

# Géochimie des eaux souterraines appliquée à l'exploration minérale

Silvain Rafini



Projet  
CONSOREM  
2016-05

Collaboration spéciale :  
Julien Walter (UQAC)  
GLENCORE

Forum Consorem-DIVEX  
Val d'Or 29 mai 2018



**De la source métallique à l'anomalie secondaire...**

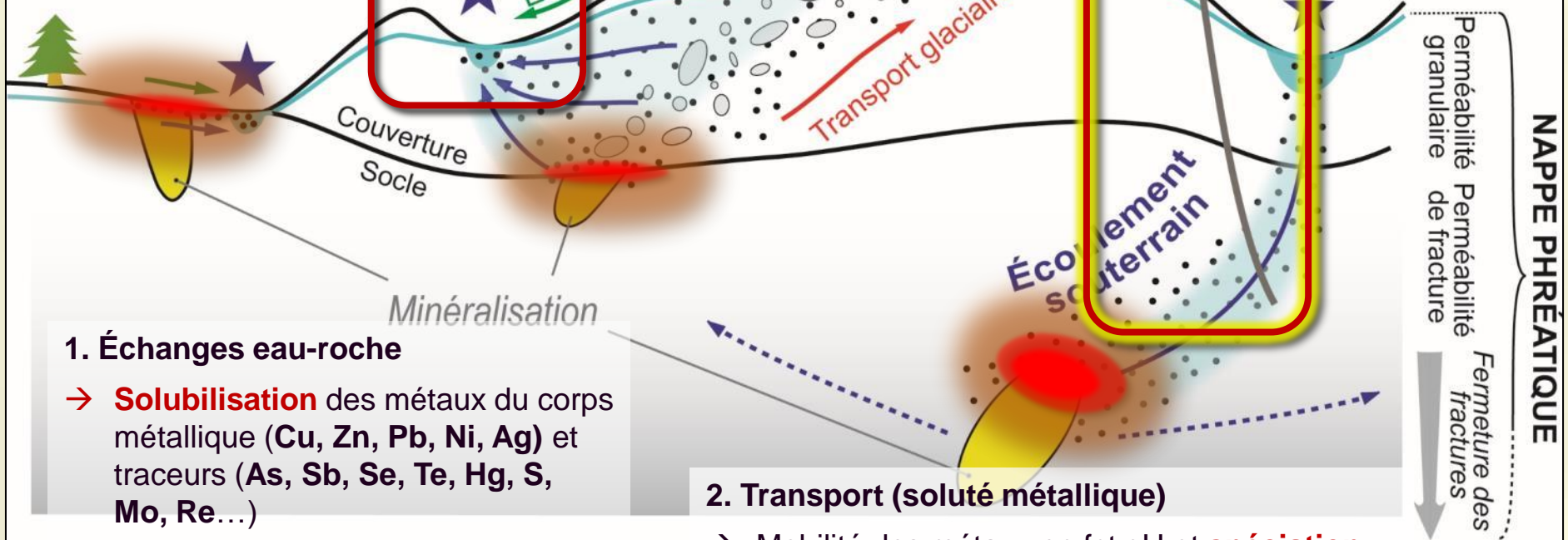
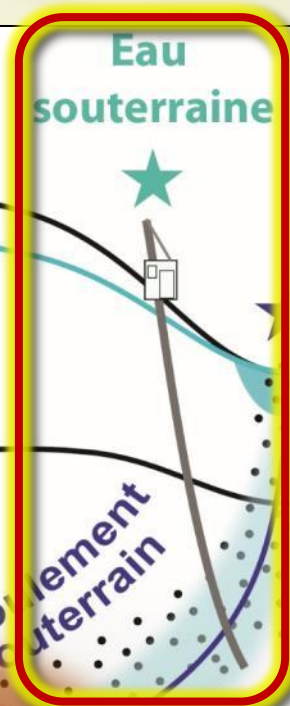
**Ce projet :  
2016-2017**

**3. Détection**

- Ruisseaux : très simple
- **Nappe phréatique : forages**

Synthèse des mécanismes de transport dans l'environnement secondaire : **medium eau**

**Projet 2015-2016**



**1. Échanges eau-roche**

- **Solubilisation** des métaux du corps métallique (Cu, Zn, Pb, Ni, Ag) et traceurs (As, Sb, Se, Te, Hg, S, Mo, Re...)

→ **Enrichissement anomal de l'eau**

**2. Transport (soluté métallique)**

- Mobilité des métaux en fct pH et **spéciation** : cations libres ( $Ag^+$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ...) ou complexes chlorurés, sulfatés, oxyanions ( $H_2AsO_4^-$  ou  $HAsO_4^{2-}$ ,  $HMoO_4^-$  ou  $MoO_4^{2-}$ ,  $SeO_4^{2-}$ ,  $CrO_4^{2-}$ ...), etc.



Forages d'explo

Tous les forages sont négatifs pour analyse de roche

Gîte minéral

Forages positifs pour analyse de l'eau souterraine

Empreinte hydrogéochimique

Charge hydraulique h1

Charge hydraulique h2

$h1 > h2 \rightarrow$  source de l'empreinte est située vers l'ouest



Écoulement régional

**Minéralisations non interceptées en forage  $\rightarrow$  détectables par empreinte hydrogéochimique ?**

**Possibilité de vectoriser l'exploration (gradient hydraulique) ?**

**Outil efficace pour l'exploration profonde ?**

Méthode potentiellement utilisable *en routine* dans les campagnes de forages : **une information supplémentaire associée aux forages, pour un coût mineur**

1. Déterminer si l'eau souterraine au contact d'un sulfure massif acquiert une **signature métallique anormale détectable**
2. Déterminer si cette empreinte se produit aussi **en profondeur**
3. Documenter la **distance de dispersion du halo métallique**
4. Documenter la nature de cette signature et ses fractionnements
5. Définir les enjeux techniques pour développer un usage optimal de cette méthode en exploration : facteurs à contraindre, contrôles externes sur les concentrations (profondeur, maturation de l'eau, mélanges d'eaux) etc.



# Levé hydrogéochimique sur forages d'exploration

Julien Walter

Sulfure massif de Phelps Dodge  
Matagami, 8 – 18 août 2016



Résurgence de l'aquifère profond, forage RA-07-04



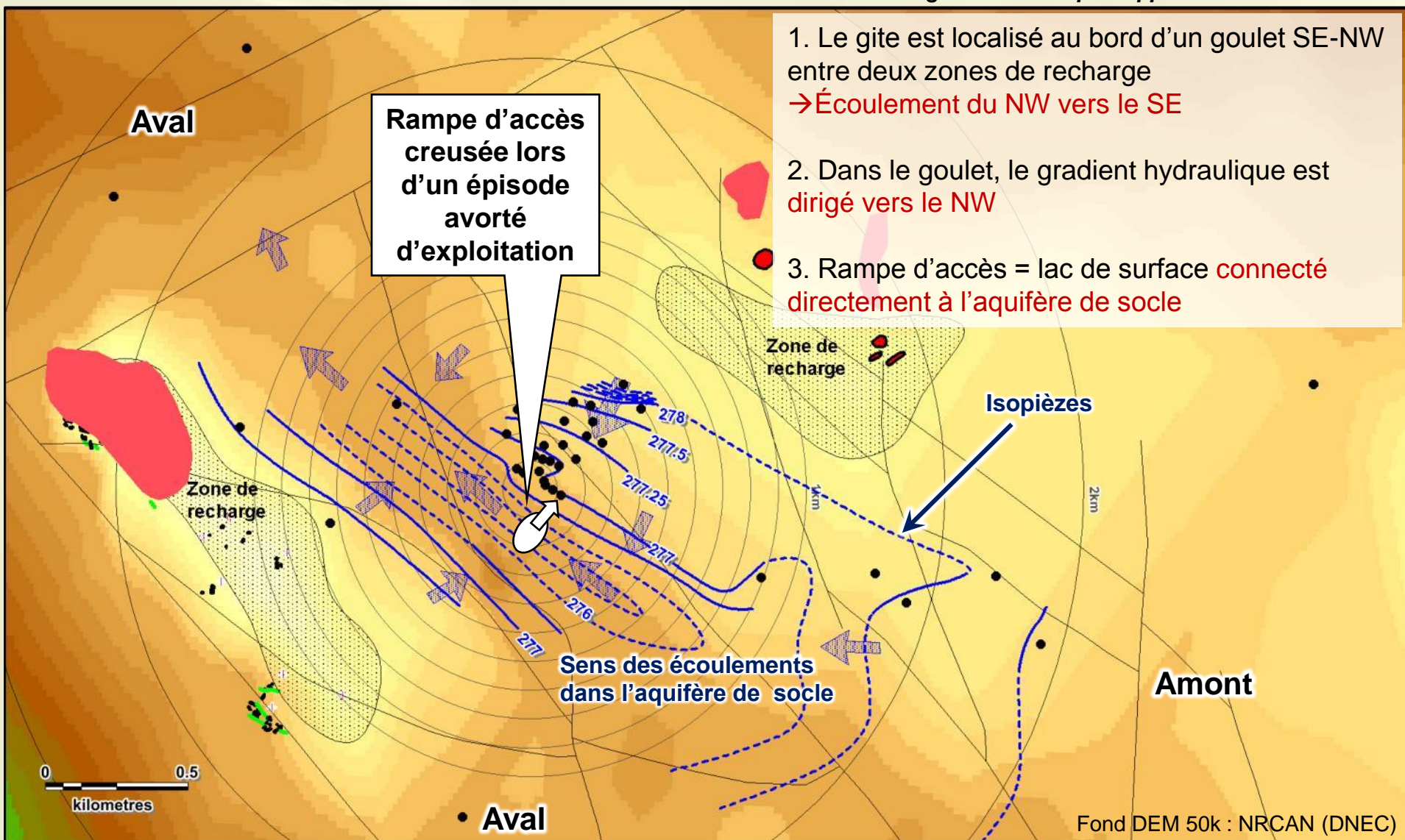




## Mesure des niveaux statiques (charge hydraulique)

Charges en mètres par rapport au niveau de la mer

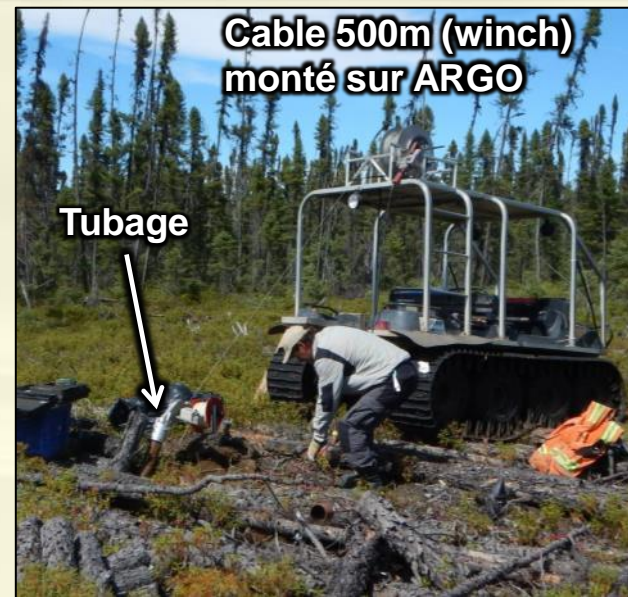
1. Le gîte est localisé au bord d'un goulet SE-NW entre deux zones de recharge  
→ Écoulement du NW vers le SE
2. Dans le goulet, le gradient hydraulique est dirigé vers le NW
3. Rampe d'accès = lac de surface connecté directement à l'aquifère de socle





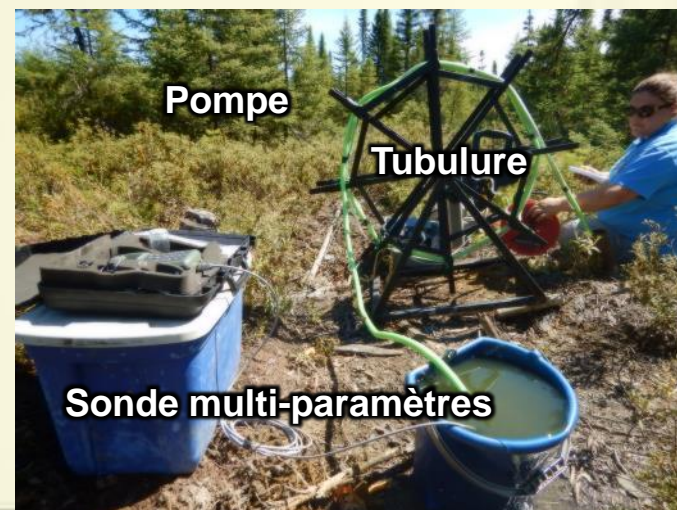
## Échantillonnage *passif* : **BAILER**

Tube à double valve ouvertes en descente, et qui se referment en remontée



## Échantillonnage *actif* : pompage avec purge préalable du tubage

1. Purge de l'eau stagnante du tubage (faible débit pour réduire mouvements verticaux dans le puits). Purge jusqu'à **stabilisation des paramètres** Eh-pH-OD-Cond-T mesurés en continu à la sonde
2. Échantillonnage par pompage à faible débit







Treuil avec moteur



Indicateur de profondeur



Bailer avec tête en teflon



## Protocole d'échantillonnage *ultratracés* :

- Nombreuses précautions pour limiter contaminations
- Inspiré de protocole MDDELCC (issu de Amer. Env. Protection Agency )
- Conservation de l'eau dans flacons décontaminés
- Port de gants stériles neufs à opération
- Filtres et seringues stériles neuf à opération
- Rinçage des instruments à l'eau ultrapure entre chaque opération
- Conservation au froid

## Laboratoire roulant



## CATIONS

### Filtration 0.45µm



### Acidification



## ANIONS

### Cations 50 mL

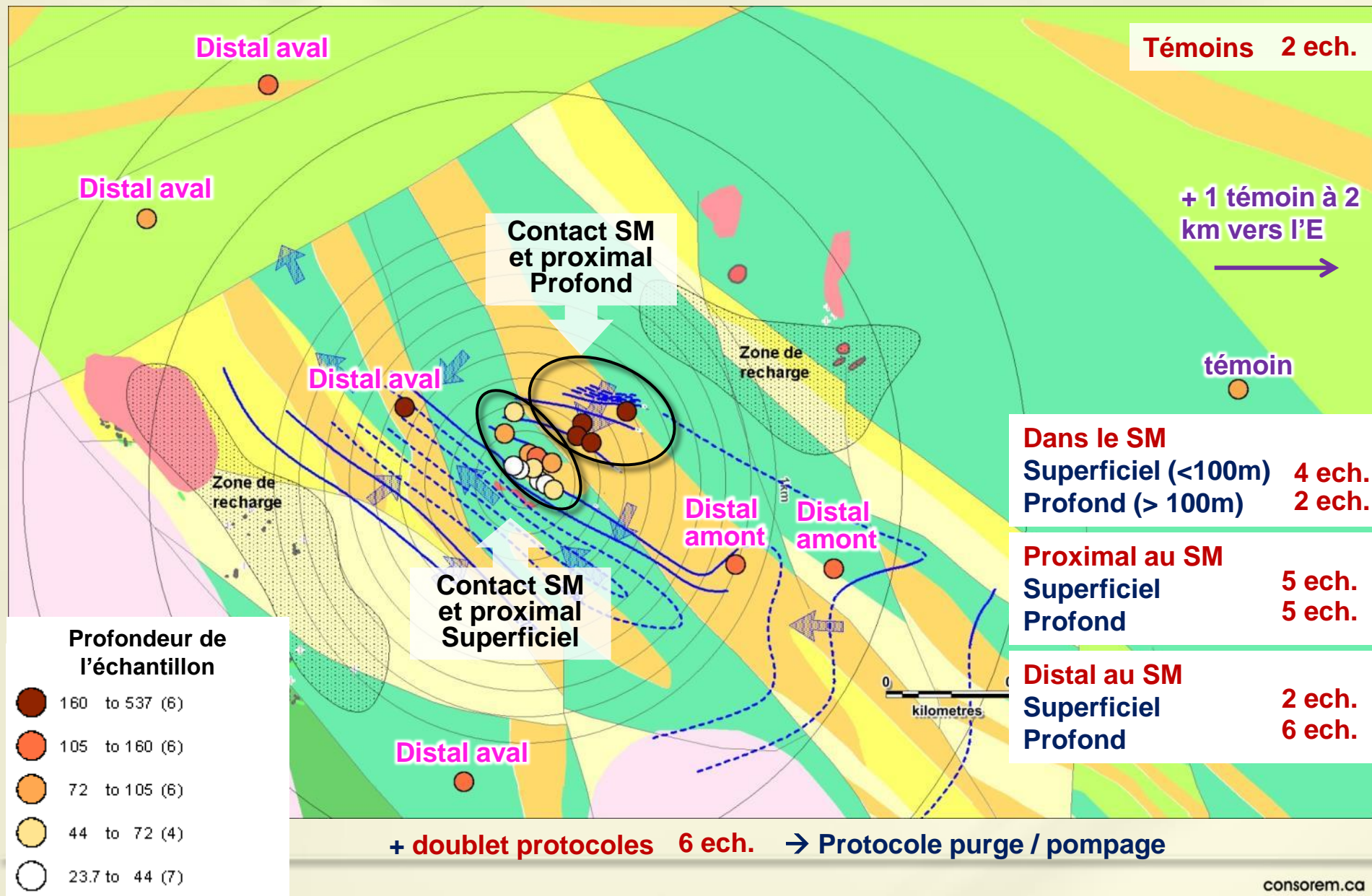


### Anions 125 mL





## 30 échantillons + 2 blancs

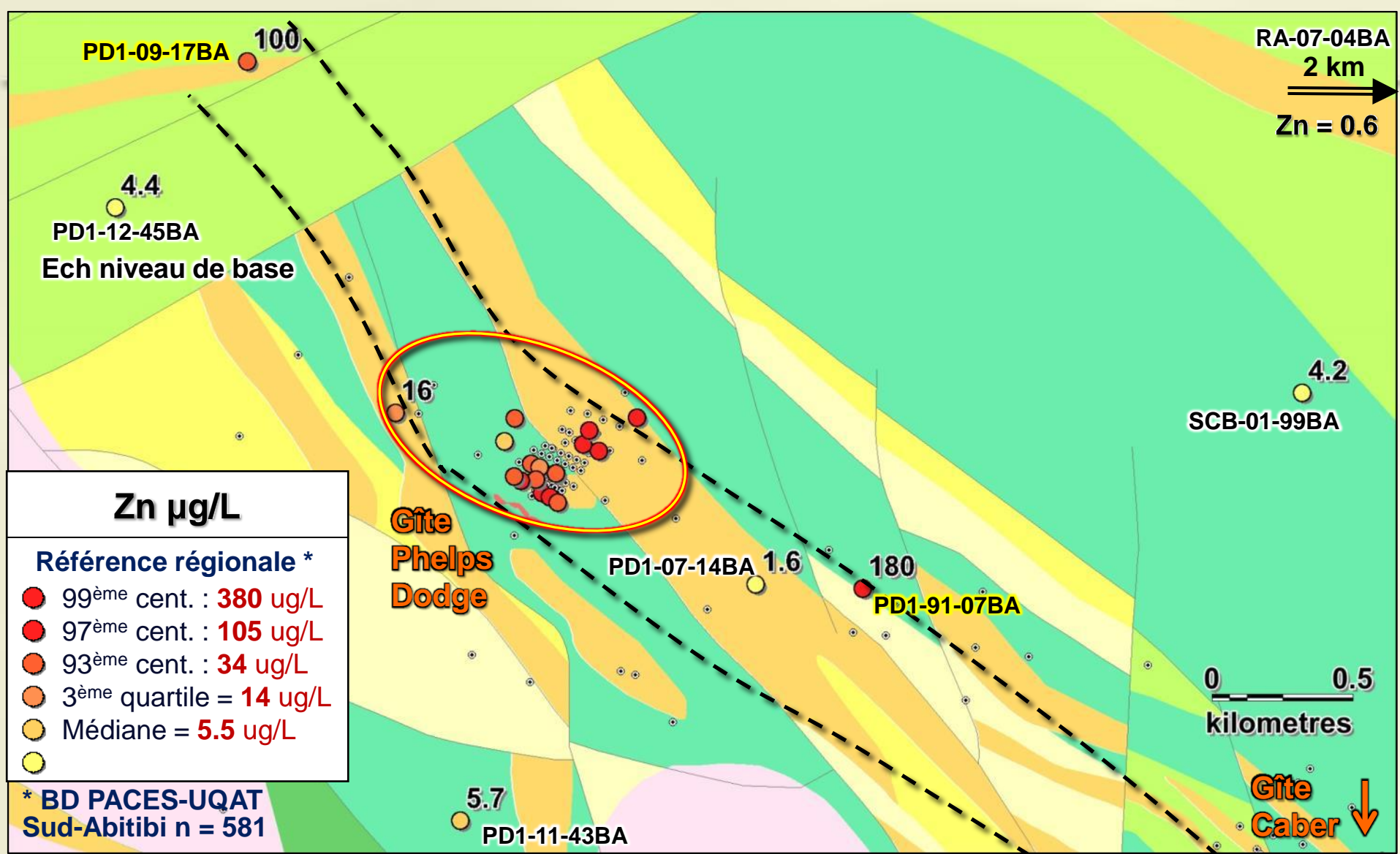




A traditional stone well with a wooden frame and pulley system. The well is constructed from grey stone blocks and is surrounded by a wooden frame made of thick, weathered logs. A wooden bucket is suspended from a pulley system, and a rope is attached to the bucket. The well is set in a grassy area with trees in the background.

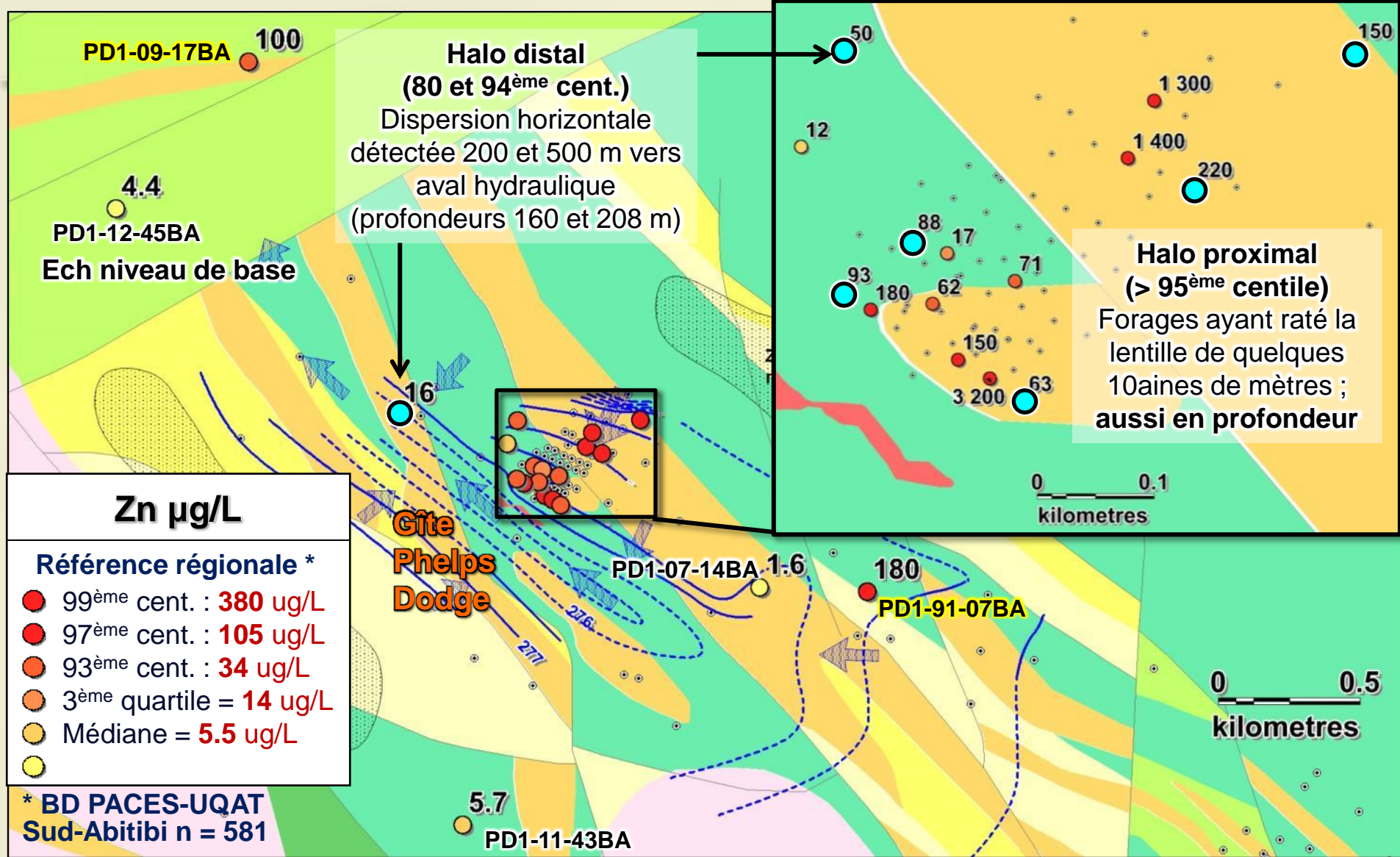
# RÉSULTATS



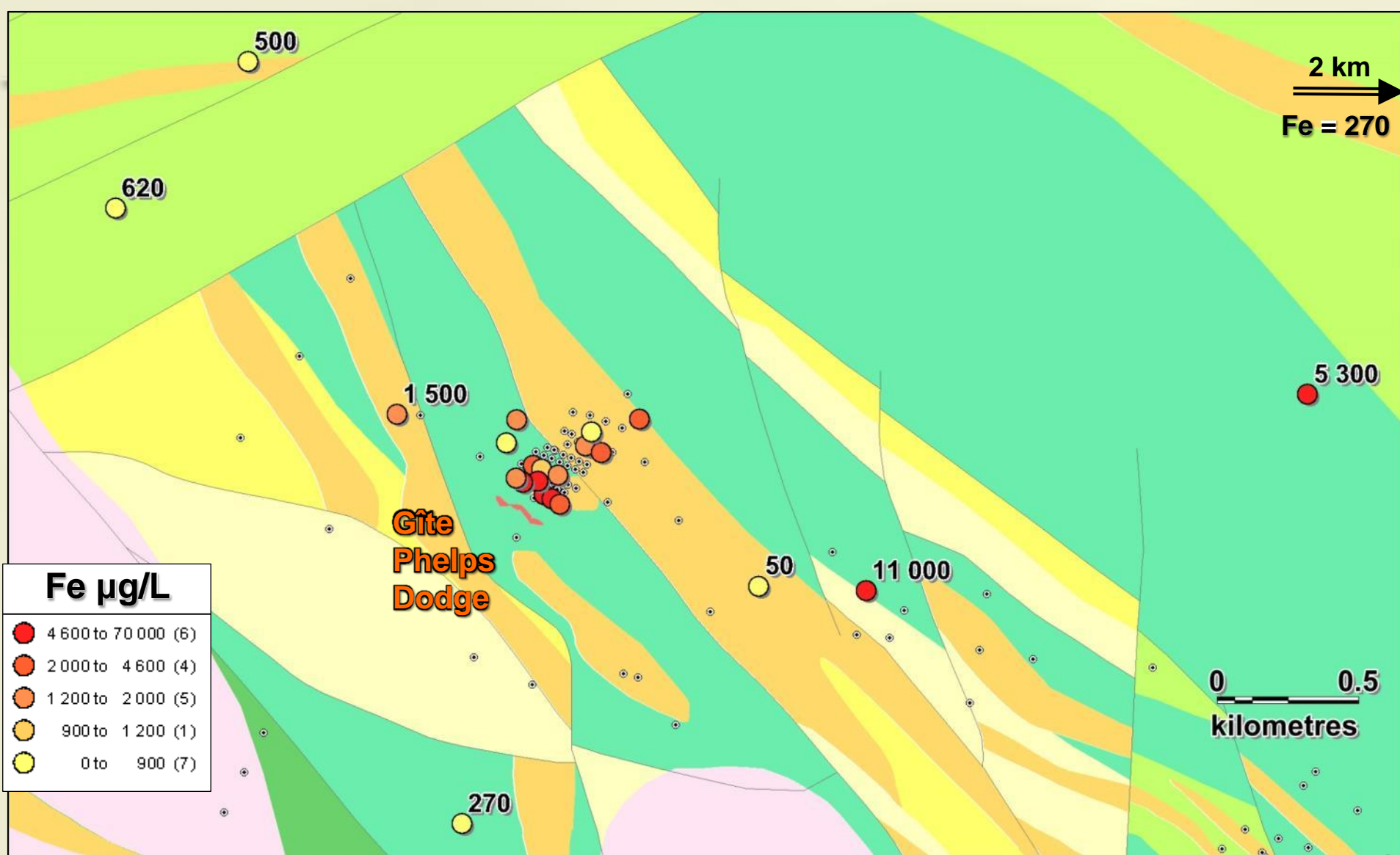


- 5 échantillons distaux donnent le niveau de base ; cohérent avec régional Sud-Abitibi
- Deux échantillons distaux situés dans axe stratigraphique de Caber et Phelps Dodge sont enrichis Zn
- **Tous** les ech proches du gîte Phelps-Dodge sont enrichis en Zn ; **eau profonde très enrichie !**



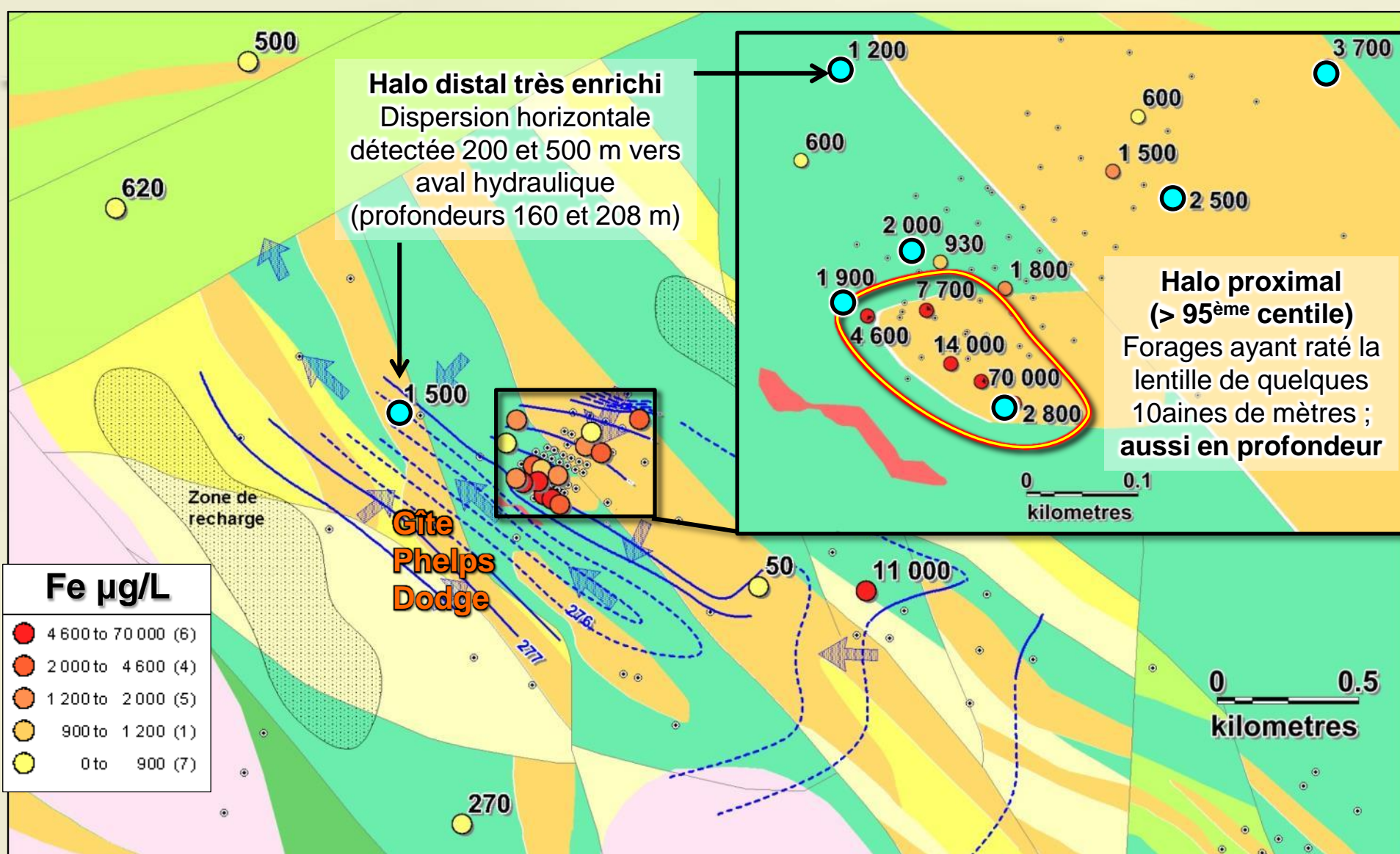


- 5 échantillons distaux donnent le niveau de base ; cohérent avec régional Sud-Abitibi
- Deux échantillons distaux situés dans axe stratigraphique de Caber et Phelps Dodge sont enrichis en Zn
- **Tous** les ech proches du gîte Phelps-Dodge sont enrichis en Zn ; **eau profonde très enrichie !**



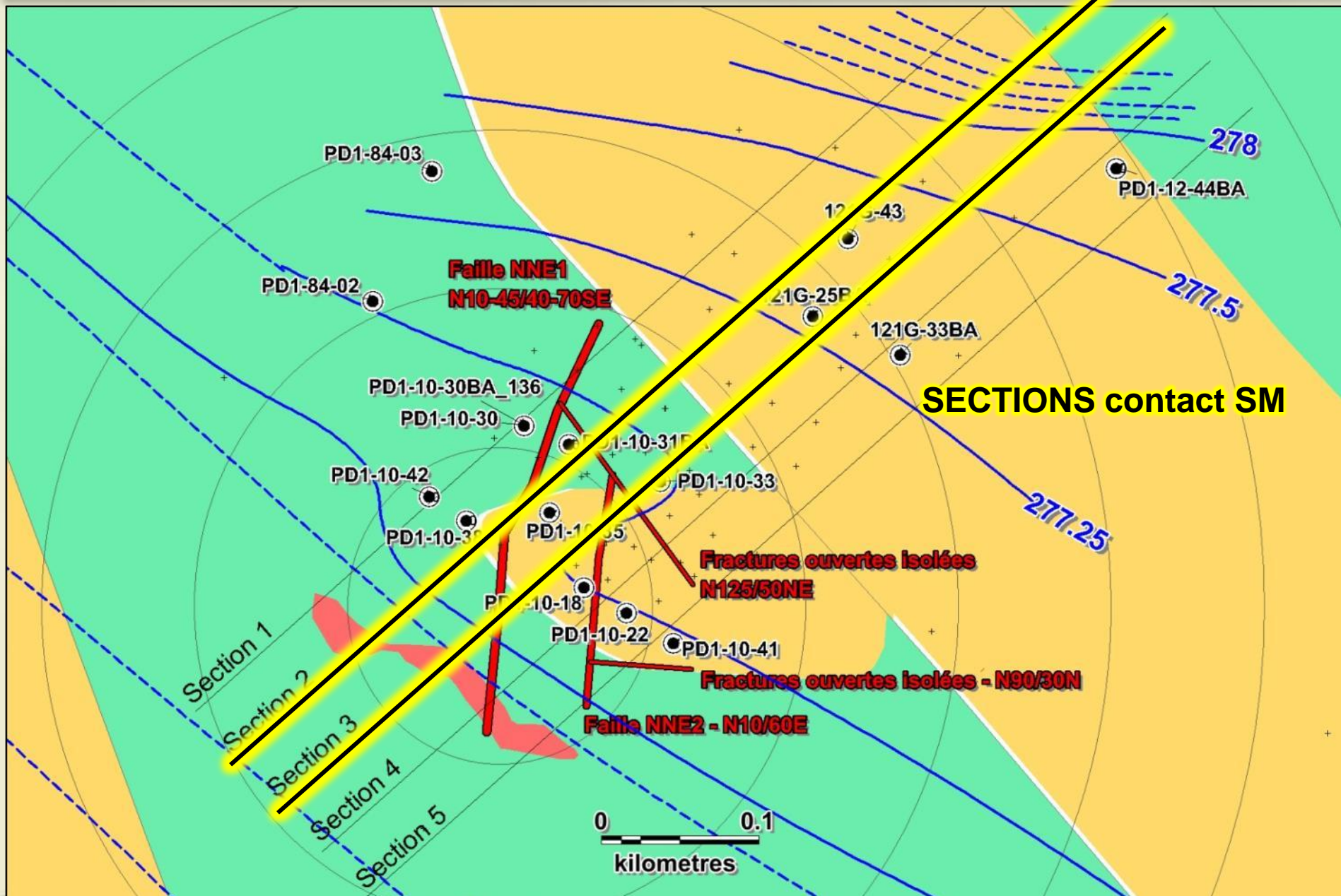
➤ Niveau de base local autour de 270 ug/L (10 x plus élevé que régional Sud-Abitibi)





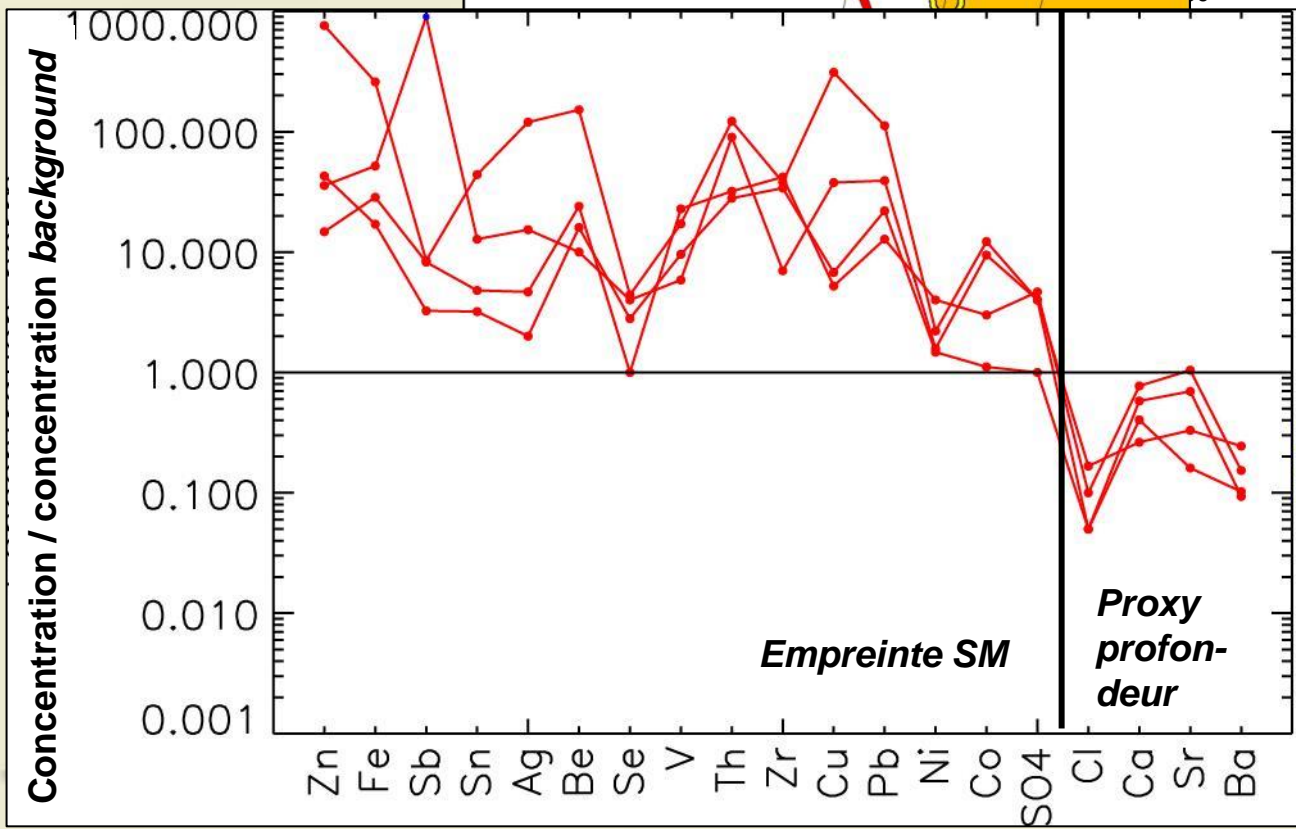
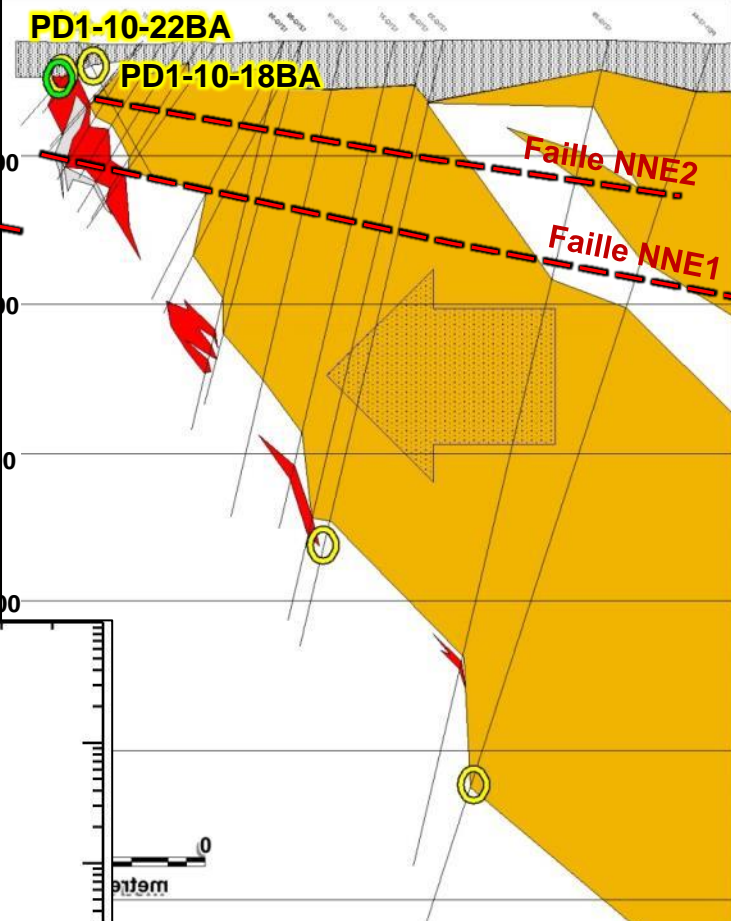
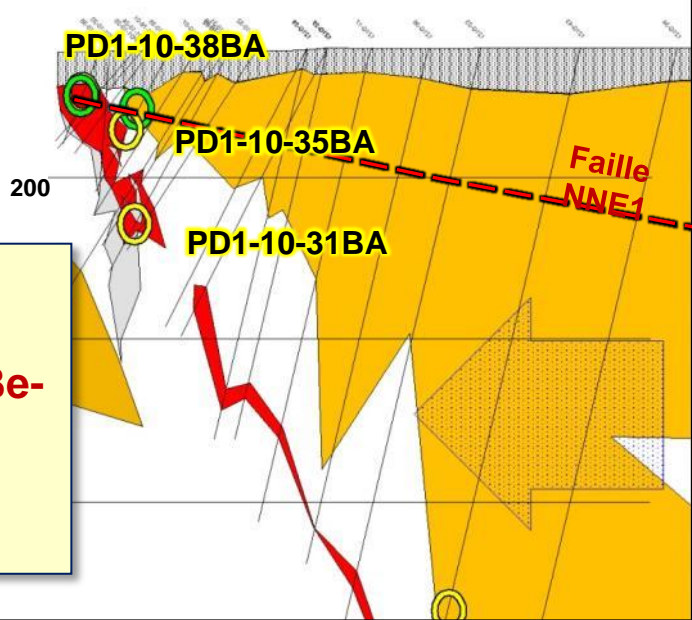
- Niveau de base local autour de 270 ug/L (10 x plus élevé que régional Sud-Abitibi)
- **Tous** les ech proches du gîte Phelps-Dodge sont enrichis en Fe
- Enrichissement particulièrement fort sur ech recoupant le SM **en subsurface**





## Empreinte du SM en subsurface

Très net enrichissement multi-élément :  
**Zn-Fe-SO4-Sb-Sn-Se-Be-**  
**Ag-V**  
**Pb-Cu-Co-Ni**  
 Th, Zr



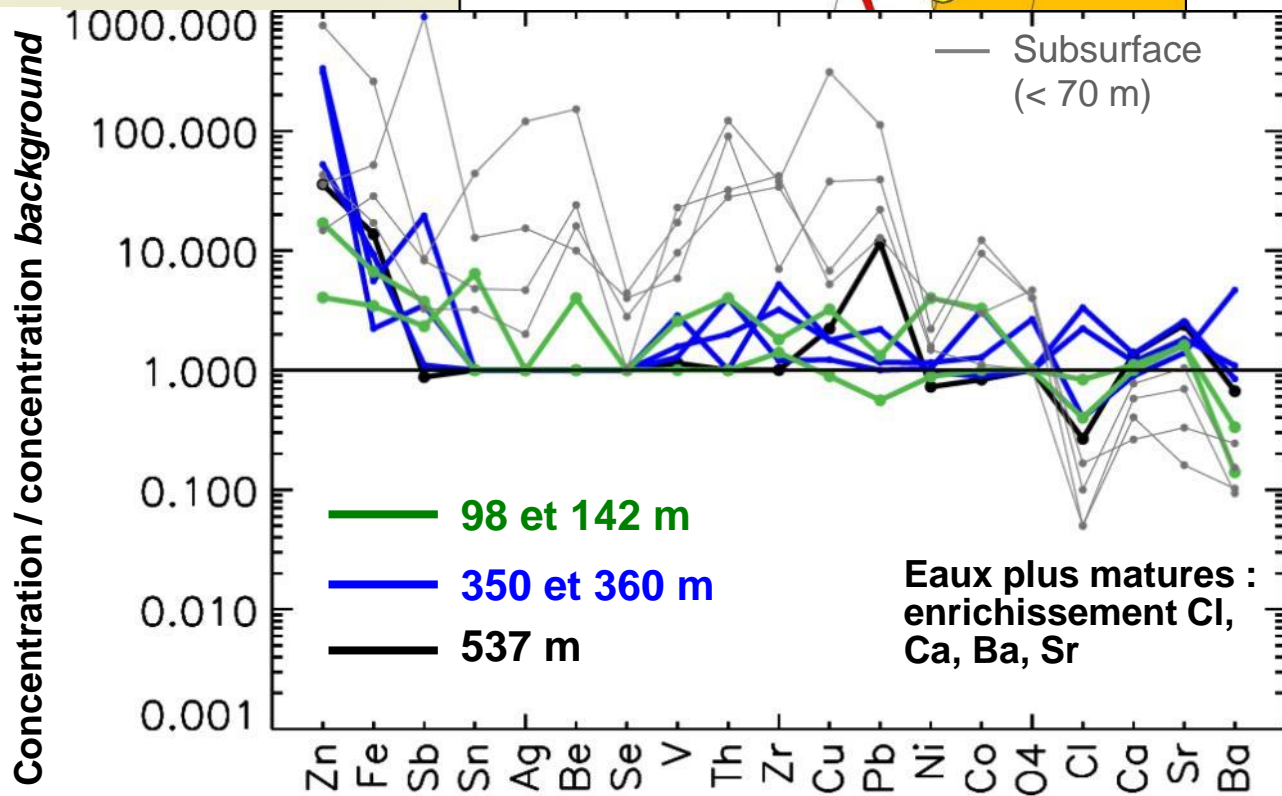
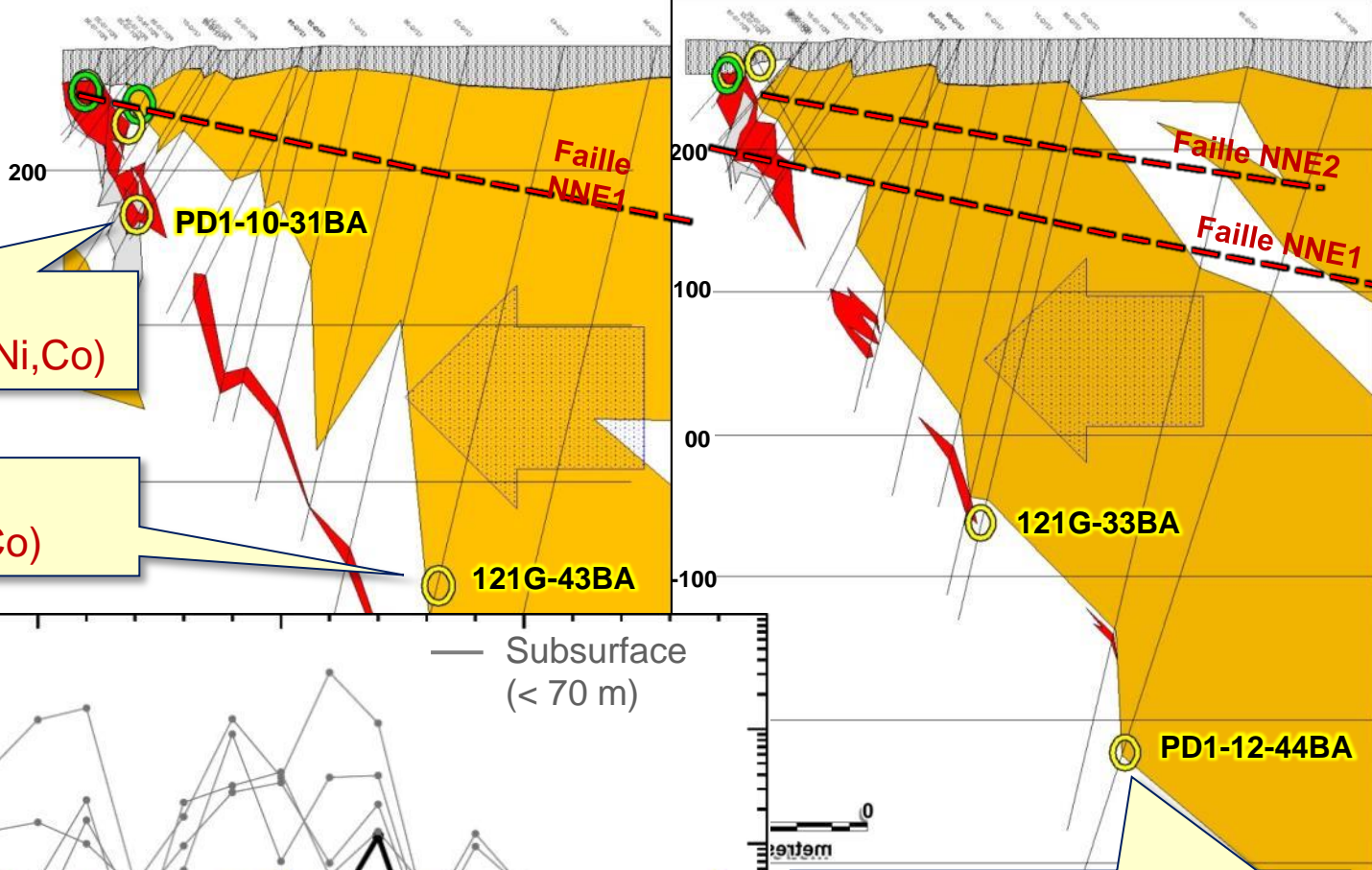
- Conditions oxydantes (SO4 élevé, Eh moyen à élevé)
- Eau très peu mûre (Ca, Ba, Cl très faibles, salinité < 100 mg/L)



# Empreinte du SM en profondeur

**98 et 142 m :**  
**Zn-Fe-Sb-Sn (Be, V, Cu, Ni, Co)**

**350 et 360 m :**  
**Zn-Fe-Sb (V, Cu, Pb, Ni, Co)**



## 537 m et off hole !:

**Zn-Fe (Cu, Pb)**

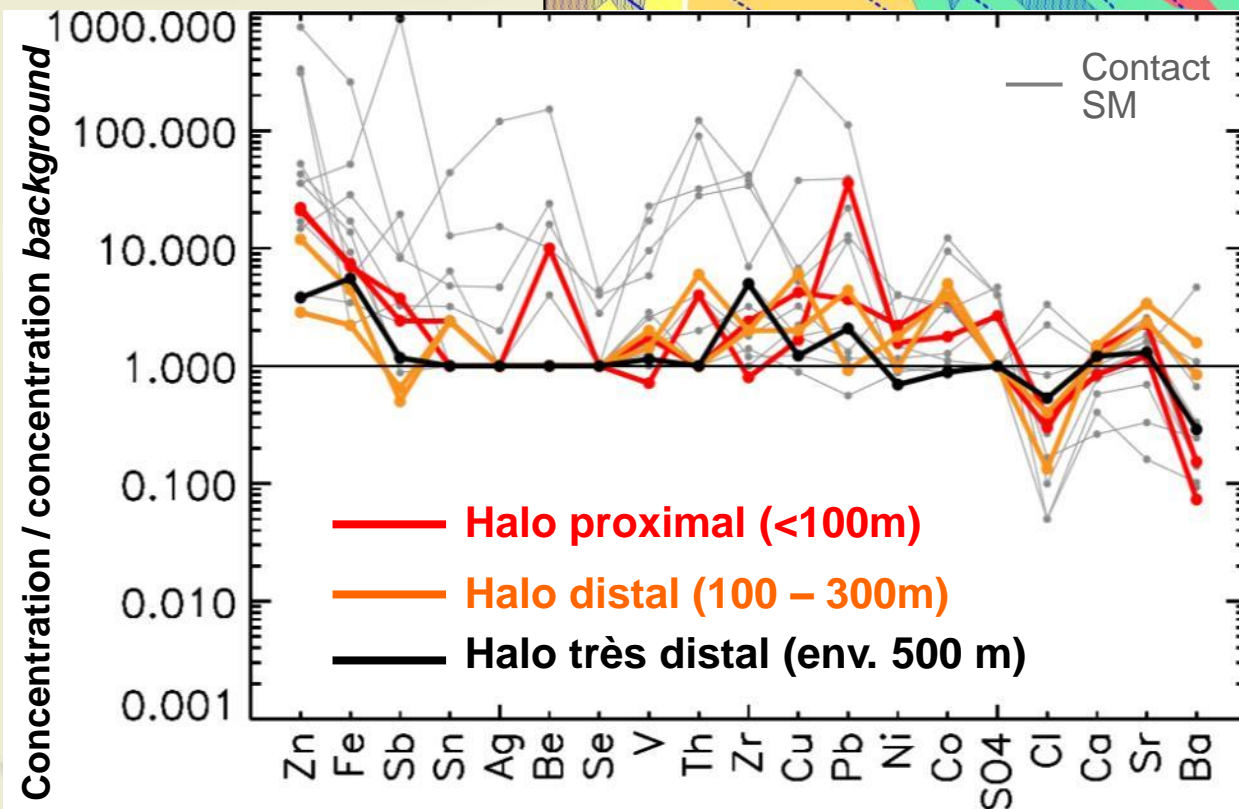
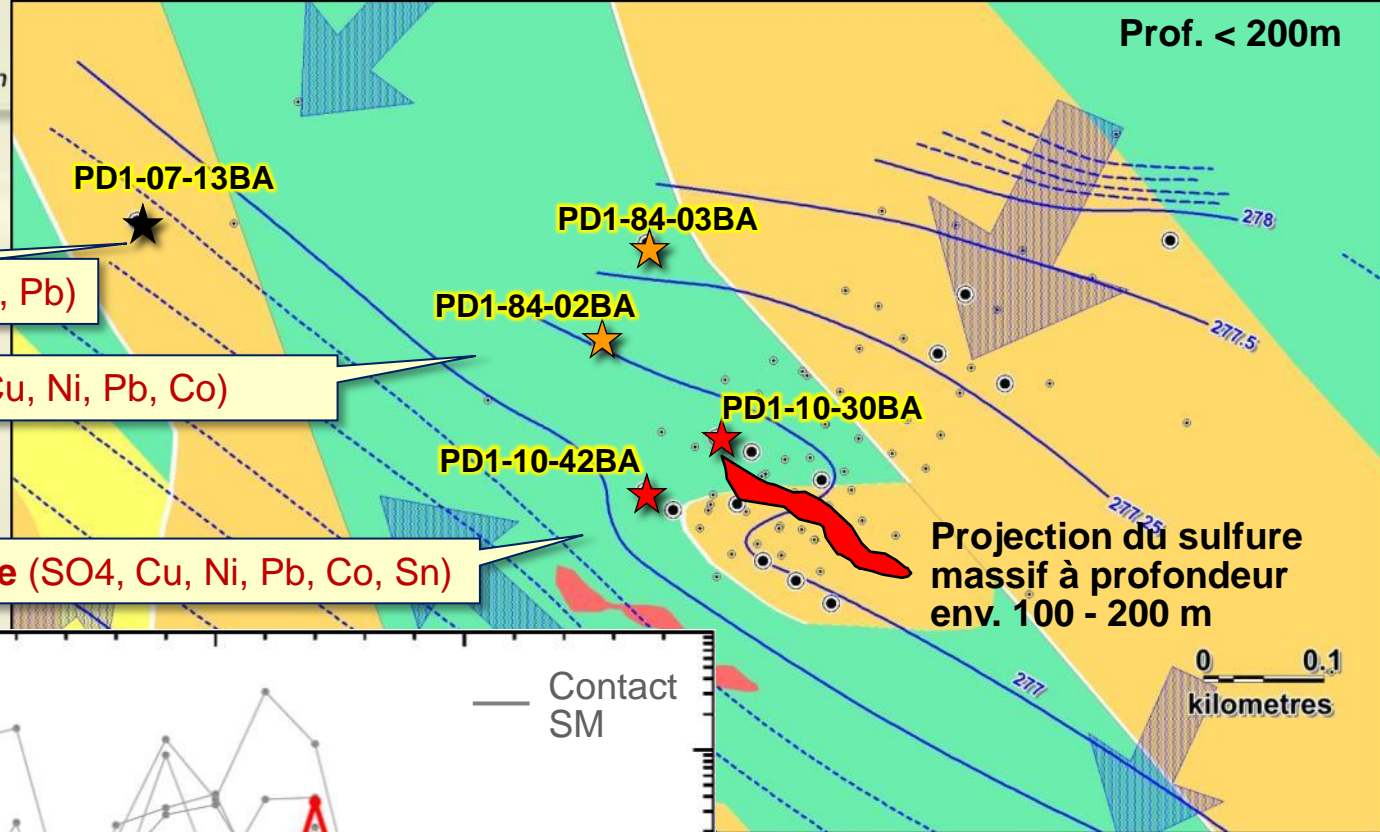
- Enrichissement **très fort en Zn-Fe**, > plus superficiels (98 et 142 m)
- Contexte **non-oxydant** (SO4 sous la LD)
- **Aucune senteur Zn à l'analyse de carotte...**

# Dispersion fractionnée du halo

**Halo très distal : Zn, Fe, (Cu, Pb)**

**Halo distal : Zn, Fe, Sn, (Cu, Ni, Pb, Co)**

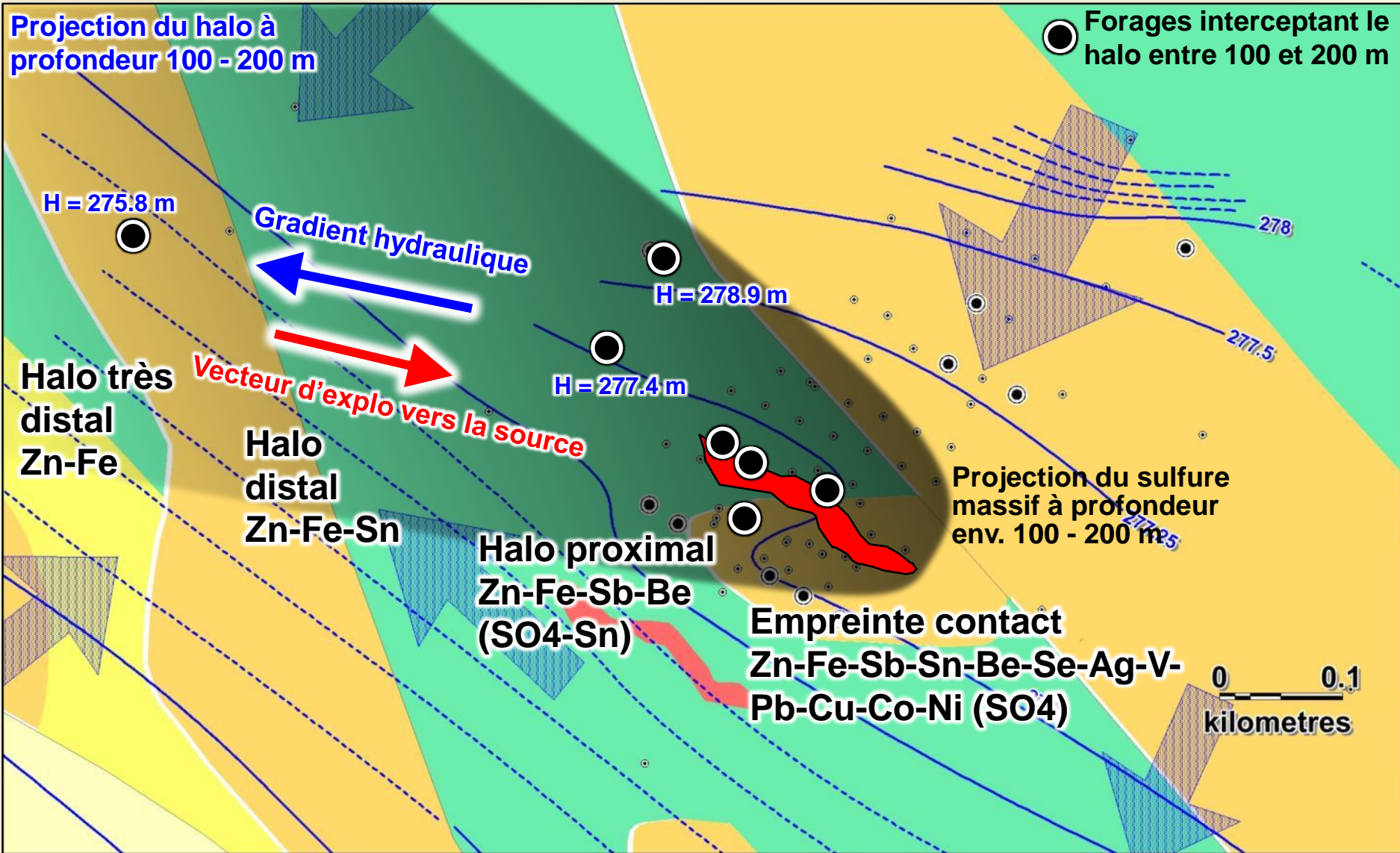
**Halo proximal : Zn, Fe, Sb, Be (SO<sub>4</sub>, Cu, Ni, Pb, Co, Sn)**



- ➔ L'analyse de l'eau dans ces forages détecte la proximité d'un corps Zn minéralisé important ;
- ➔ Invisible au log de carottes (seul<sup>t</sup> traces CPY rapportées)

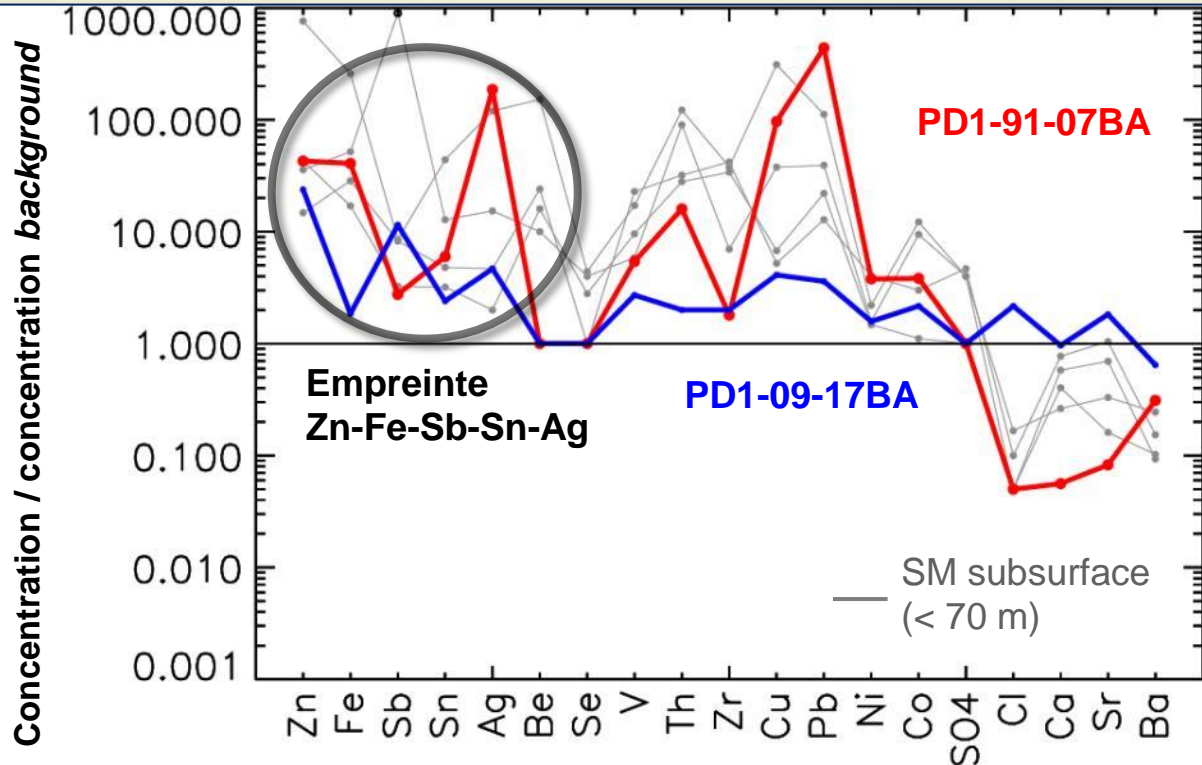


# Synthèse : projection du halo métallique



Pas de sulfures significatifs  
 Altération CHL, SER, SIL  
 Pas de senteur à l'analyse

**PD1-09-17BA**  
 122 m



Pas de sulfures significatifs  
 Altération CHL, SER, SIL  
 Petite senteur en profondeur  
 (1.47 g/t Au, 0.28 % Cu)

**PD1-91-07BA**  
 105 m

**Gîte Phelps Dodge**

Zone de recharge

Zone de recharge

0 0.5  
 kilometres

**Gîte Caber** ↓



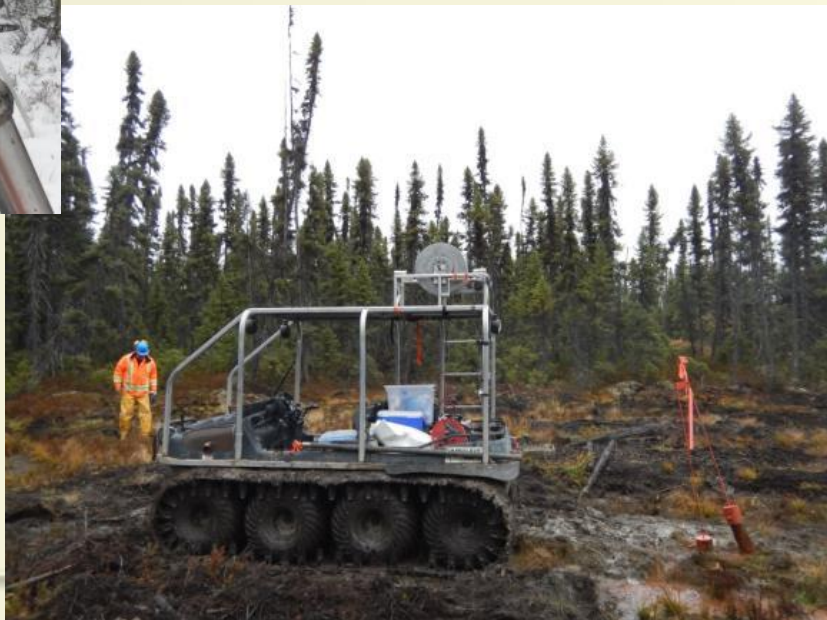
# **DISCUSSION et DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODE**

- **Protocole d'échantillonnage**
- **Protocole d'extraction**
- **Protocole d'analyse et QAQC**
- **Facteurs hydrogéologiques**



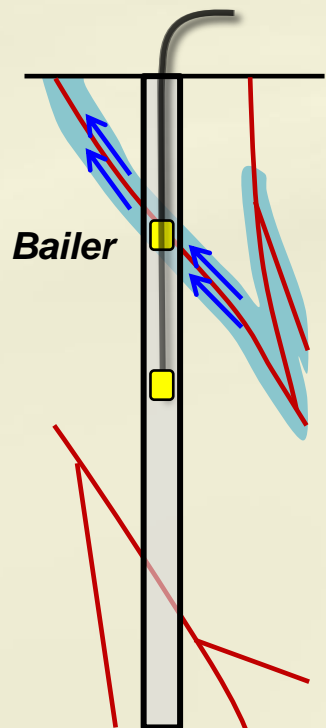


**Deux années de développement  
opérateur : protocoles validés,  
adaptés au contexte d'exploration**



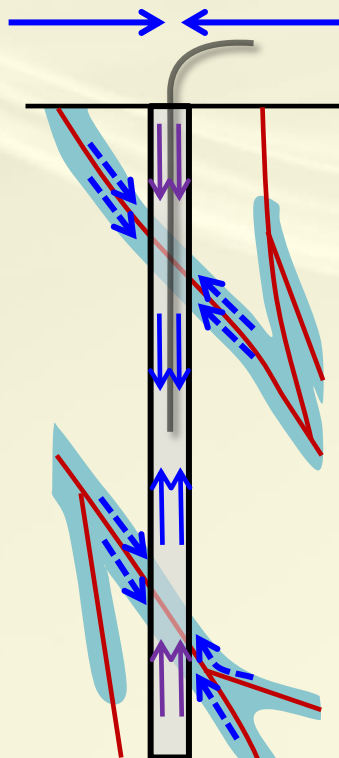


Écoulement  
(gradient régional)



- **Bailer**
- **Low flow (sans purge)**

Écoulement  
(gradient artificiel)



- **High flow (avec purge)**

- Pompe submersible placées dans le tubage
- **Plusieurs fractures sont stimulées**  
→ zone influence plus grande
- Nécessaire de purger longtemps le puits (fort débit)
- Purge incomplète = mélange eau aquifère et eau du puits (stratifiée)
- Gradients hydrauliques artificiels

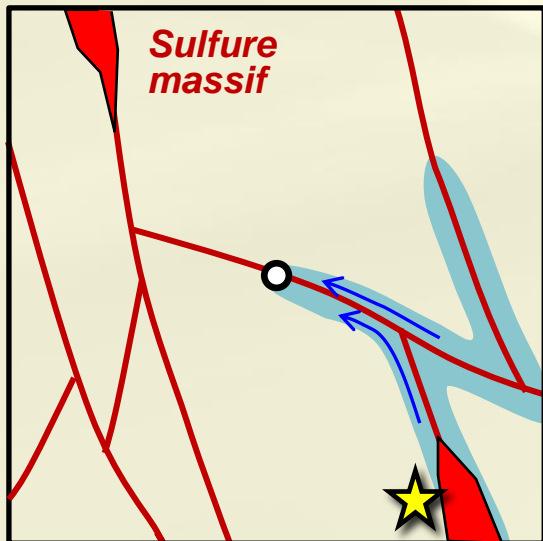
**Low-flow requiert reconnaissance préalable des fractures ouvertes**  
**Très fort potentiel**  
**Bailer : simplicité d'usage, même à forte profondeur**

**Stimule plus gros volume d'aquifère mais aucun contrôle sur les connexions hydrauliques créées**

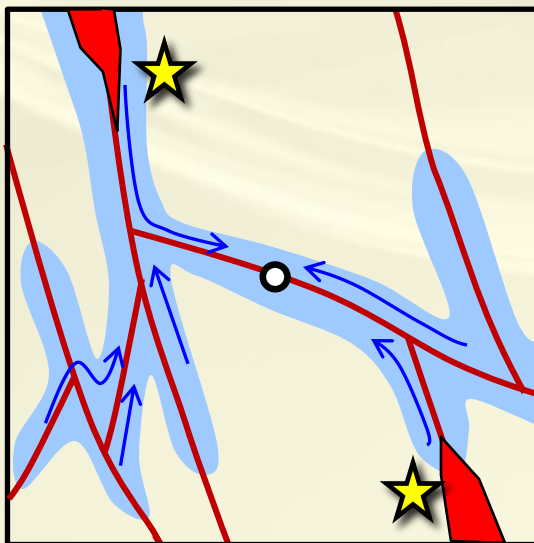
# Mode opératoire : Zone d'alimentation ech. passif vs actif

Mode passif

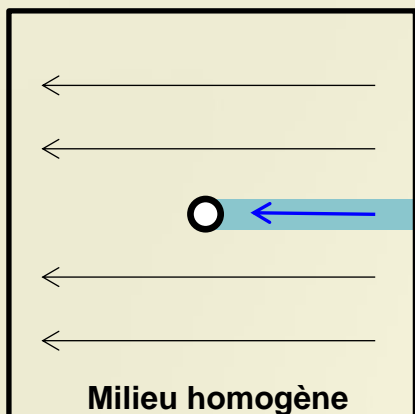
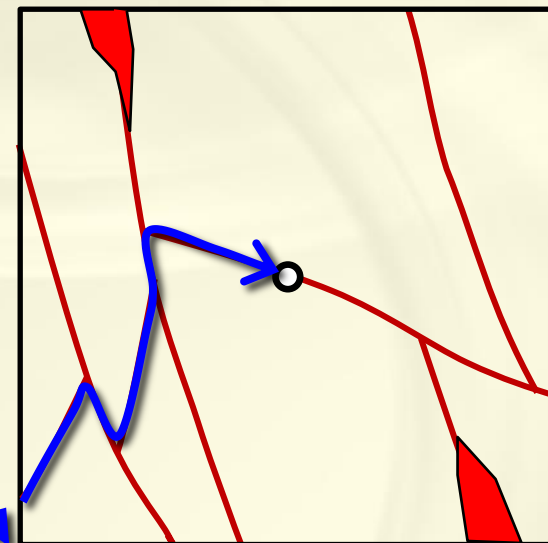
Écoulement régional



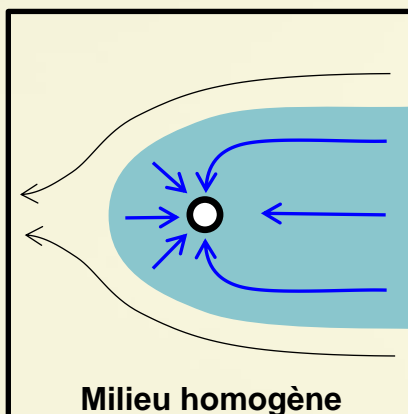
Mode actif  
*lucky*



Mode actif  
*badlucky*



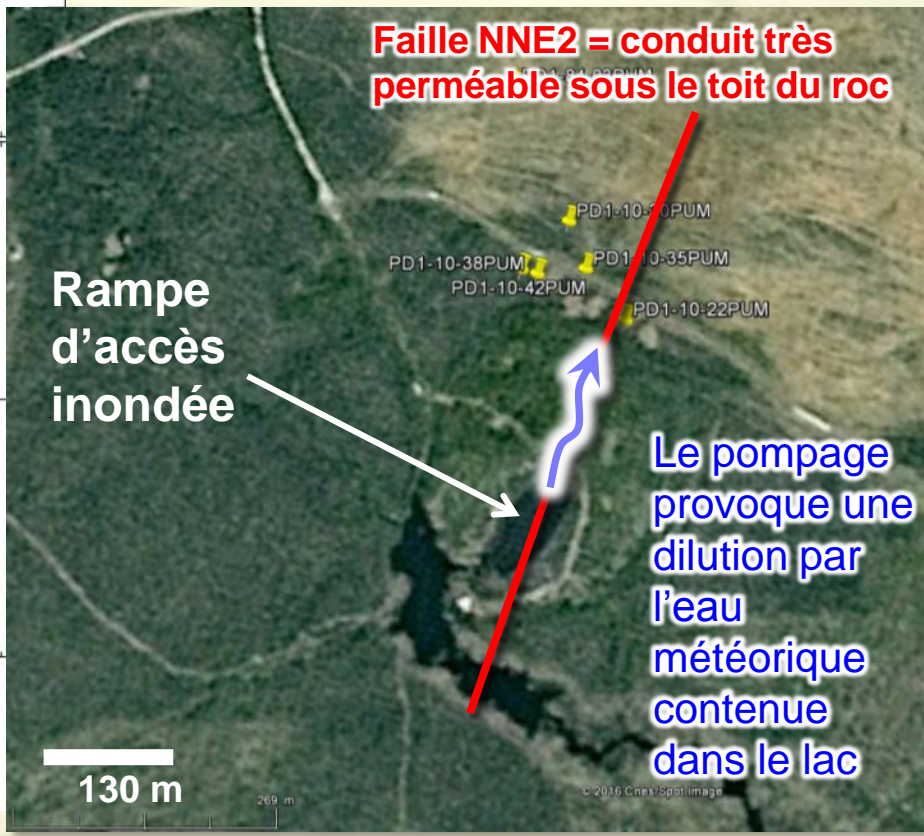
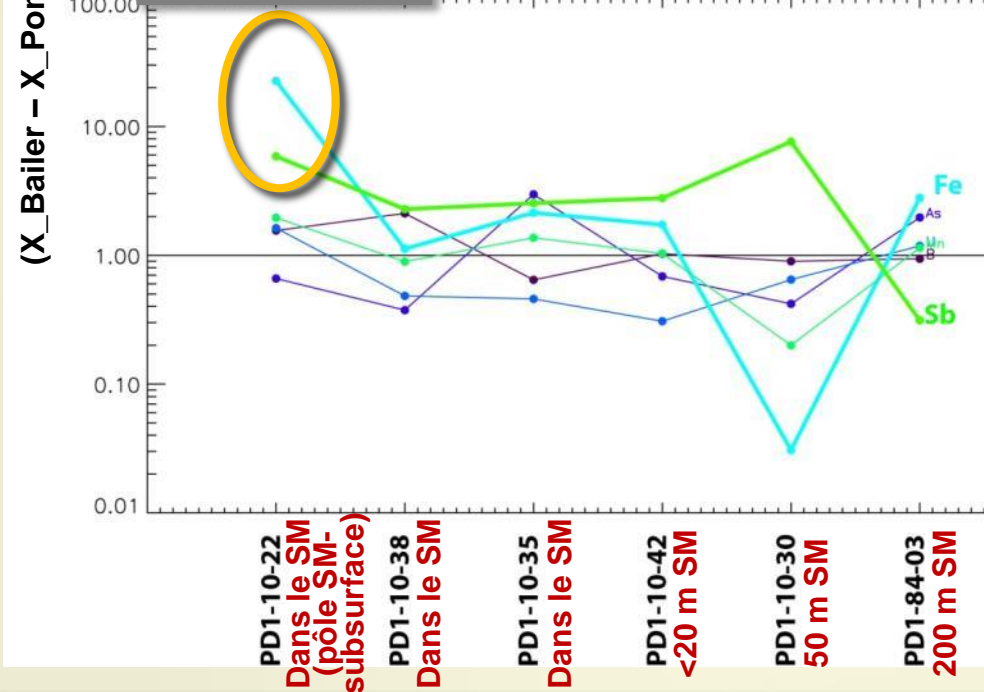
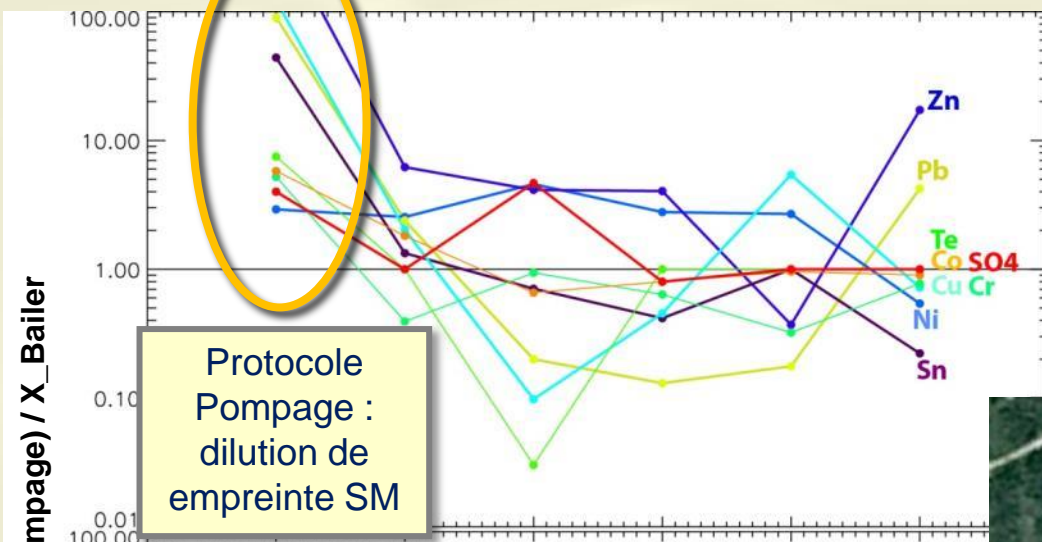
Zone  
d'alimen-  
-tation

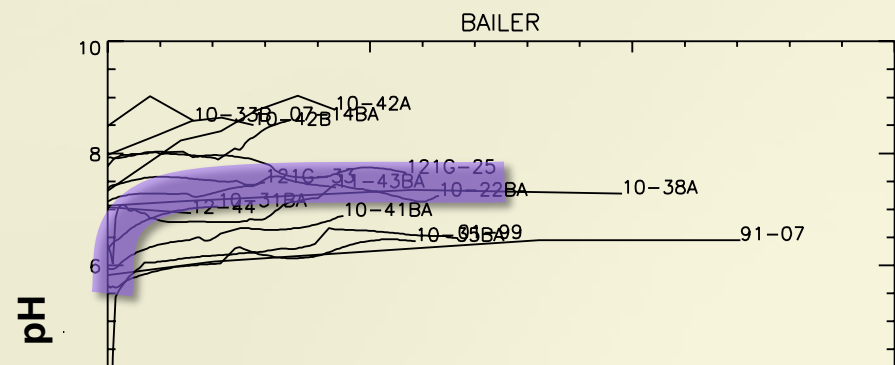
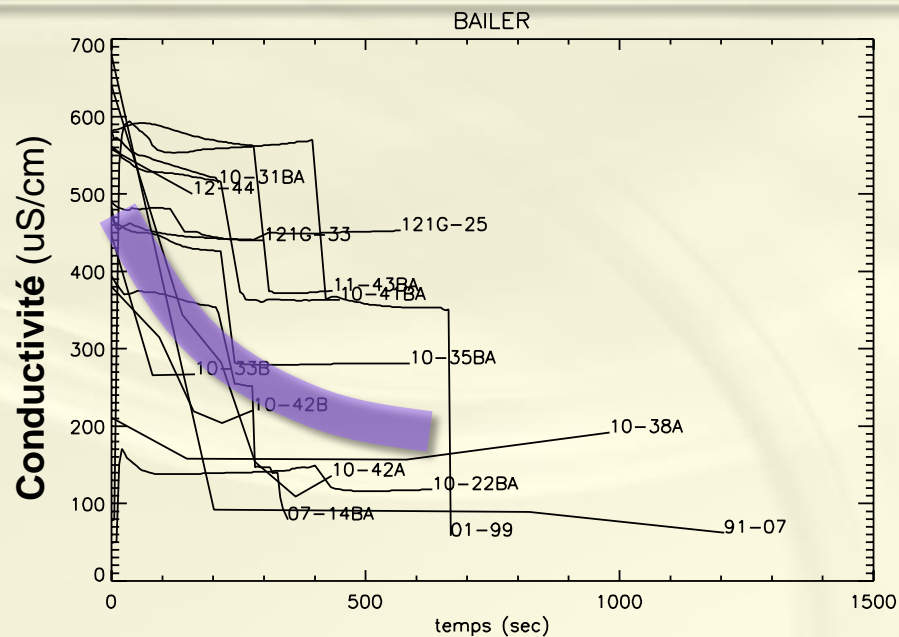
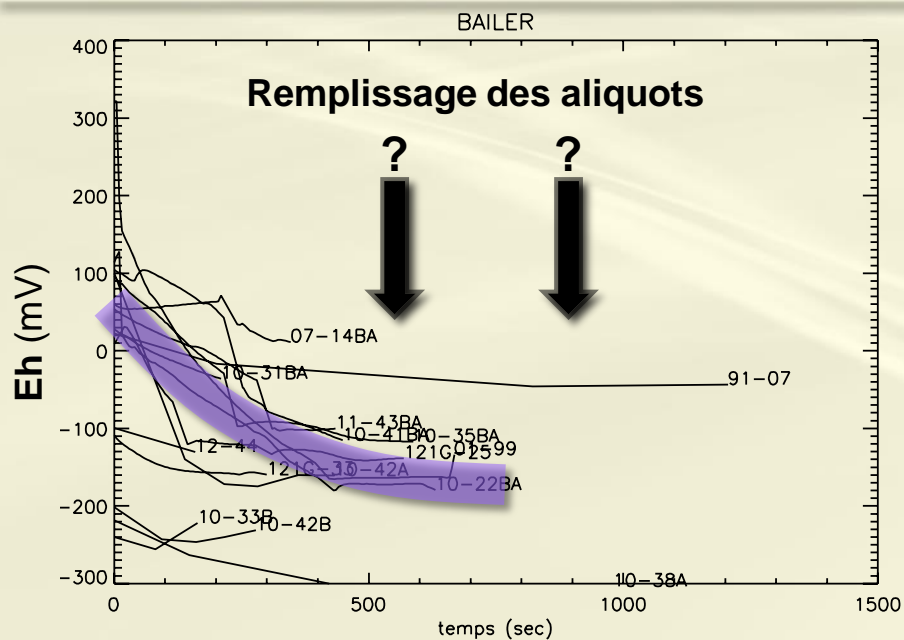


Réservoir (connexion avec une source productive distale : aquifère granulaire, socle plus fracturé, lac...)

Mode actif (c.a.d., avec **pompage**) potentiellement **plus large zone d'alimentation**, mais **forte incertitude sur les connexions** artificielles...







**Composition peut varier avant remplissage des aliquots = source d'imprécision**

**Amélioration du protocole**

- Remplissage des aliquots systématiquement au même temps après extraction de l'eau
- Mesurer in situ pH-Eh-Cond-T (sonde)
- Echantillonner in-situ (appareillage plus complexe)

Équilibrage très rapide avec atmosphère après extraction de l'eau du bailer → Dégazage  $\text{CO}_{2\text{dissous}}$  → Remontée du pH

$[\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_{2\text{d}} \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-]$

→ Solubilité de tous les cations diminue, celle des oxyanions (Se, Mo, V, Cr) augmente...



- ❑ **Analyse « normale »** (100 \$) : empreinte restreinte Zn, Fe, SO<sub>4</sub>
  
- ❑ **Analyse « ultra-trace »** (145 \$) : empreinte complète Zn, Fe, SO<sub>4</sub>, Sb, Sn, Se, Be, Ag, V, Pb, Cu, Co
  - Sur le terrain : **échantillonnage « ultra-trace » est complexe**, parfois difficile à réaliser dans les conditions réelles de terrain
    - Contaminations détectées causées par intempéries
    - **Améliorer les conditions du prélèvement sur le terrain**
  
  - Au lab : **problèmes de reproductibilité**
    - **Perfectionner le protocole d'analyse** pour une meilleure reproductibilité (acidification avant analyse...)

**Conclusions**

**Perspectives**



### Objectif premier du projet : **la méthode est validée**

Conditions n'étaient pas optimales pour le développement et la détection de l'empreinte hydrogéochimique du sulfure massif

- Eau très diluée (beaucoup de valeurs sous les LD), problèmes de qualité, protocole d'échantillonnage en développement

### En dépit de ces conditions non-optimales, **le test ressort très positif**

- ❑ Un sulfure massif zincifère produit une empreinte hydrogéochimique **multi-éléments** détectable jusqu'**au moins 540 m de profondeur**, et sur **plus de 600 m de distance horizontale** vers l'aval hydraulique
- ❑ L'enrichissement en Zn au contact SM est **plus élevé dans l'eau profonde**
- ❑ Plusieurs forages passés **à côté du corps minéralisé** interceptent son halo hydrogéochimique → sortent **positifs à l'analyse de l'eau**

*L'hydrogéochimie a le potentiel d'**augmenter les performances des forages d'exploration** : augmente la « zone d'investigation » et la « portée » du forage, information supplémentaire sur l'environnement du forage*

- Nouvelle méthode d'exploration ayant prouvé son efficacité dans le Supérieur :
  - Pour la **reconnaissance de nouvelles zones** à l'échelle d'une propriété
  - Pour augmenter la « portée » des forages en contexte de campagne
  - Pour **l'exploration profonde**
- Des protocoles testés, appropriés au terrain québécois
- Savoir-faire novateur



Phase 2 complétée en 2018; phase 3 en cours de réalisation

### Principaux objectifs :

- **Validation de la méthode dans d'autres contextes, consolidation des résultats** avec des jeux de données plus importants
- Meilleure définition du **halo de dispersion en subsurface et en profondeur** (nature de l'empreinte multi-éléments, fractionnement métallique)
- Meilleur **contrôle des niveaux de base** : effet lithologique, effet « maturité de l'eau », effet de puits
- Définition des **indices optimaux pour l'exploration** (ratio d'éléments, indice de saturation etc. )
- **Poursuite du développement de la méthode** : tests de mode opératoire et amélioration des protocoles d'échantillonnage et d'analyse → perfectionner la qualité des données
- **Tester la méthode sur des gîtes aurifères**

**Merci de votre attention**

**Remerciements à David Noel, Julien Walter, Denis Theriault, Pascal Lessard, Gérald Gauthier**

**Rapport (en édition) et présentations disponibles en ligne ou sur requête**

**Contact : [silvain.rafini@gmail.com](mailto:silvain.rafini@gmail.com)**



## Doublets protocoles : comparaison des concentrations

Globalement, on observe bien les mêmes réponses

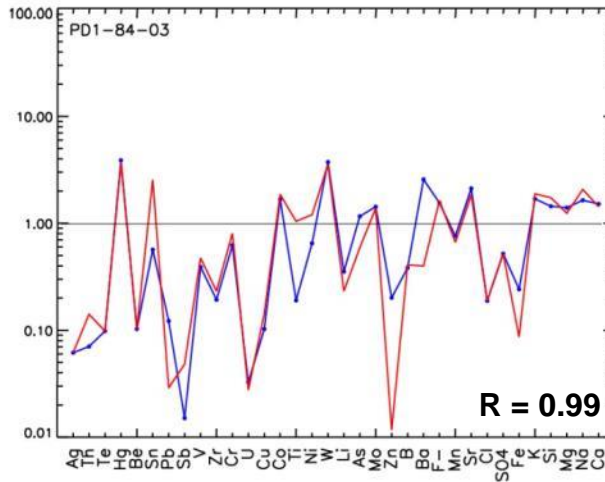
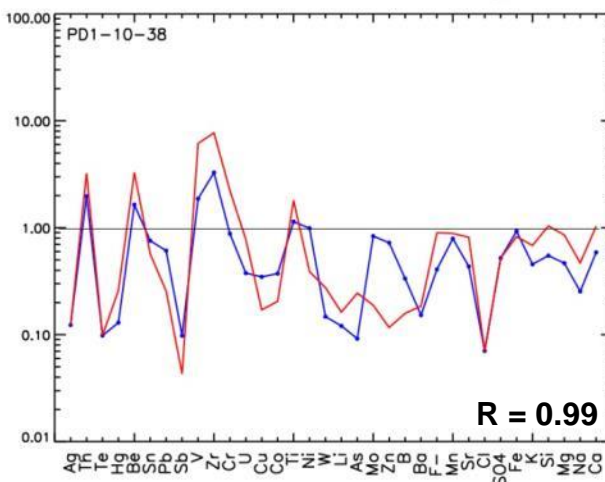
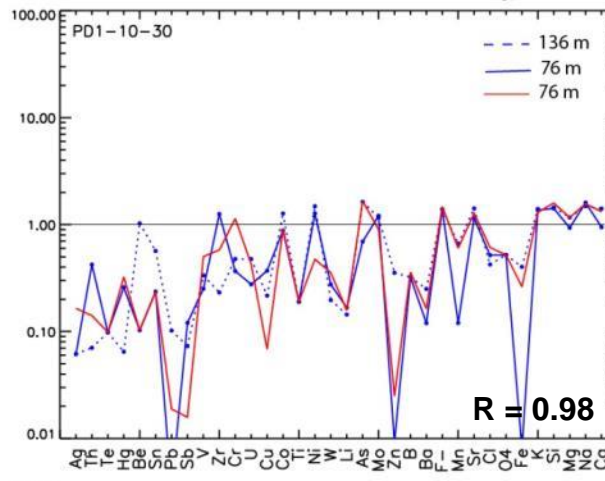
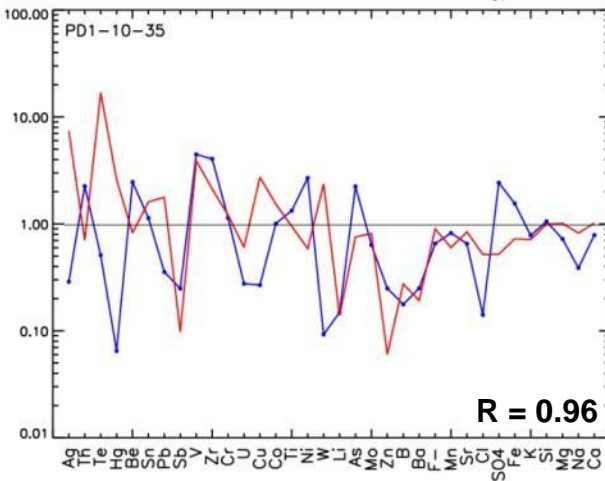
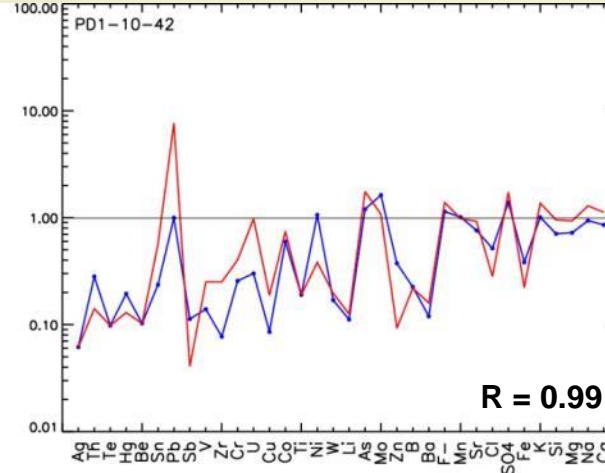
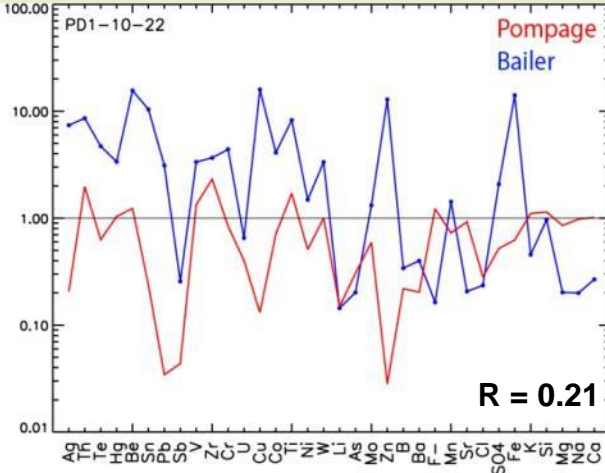
➔ Pas de biais majeur

➔ Ech. sont bien

**représentatifs** de l'eau  
environnementale, avec les  
deux protocoles

**Toutefois, les écarts  
sont très inégaux  
selon les éléments...**

Concentration / concentration moyenne du levé

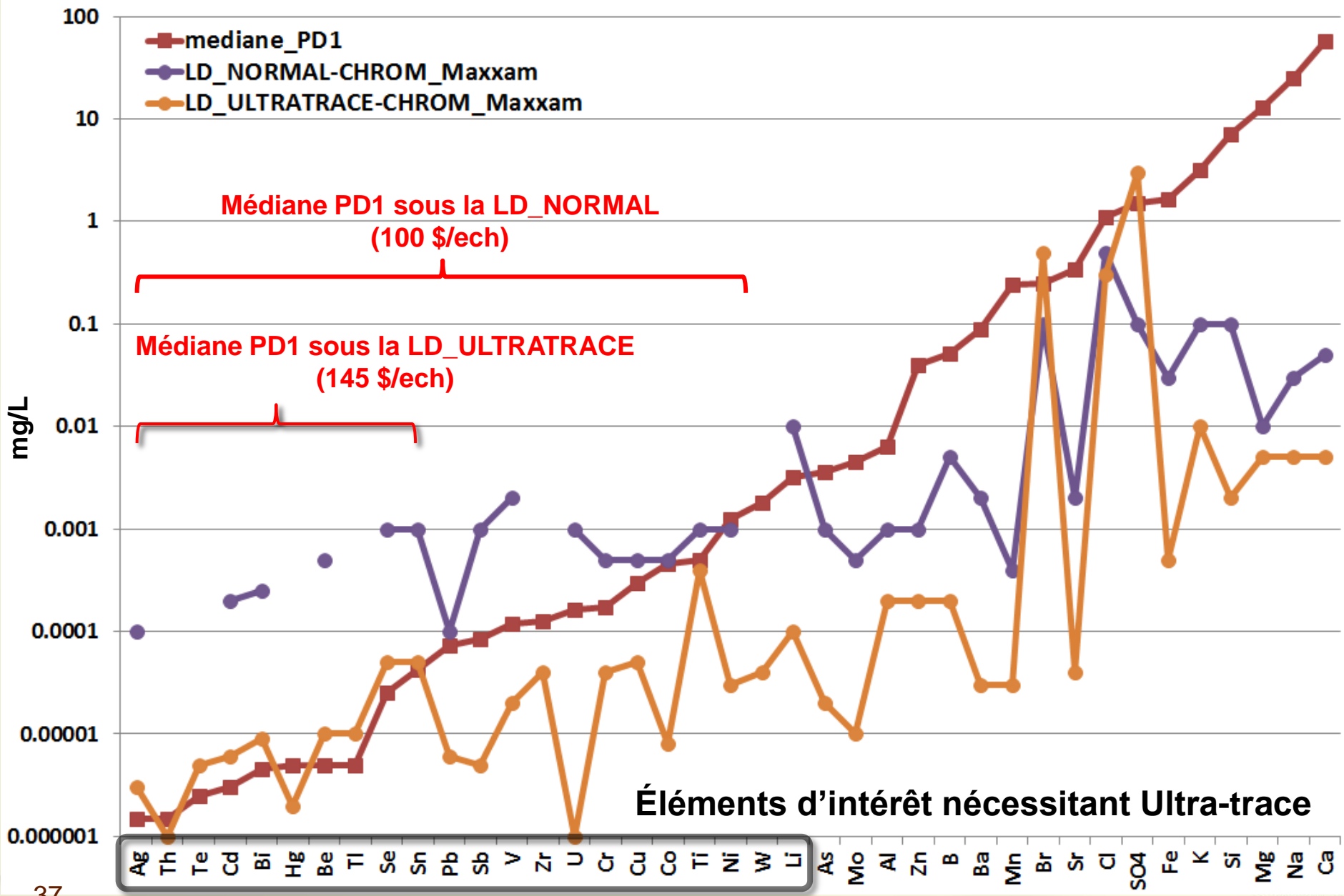


## Protocole MDDEP – US Env. Protection Agency

- **Bouteille** plastique HDPE (Nalgene ; 1L ou 0.5L si un seul aliquot)
- **Filtration *in situ* (pour supprimer charge en suspension) : 0.45  $\mu\text{m}$**
- Transvasement avec seringue sans caoutchouc (contamination Zn)
  - Répartis dans deux aliquots : **anions et cations**
- Aliquot cations : **acidification *in situ*** (pour limiter adsorption) par addition acide nitrique ultra pur
- Conserver l'échantillon au frais, analyser rapidement







## ❑ *Purge-pompage :*

- Avantages :
  - Empreinte du SM **plus marquée** (meilleur traçage)
  - Possibilité d'utiliser les paramètres pH, Eh, Cond, T
- Inconvénients : interférences hydrauliques incontrôlées, **risque de mélanges d'eaux artificiels** (p.ex., dilution) générés par le pompage

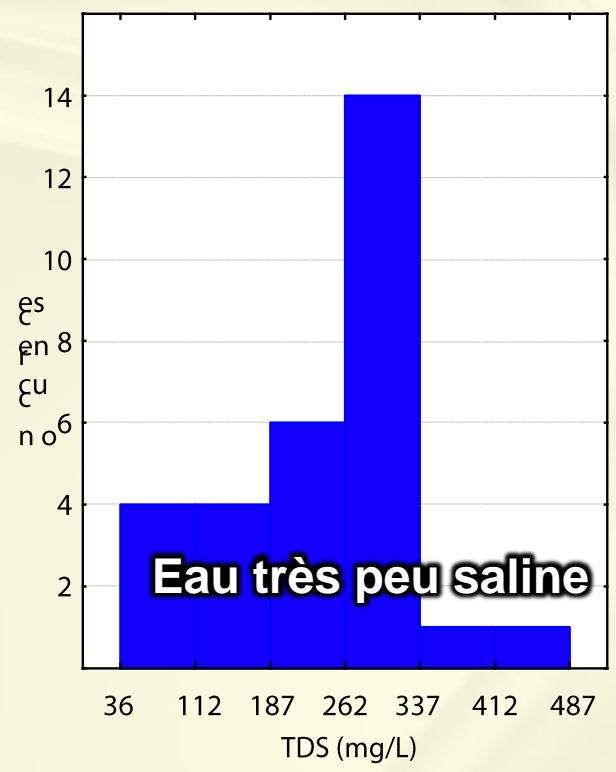
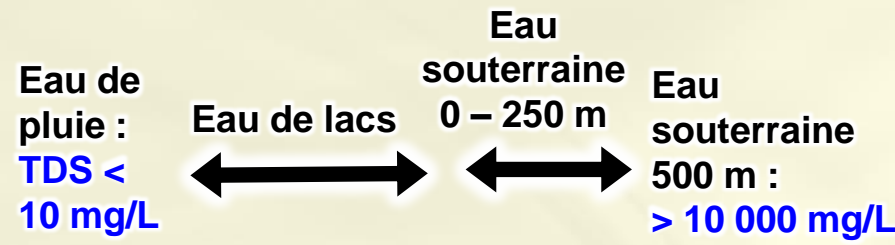
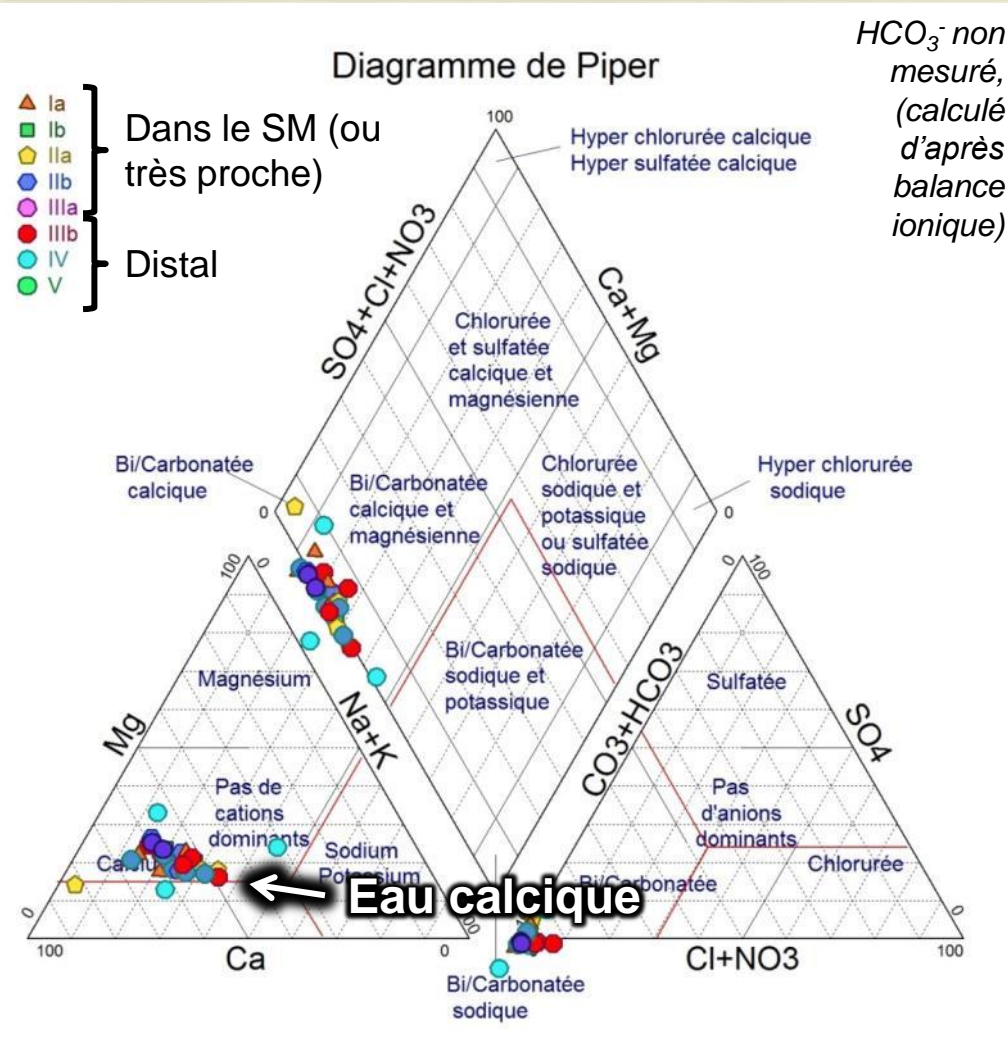
## ❑ *Bailer :*

- Avantages : mise en œuvre plus simple, levé plus rapide
  - Inconvénients :
    - Source d'incertitude due au **rééquilibrage avec CO2 atmosphérique** après extraction du bailer
    - pH, Eh, Cond, T inutilisables
- ➔ **Perfectible**
- Pas de biais ou contamination (limaille d'acier, eau stagnante tubage)



## Influence des facteurs hydrogéologiques

- Type d'aquifère
- Facies hydraulique
- Influence du temps de résidence de l'eau



→ **Eau très peu saline, de type Ca-(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)**  
 = signature d'une eau de recharge (faible temps de résidence) diluée  
 Confirme le modèle d'écoulement : till carbonaté + dilution par eau du lac de rampe  
 → Explique pourquoi bcp analyses sous LD



**En contexte du Bouclier canadien (Manitoba), temps de résidence approximatifs (isotopie stable, Gascoyne, 2004)**

**- Granulaire 0 – 20 m : 0 – 100 années**

**- Socle : 0 – 200 m : 0 – 100 années**

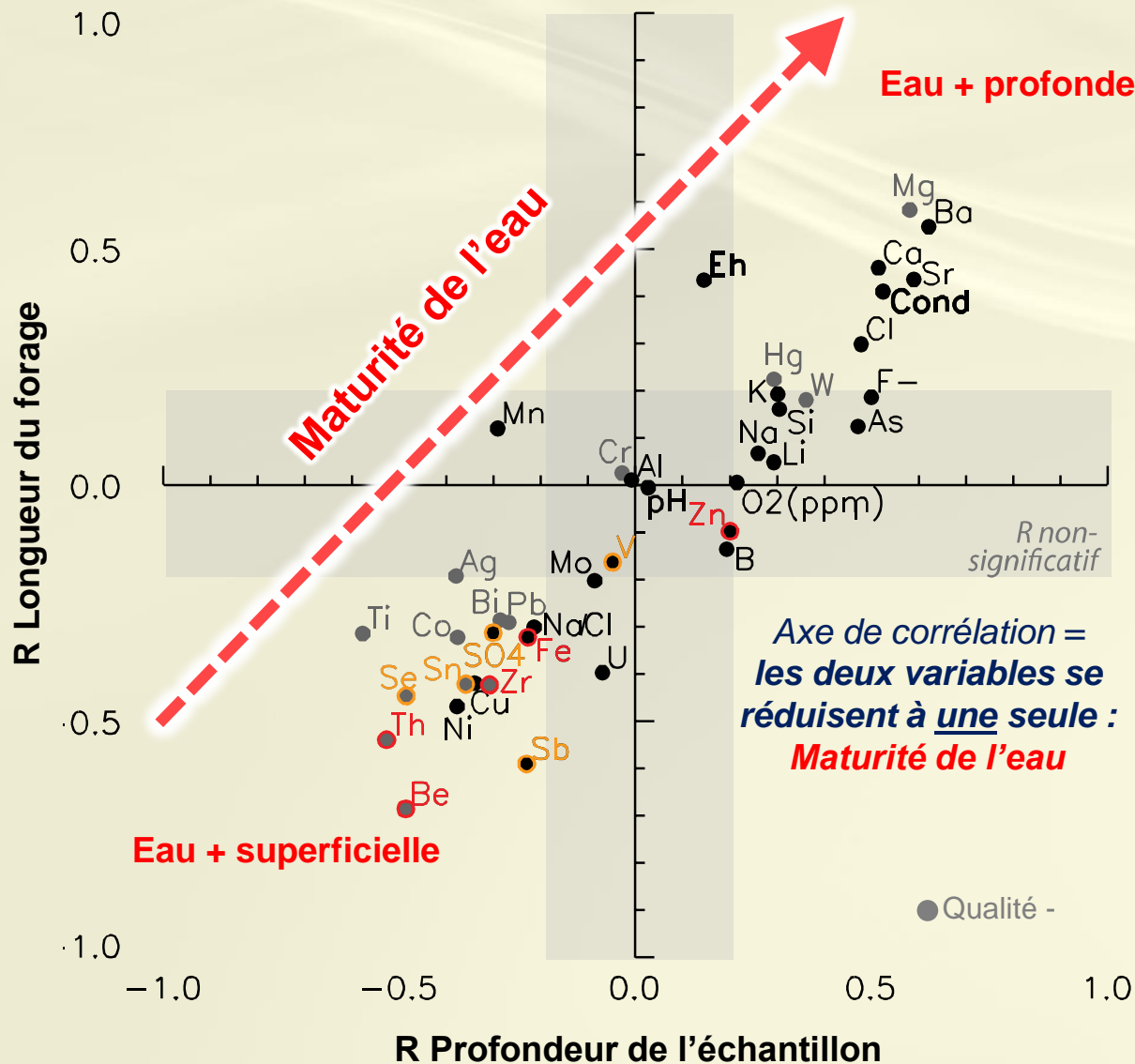
**200 – 300 m : 100 - 1000 années**

**300 – 400 m : 1000 - 10<sup>5</sup> années**

**> 400 m : > 10<sup>5</sup> années**

- La composition chimique de l'eau évolue avec le temps de résidence, c.à.d. la profondeur
- Influence de la profondeur de l'échantillon sur l'empreinte du sulfure massif ?

Ech bailer seulement ; n = 25



- Pôle **eau mature** : salinité (cond +), Ca, Ba, Mg, Sr, Cl
- Pôle **eau immature** : Be, Th, Ni, Sn Cu, Se, Pb, Zr, Co



# Empreinte du sulfure massif vs maturation de l'eau

Alignement = biais échantillonnage :  
 SM est davantage intercepté proche de la surface

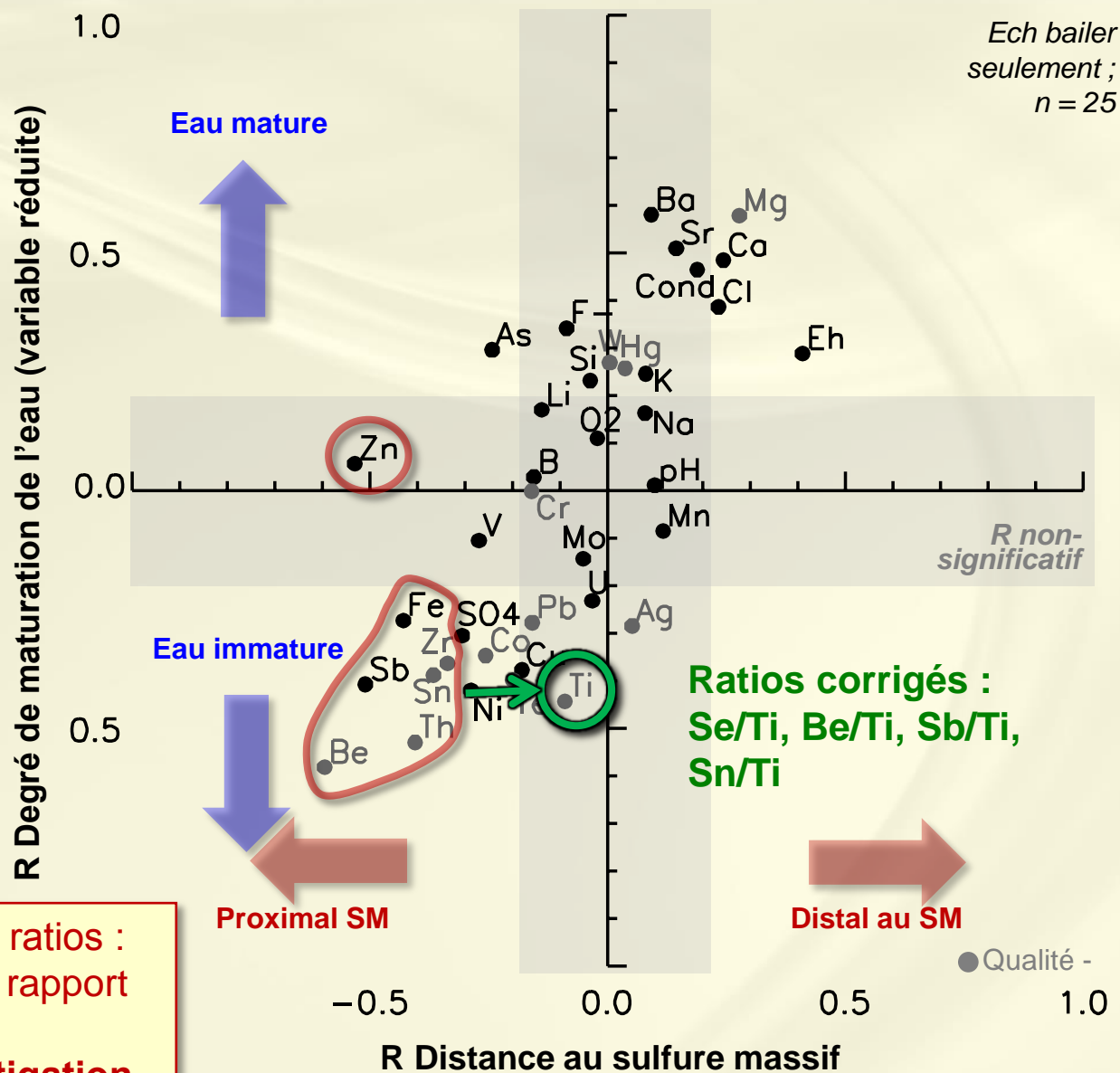
**Zn : marqueur brut du sulfure massif**

**Be, Sb, Sn, Fe, Th, Sn : plus délicats... car ils sont enrichis proche du SM et en profondeur**  
 → Correction par ratios.

Possible proxy pour profond (non-influencés par le SM) :

Ti, ok, très immobile, mais qualité médiocre

Rehaussement d'anomalies par ratios : calcul des valeurs en excès par rapport au degré de maturité de l'eau  
 → requiert davantage d'investigation



**Éléments fortement  
influencés par le  
protocole**

*→ On retrouve  
plusieurs  
pathfinders...*

Élément	RPearson	Élément	RPearson
Sn	-0.35	Cl	0.50
Zn	-0.28	Th	0.51
Ni	-0.27	V	0.54
Cu	-0.20	Hg	0.57
Cr	-0.08	W	0.58
Te	-0.08	Mo	0.59
Pb	0.00	Ti	0.60
Co	0.08	Zr	0.61
SO4	0.08	F-	0.79
Be	0.21	K	0.84
B	0.29	Ca	0.87
As	0.30	Si	0.87
U	0.33	Na	0.91
Fe	0.35	Mg	0.93
Mn	0.41	Li	0.94
Sb	0.47	Sr	0.95
		Ba	0.99

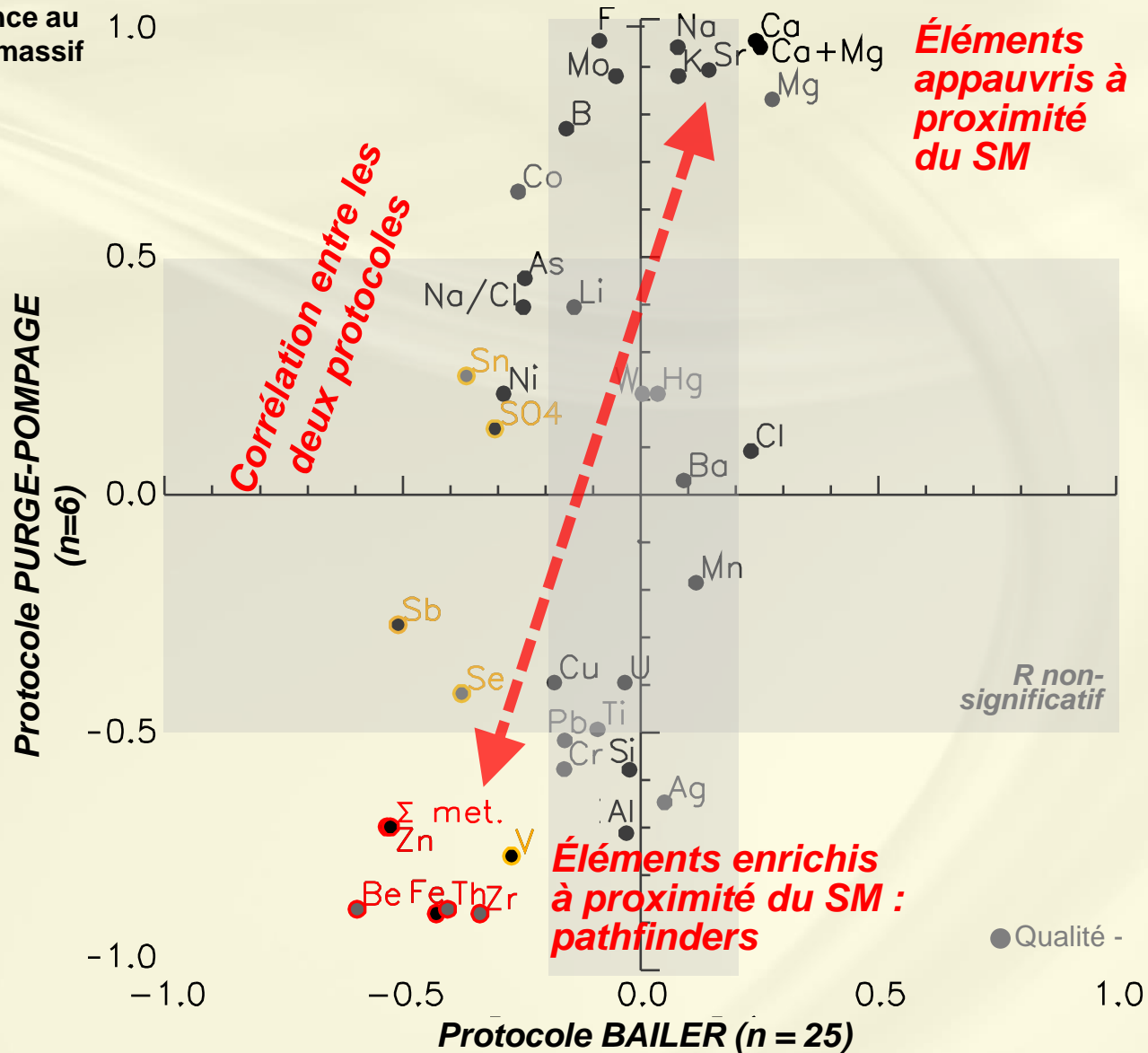


**Rappel :** data *bailer* (25 ech) et *pompage* (6 ech) = deux jeux de données indépendants

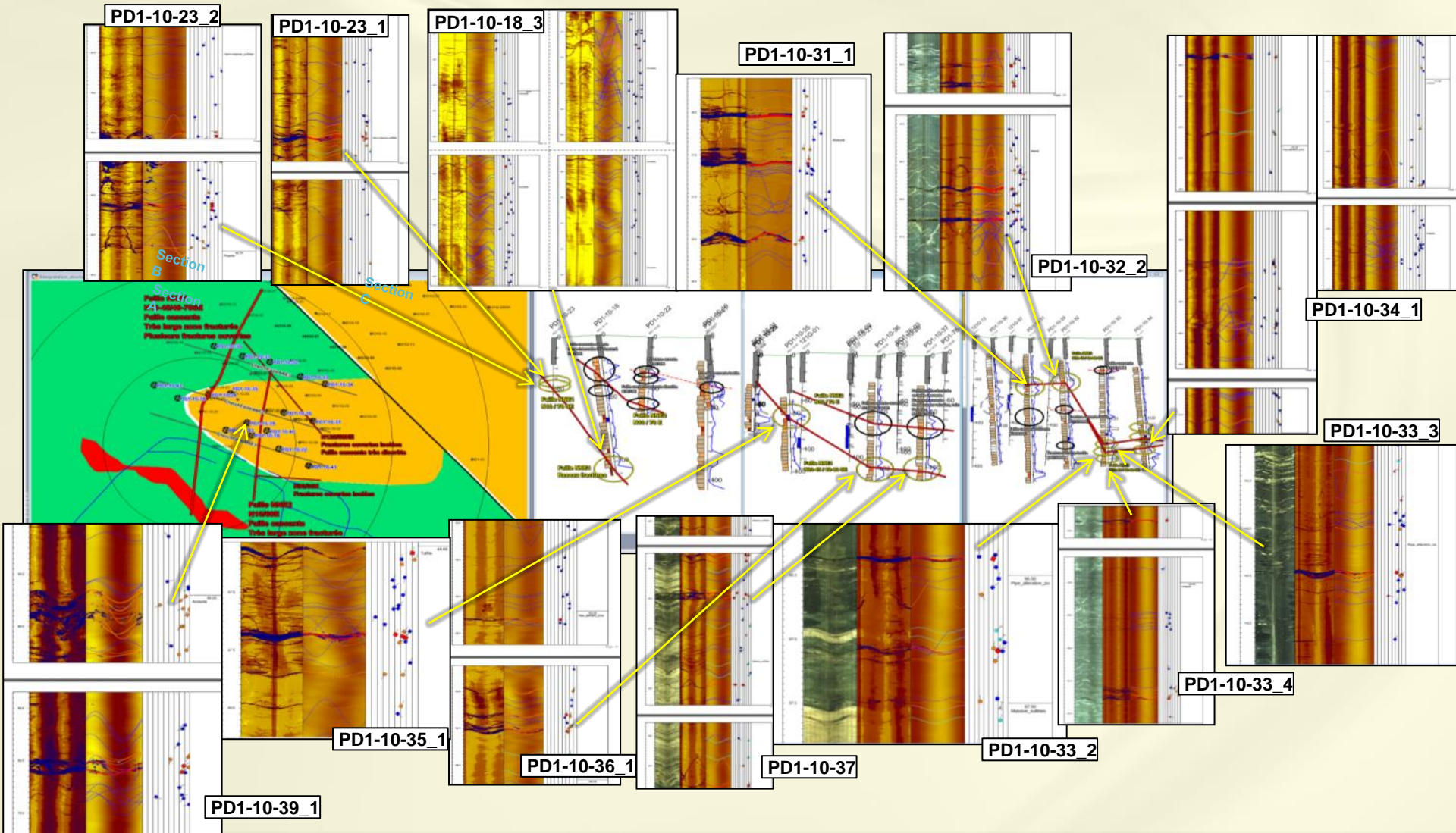
**Pathfinders bruts coincidents :**  
Zn, Fe, Be, V, (Th, Zr)

**Pathfinders seulement Bailer**  
Sb, Sn, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Se

R Distance au sulfure massif



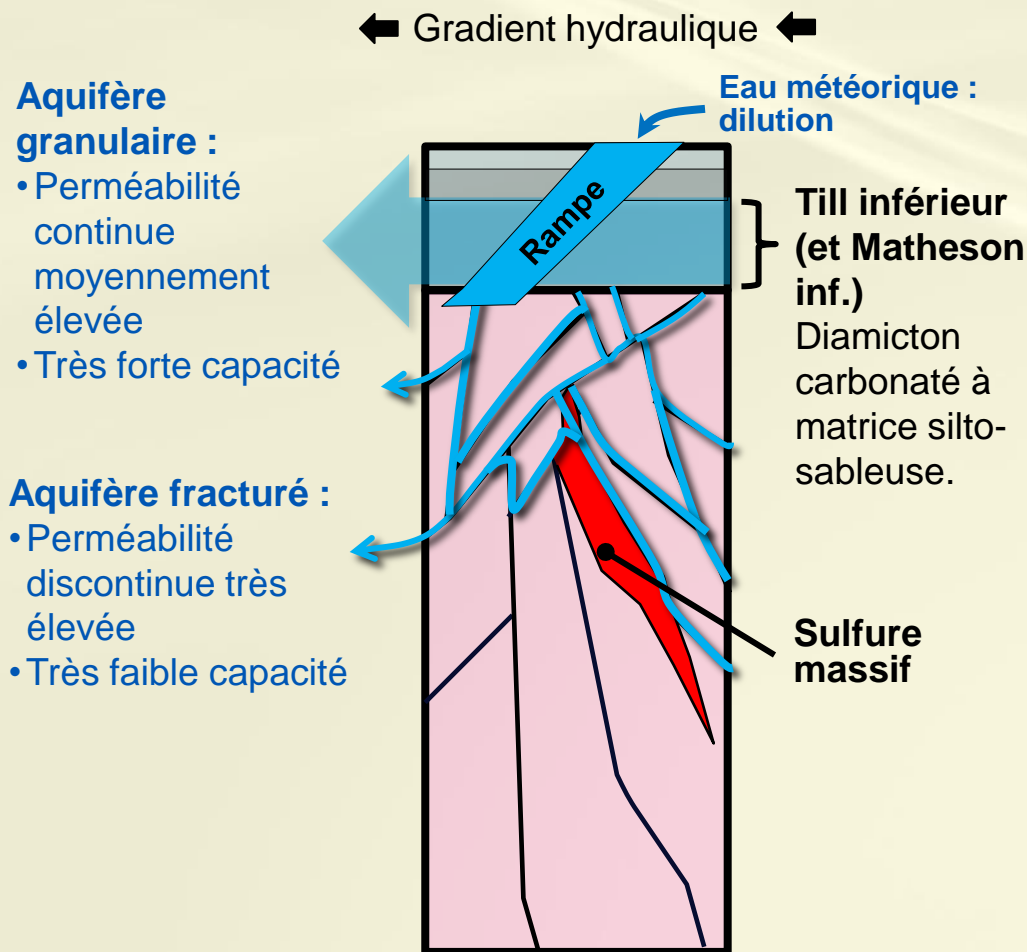
Televiewer : analyse du réseau de fractures contrôlant la géométrie des écoulements



## **CONSOREM-UQAC-GLENCORE avec partenariat Maxxam - Laforest Nova Aqua**

1. **Pôle Hydrogéochimie de l'UQAC** : matériel (sondes, pompes etc.), personnel hautement qualifié (Julien Walter) pour assurer l'opération du levé
2. **Le chercheur du CONSOREM est aussi un spécialiste en hydrogéologie**, actif en recherche sur les aquifères de socle
3. **Collaboration exceptionnelle de GLENCORE** :
  - Mise à disposition d'une de ses propriétés du camp de Matagami contenant un gîte très bien défini mais non exploité
  - **Prise en charge de la préparation de terrain** : vérification des accès, recherche des casings anciens, arpentage des trous, mesure des niveaux d'eau statiques
  - **Prise en charge logistique sur place** : intendance, transport en ARGO
4. **Plusieurs partenariats** : **Maxxam** (laboratoire d'analyse), **Laforest Nova Aqua** (bureau d'étude en Hydrogéologie-Environnement) → matériel (Bailer)





- **Grande homogénéité de la charge**, pas de compartimentation hydraulique (barrières hydrauliques)
- **Connecté à un réservoir externe très capacitif**
- Confirmé par la **très bonne productivité des puits pompés** : très peu de rabattements → fort apport en eau
- Dans le socle : écoulement sont discrets, ségrégué dans les fractures ouvertes
- Dilution par eau météorique (rampe)