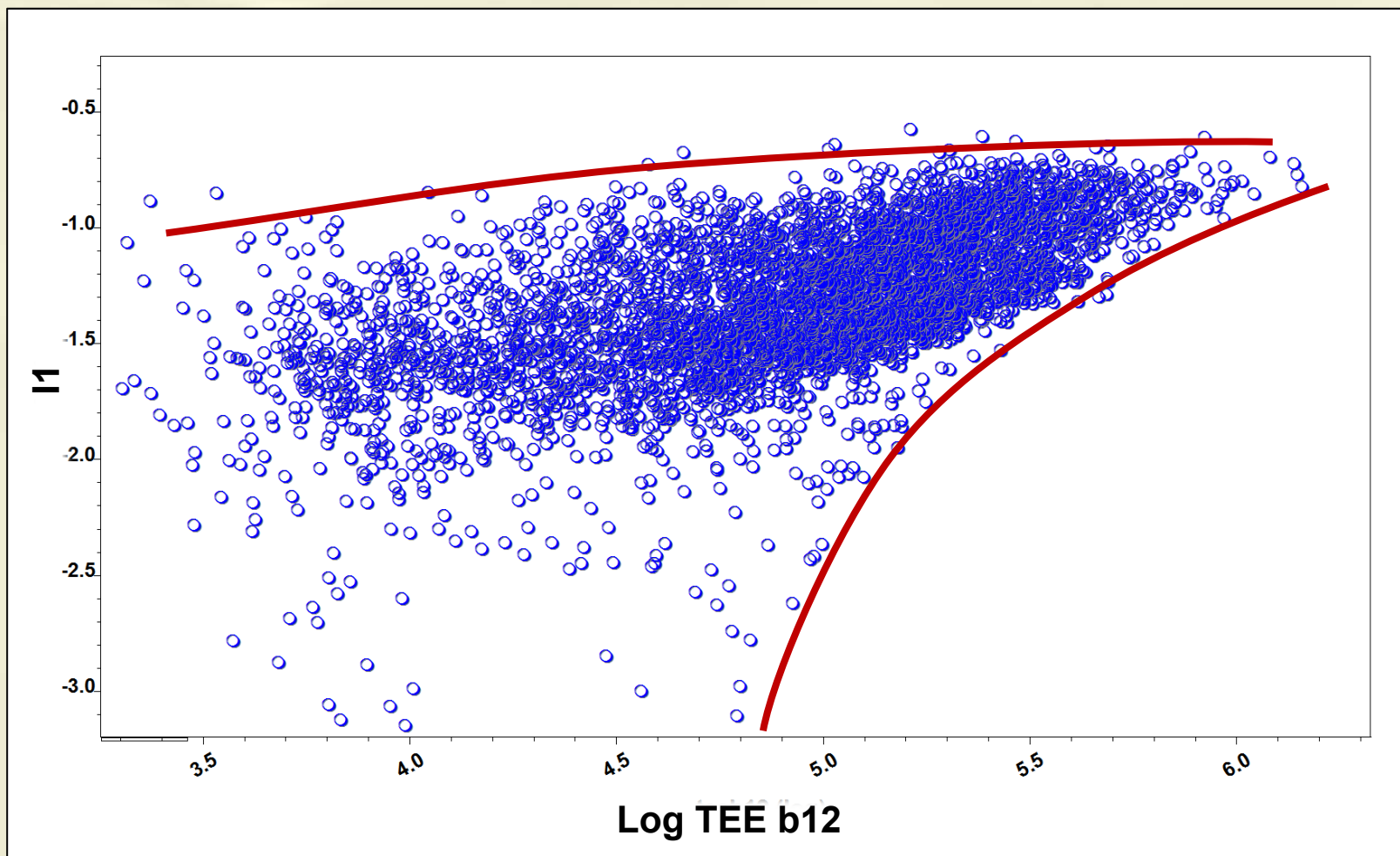
2. Conductivités sont cumulatives → si une lentille sulfurée est présente, son *vortex* devrait se superposer à celui de l'horizon graphitique (*background*)

→ **anomalie excède ponctuellement la variabilité *background***



- 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 (rapport)**
  - **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 (cf. rapport)**

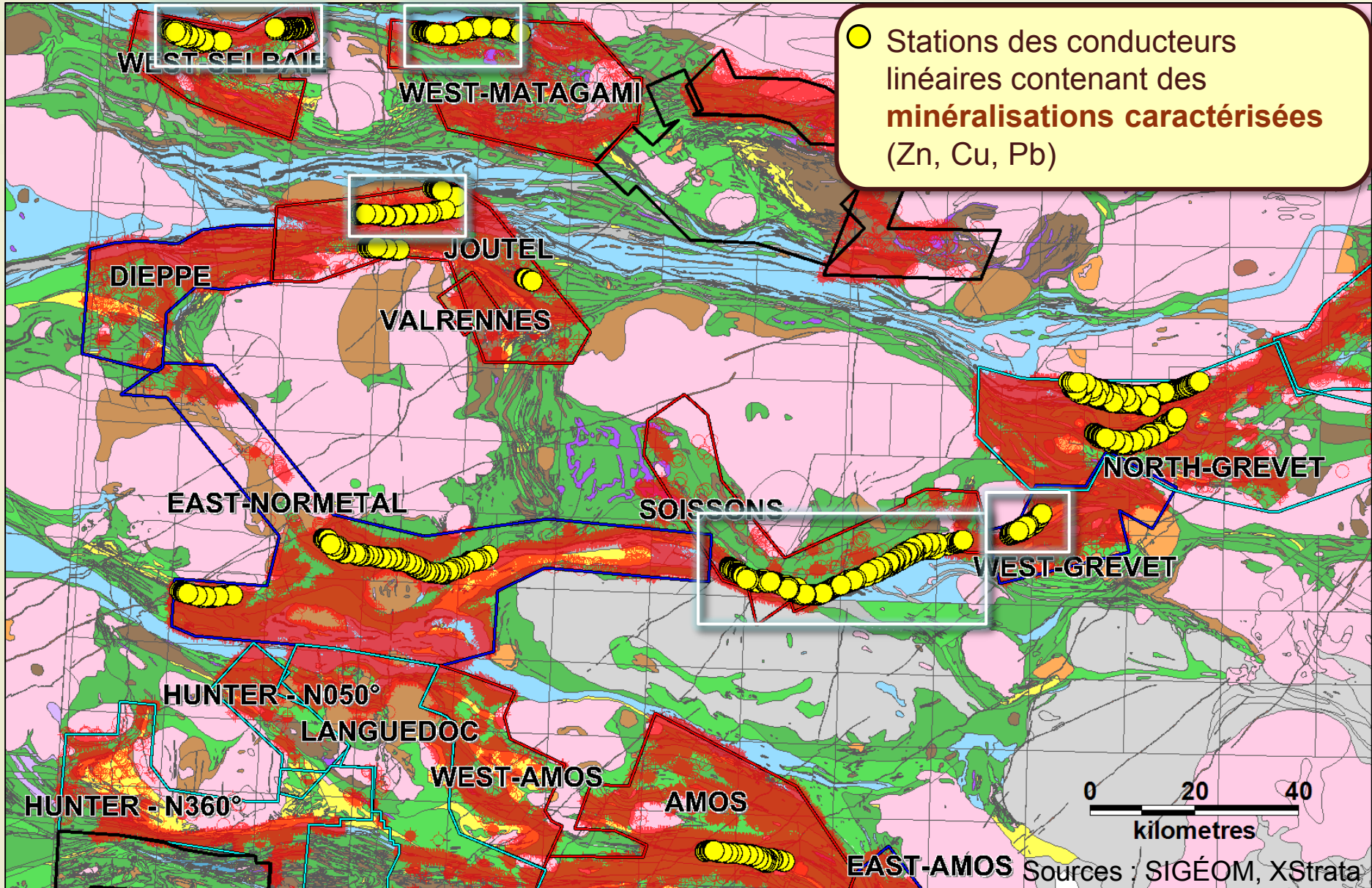
## Analyse des corrélations entre les différents paramètres utilisés



**Bonne corrélation dans les hautes valeurs, dispersion dans valeurs basses**

→ Les deux variables devraient converger dans les zones d'intérêt (hautes valeurs)

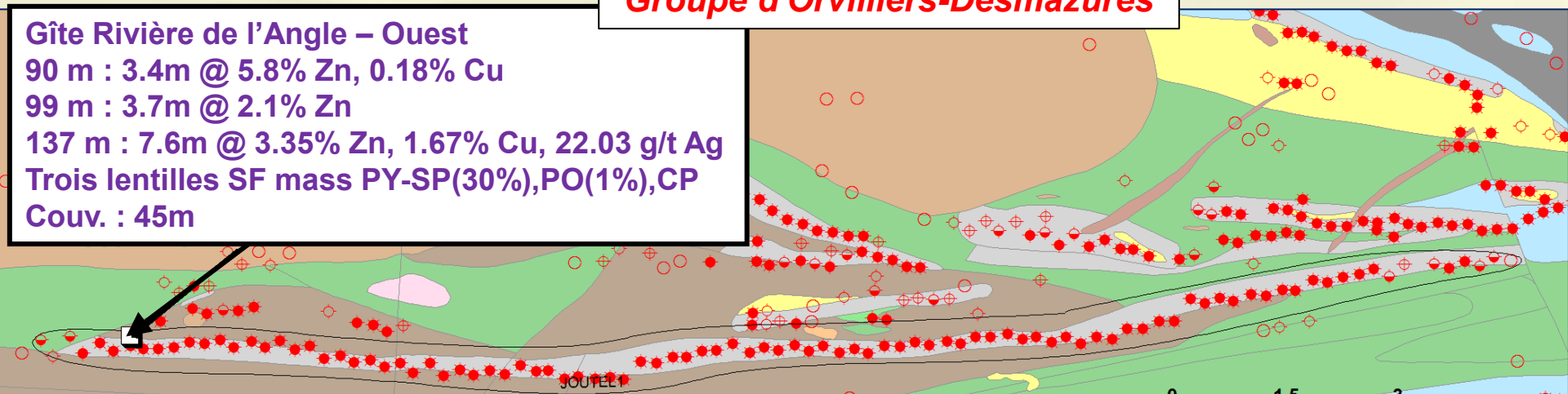
→ Anomalies concomitantes TEEb12 et I1





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

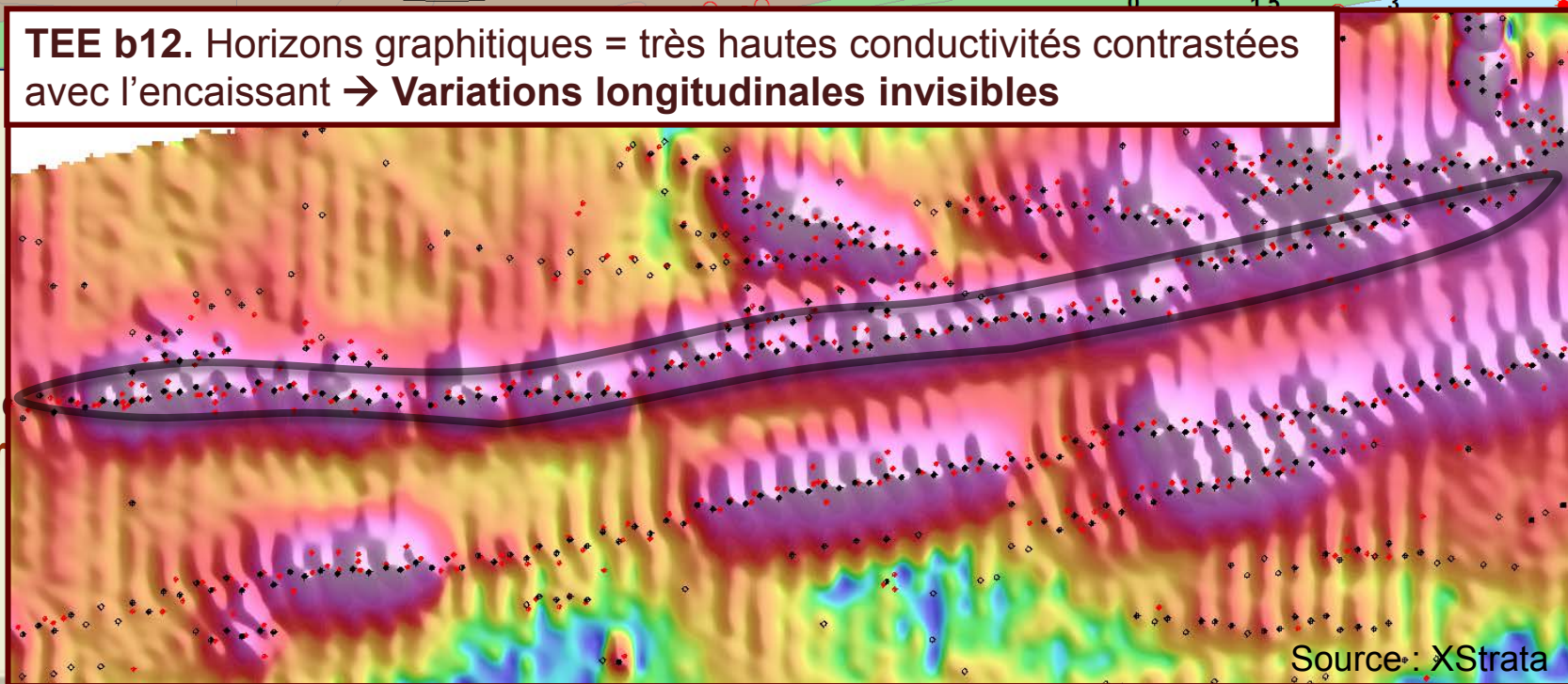
Gîte Rivière de l'Angle – Ouest  
 90 m : 3.4m @ 5.8% Zn, 0.18% Cu  
 99 m : 3.7m @ 2.1% Zn  
 137 m : 7.6m @ 3.35% Zn, 1.67% Cu, 22.03 g/t Ag  
 Trois lentilles SF mass PY-SP(30%),PO(1%),CP  
 Couv. : 45m



**TEE b12. Horizons graphitiques = très hautes conductivités contrastées avec l'encaissant → Variations longitudinales invisibles**

- Cat.
- ⊕ Cat.
- ⊕ Cat.

Toutes les  
 catégories



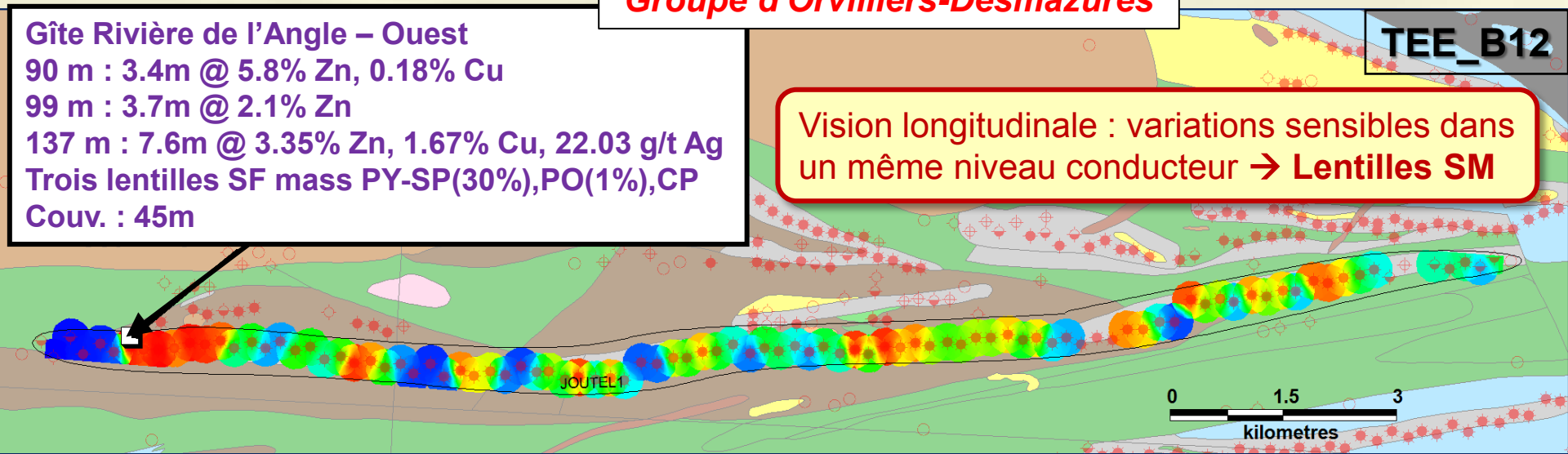
Source: XStrata

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

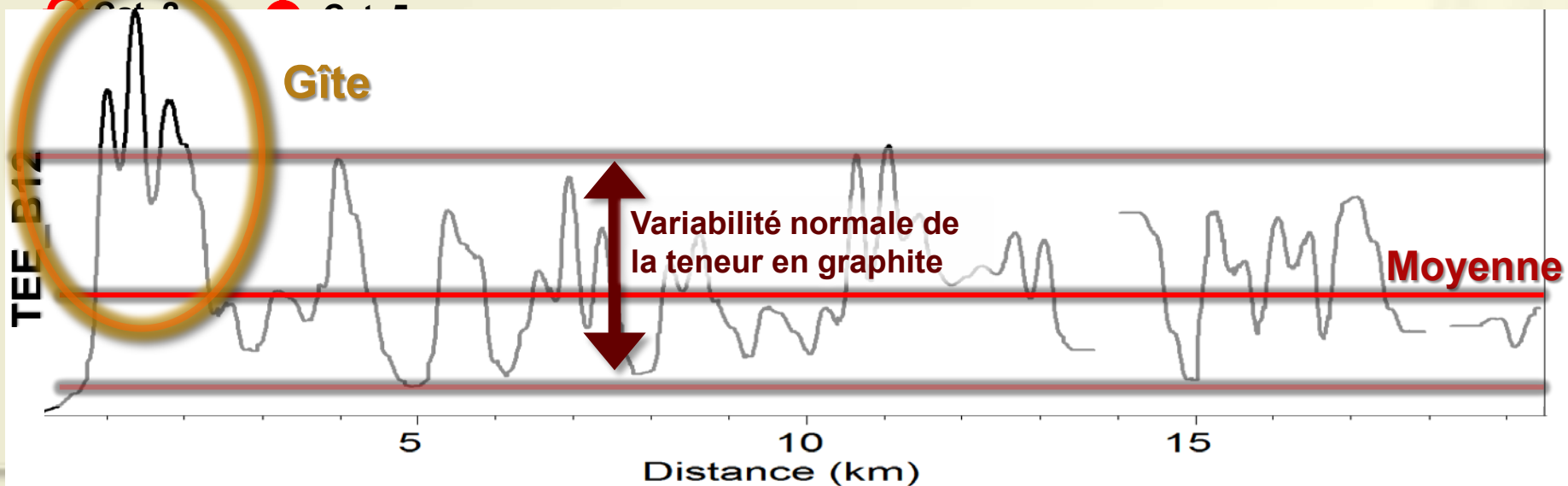
Gîte Rivière de l'Angle – Ouest  
 90 m : 3.4m @ 5.8% Zn, 0.18% Cu  
 99 m : 3.7m @ 2.1% Zn  
 137 m : 7.6m @ 3.35% Zn, 1.67% Cu, 22.03 g/t Ag  
 Trois lentilles SF mass PY-SP(30%),PO(1%),CP  
 Couv. : 45m

TEE\_B12

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



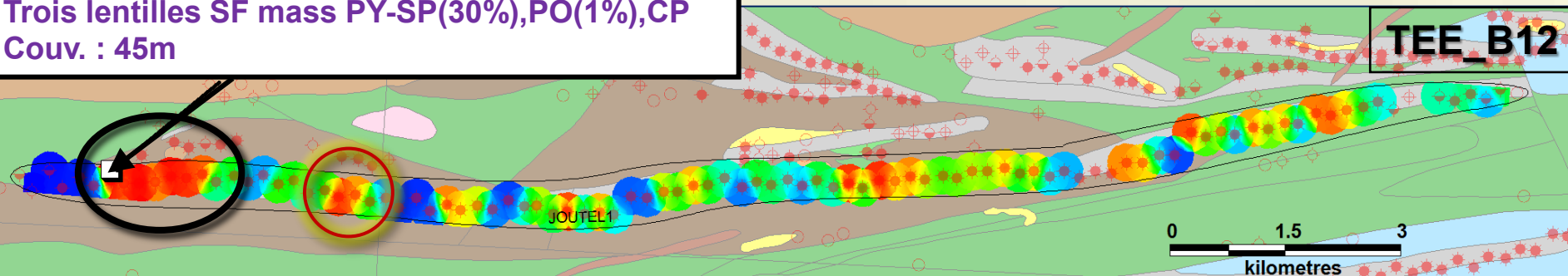
Anomalie TEE\_B12 très nette au-dessus des lentilles de sulfures massifs





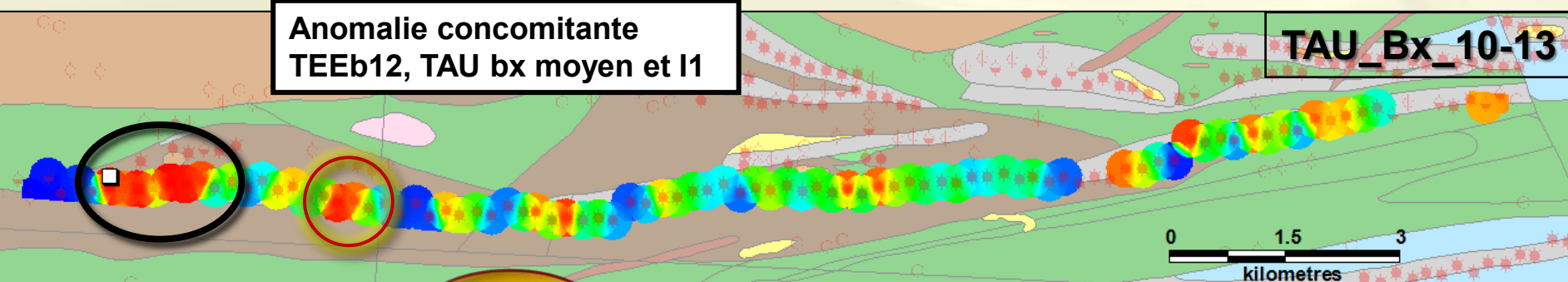
Gîte Rivière de l'Angle – Ouest  
90 m : 3.4m @ 5.8% Zn, 0.18% Cu  
99 m : 3.7m @ 2.1% Zn  
137 m : 7.6m @ 3.35% Zn, 1.67% Cu, 22.03 g/t Ag  
Trois lentilles SF mass PY-SP(30%),PO(1%),CP  
Couv. : 45m

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



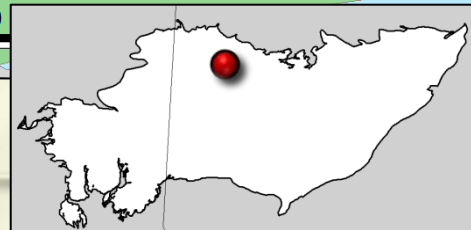
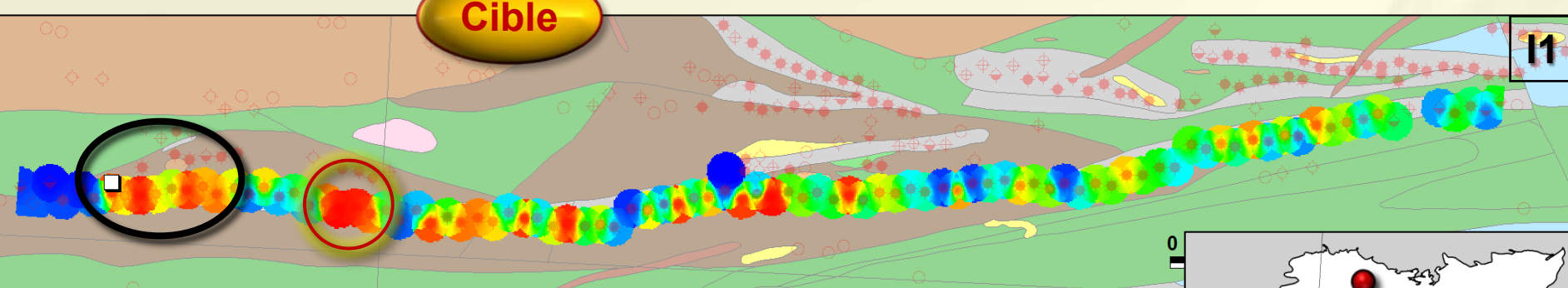
Anomalie concomitante  
TEEb12, TAU bx moyen et I1

**TAU\_Bx\_10-13**



**Cible**

**I1**



# WESTGREVET1

Sédiments graphitiques (S1-S6)

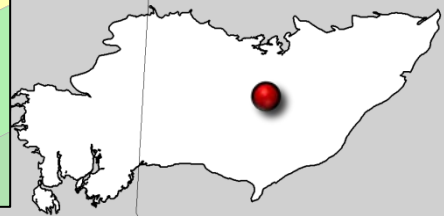
I1

Tau Bx 10-20

Anomalie concomitante  
I1, TEEb12,  
TAU bx moyen

Gîte North Shore  
2.3m @ 1.32% Cu, 3.68% Zn  
0.5m @ 14.65 % Zn  
5m @ 0.6 % Cu, 8.01 % Zn  
Argilite graphitique, lentilles massives  
PY-SP-PO-CP ; couv. : 2m

TEE\_B12



**SOISSON1**  
Sédiments  
graphitiques  
(S1-S6)

Indice  
140 m : 0.2m @ 3,82 g/t Au  
3.8m @ 0,6% Zn  
Argillite graph, PY-PO  
Couv : 24m

Indice  
200 m : 1.5m @ 1,12 g/t Au  
135 m : 0.9m @ 0,21% Zn  
Argillite graph., 15%PY-PO  
Couv : 35m

**TEE\_B12**

Long\_onda\_dbx

● 941 to 941 (2)	○ 137 to 154 (30)
● 329 to 941 (17)	○ 124 to 137 (28)
● 225 to 329 (17)	○ 113 to 124 (23)
● 182 to 225 (16)	○ 98 to 113 (17)
○ 154 to 182 (14)	○ 78 to 98 (9)

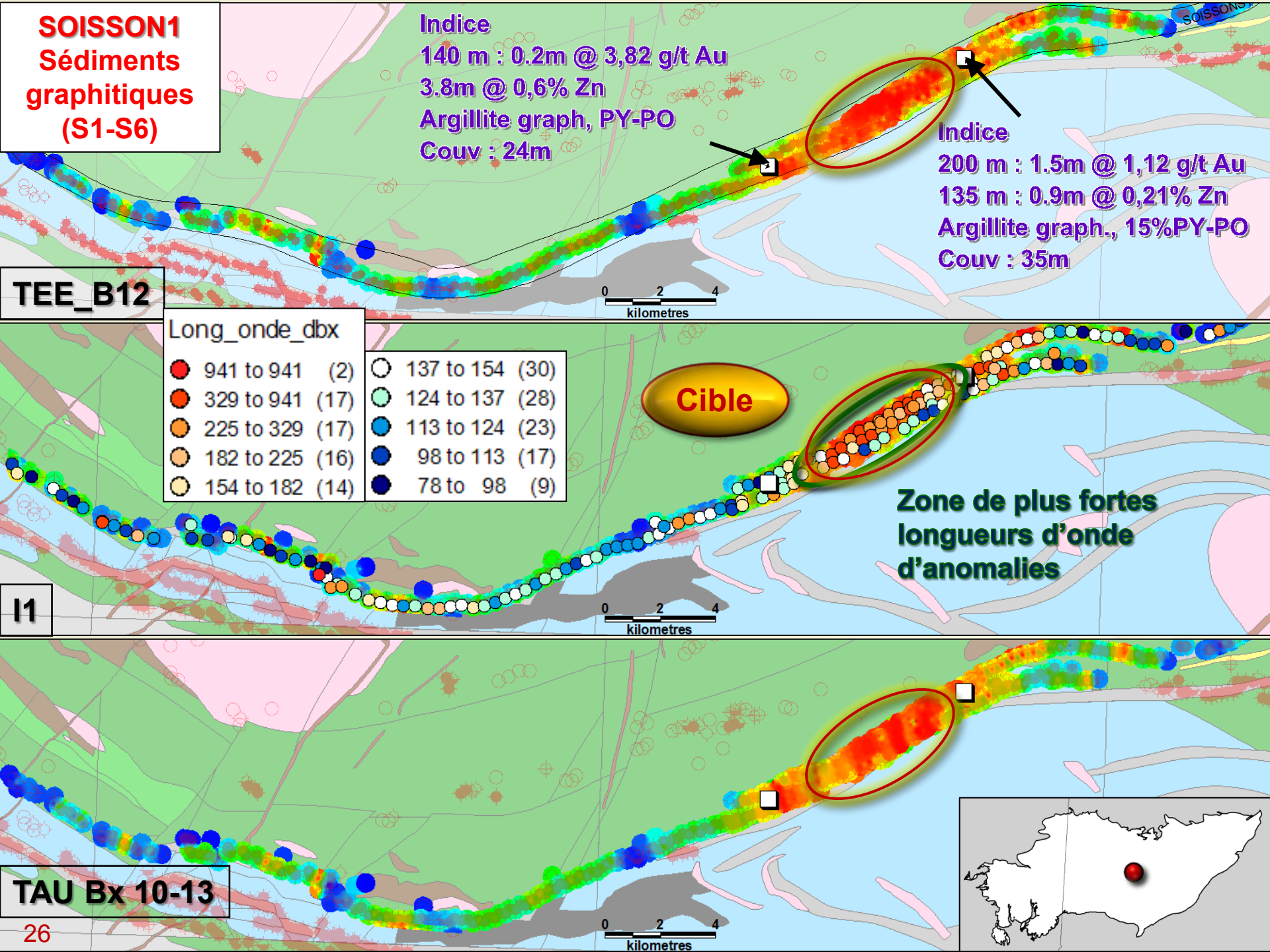
**Cible**

**Zone de plus fortes  
longueurs d'onde  
d'anomalies**

**11**

**TAU Bx 10-13**

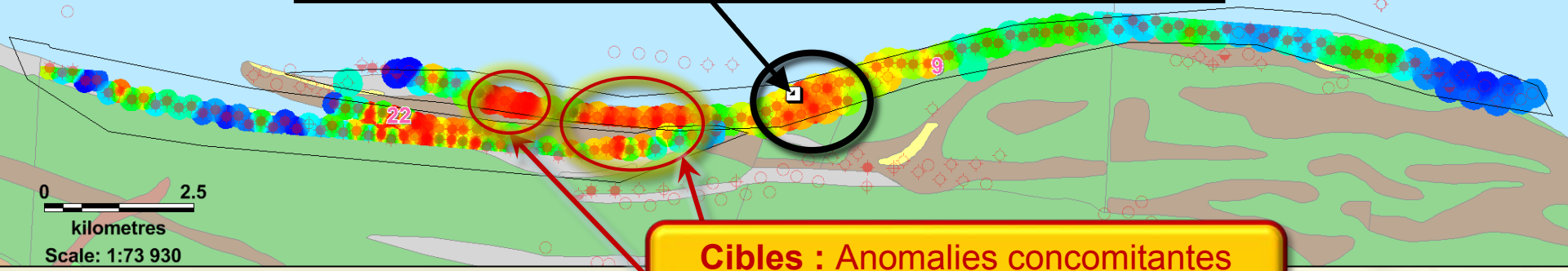
26





TEE\_B12

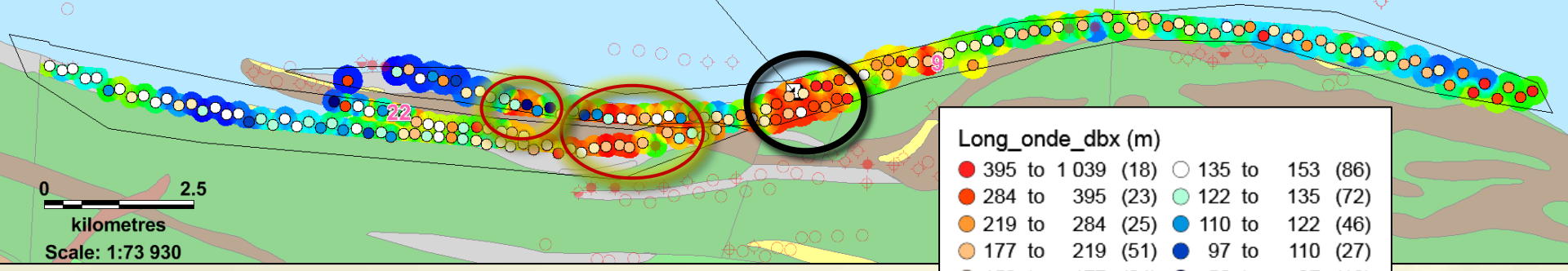
Gîte Lac Fénélon – Nord (Au-Zn-Ag) ; 85 m : 1.5m @ 0.15% Zn ; 130 m : 1.35m @ 16 g/t Ag, 0.23% Zn ; 150 m : 0.21m @ 0.34% Cu ; PY-SP mass. (90%) ; Schistes GP-PY ; couv. : 60m



**Cibles : Anomalies concomitantes TEE b12, I1, Tau bx moyen**

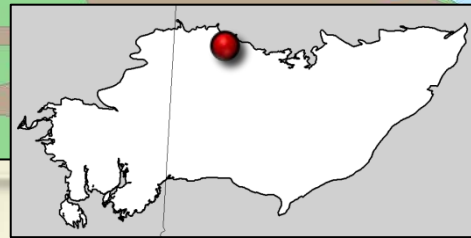
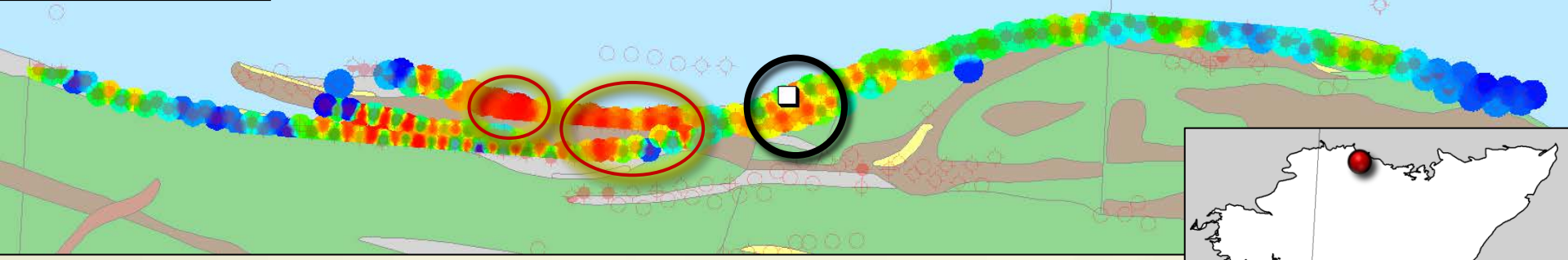
I1

Gîte Lac Fénélon - Nord  
0.61m @ 11,37 g/t Au ; 1.5m @ 0,1  
0.21 m @ 0,34% Cu ; PY-SP massive ; silicification



Long_onde_dbx (m)			
● 395 to 1 039 (18)	○ 135 to 153 (86)		
● 284 to 395 (23)	○ 122 to 135 (72)		
● 219 to 284 (25)	● 110 to 122 (46)		
● 177 to 219 (51)	● 97 to 110 (27)		
● 153 to 177 (64)	● 56 to 97 (18)		

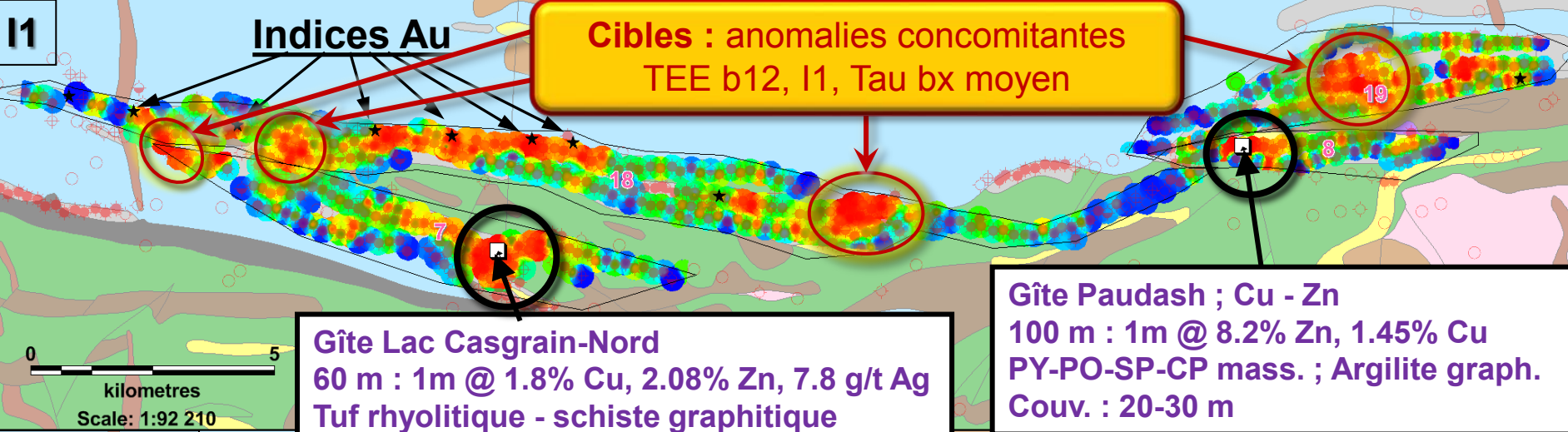
Tau bx 11-15



I1

Indices Au

Cibles : anomalies concomitantes  
TEE b12, I1, Tau bx moyen

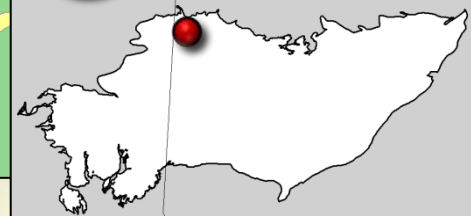
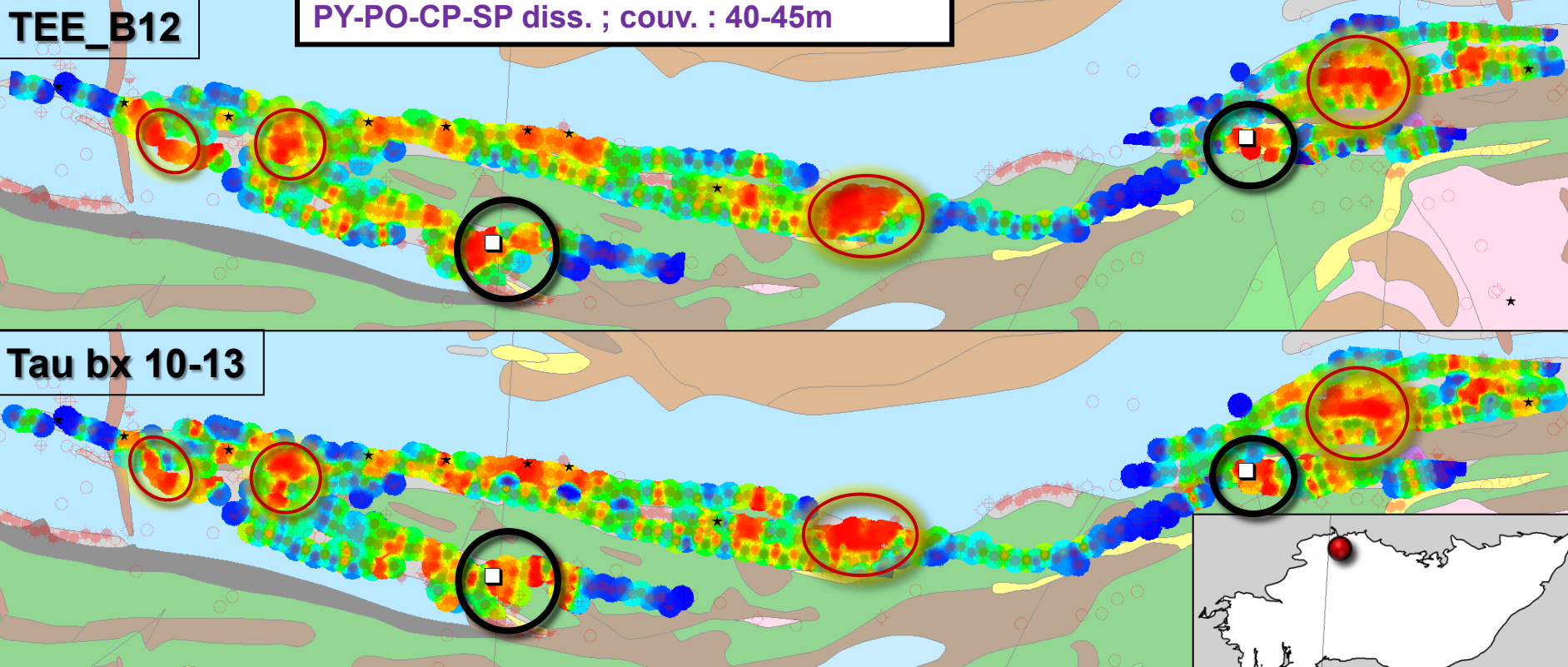


Gîte Lac Casgrain-Nord  
60 m : 1m @ 1.8% Cu, 2.08% Zn, 7.8 g/t Ag  
Tuf rhyolitique - schiste graphitique  
PY-PO-CP-SP diss. ; couv. : 40-45m

Gîte Paudash ; Cu - Zn  
100 m : 1m @ 8.2% Zn, 1.45% Cu  
PY-PO-SP-CP mass. ; Argilite graph.  
Couv. : 20-30 m

TEE\_B12

Tau bx 10-13



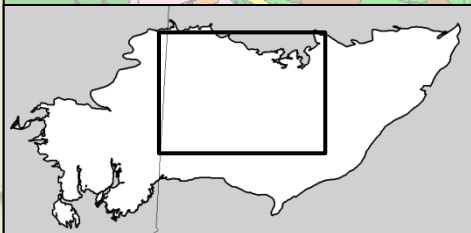


**18 cibles de catégorie 1 :**  
les 3 paramètres sont nettement  
anomaux (TEEb12, Tau bx moy, I1)

**67 cibles de catégorie 2 à 4 :**  
• *idem* sur petite superficie et/ou  
• 2 paramètres sont nettement  
anomaux, le 3<sup>ème</sup> est anomal mais  
moins marqué

Cat 1 ●  
Cat 2 ○  
Cat 3 ○  
Cat 4 ○

0 50  
kilometres  
Scale: 1:1 002 000



- Les données disponibles ne permettent pas de trancher catégoriquement sur la possibilité de discriminer entre sulfures et graphite, toutefois l'indice I1 présente un potentiel à confirmer
- La vision longitudinale le long des conducteurs linéaires ouvre un **nouveau champ d'observation** très prometteur du MEGATEM
- En MEGATEM, les paramètres les plus efficaces pour la détection de sulfures massifs superposés au « bruit de fond » graphitique sont :
  - **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
  - **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**
  - **Tau bx moyen (cx 10-20 ou cx 10-13)**
  - Les **longueurs d'onde** des anomalies : valeurs très basses et très hautes