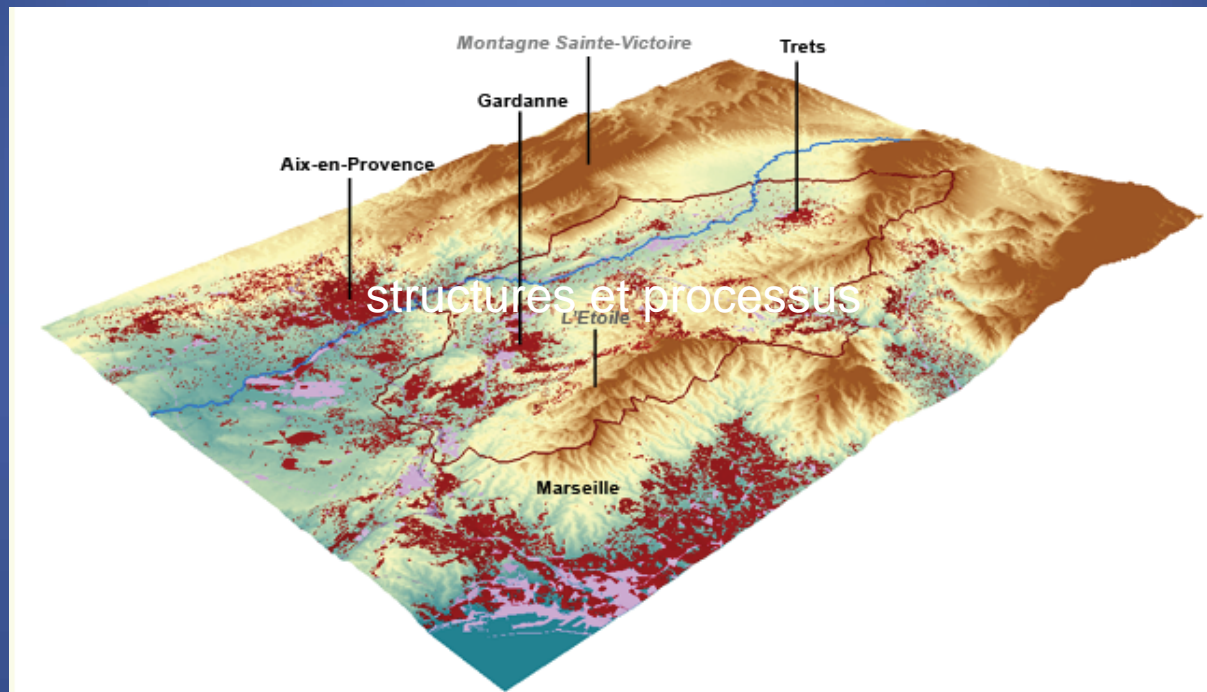




# Caractérisation géophysique des terrils du Bassin minier de Provence: structures et processus.



P.-E. Mathé, J.-C. Parisot, D. Hermitte, C. Keller  
et les étudiants



Forts tonnages de stériles et déchets très divers  
en terrils à ciel ouvert

Dimensions et âges différents

Disséminés dans le paysage, urbain ou rural  
(végétalisation, sols urbains)

Contextes géomorphologiques et hydrogéologiques variés

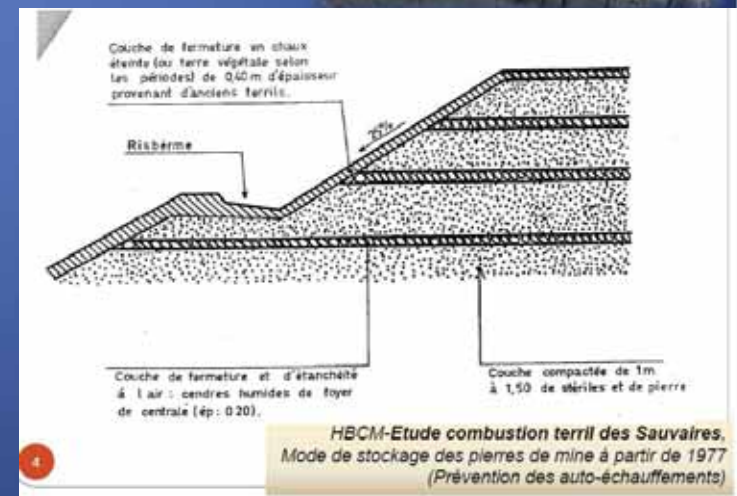
Tas, Fond de vallon, Appuyés à un relief  
Ruissellement, Proximité des aquifères

Problématique OHM:

Aménagement et valorisation de ces espaces

Aléas : déqualification eau, dispersion ETM (As),  
dégradation lignite (complexation, HAP)  
autocombustion  
instabilité mécanique

Aménagements BRGM (Drains, géomenbranes)  
depuis 1977:





# Synclinal du Bassin de l'ARC



Trias et Jurassique  
marin

Assises et  
chevauchements  
Chaînes de l'Etoile,  
Montagne Ste  
Victoire

Séries fluvio-lacustres  
Valdofuvélien (75Ma)  
à Lutétien (48 Ma)

Alternances:  
Argilites rouges et  
grés

Calcaires lacustres à  
palustres

Grande diversité roches et minéraux primaires ou secondaires:

« Flamboyant de provence »: Lignite (4% soufre et As-Pyrite) du Valdo-Fuvélien (campanien)

Sté des mines de Gardanne

Gypse, calcaires, grés, marins ou continentaux (Plâtre, ciment, chaux, béton) Lafarge

Argiles (Kaolinite épigénisée hématite) (remblais BRGM)

(bauxite, Pechiney)

Etagement de l'exploitation de 1744 à 2003 (*exploitations privées depuis 1230*)

# Principes et méthodes de la prospection géophysique

Méthodes électriques : Tomographie de résistivité électrique (TRE)  
Polarisation spontanée (PS)

Méthodes magnétiques : Magnétométrie (Champ total et gradient)

Magnétisme des roches : susceptibilité (K)

Applications :

Géométrie des structures : Terril des Sauvaires et St Pierre

Altération, suivi hydrogéologique pluriannuel : Terril St Pierre et Germain

Pyrométamorphisme: Terril St Pierre et Germain

Géochimie (sol, eau) et minéralogie à l'appui

Conclusions

Perspectives

# La tomographie de résistivité électrique (TRE)

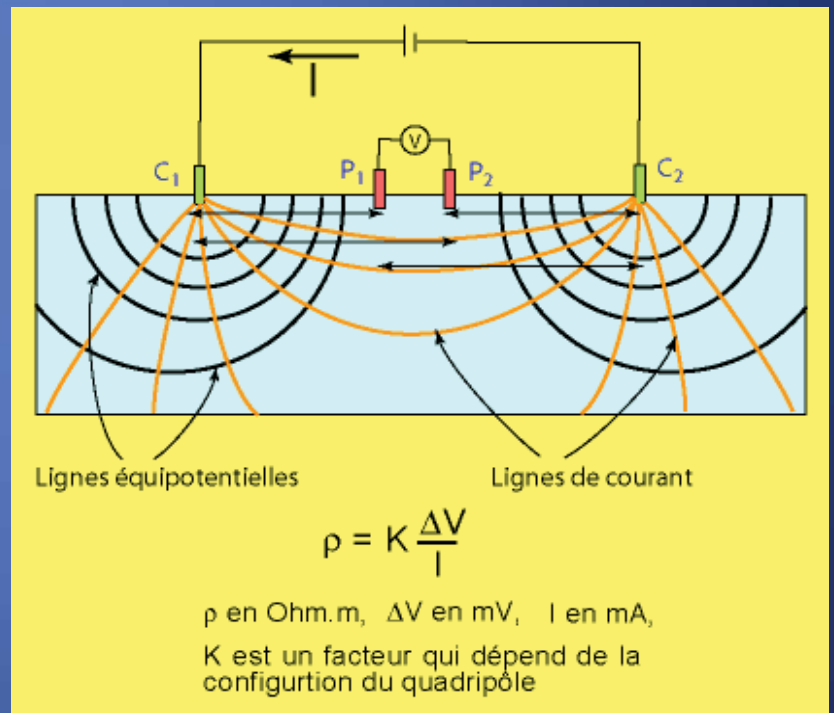
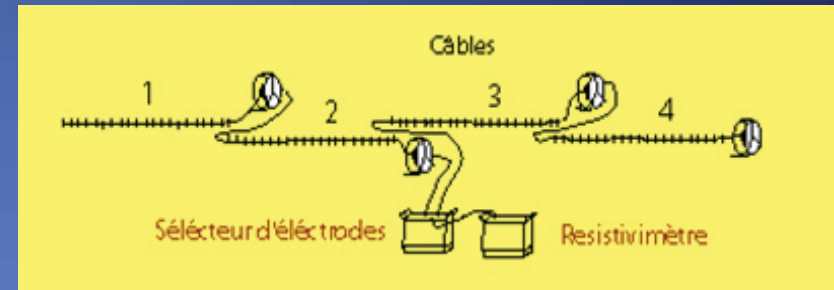
Obtention d'une image "géoélectrique" 2D verticale du sous sol :  
localisation et identification des objets enfouis

Dispositif

Basée sur la loi d'ohm

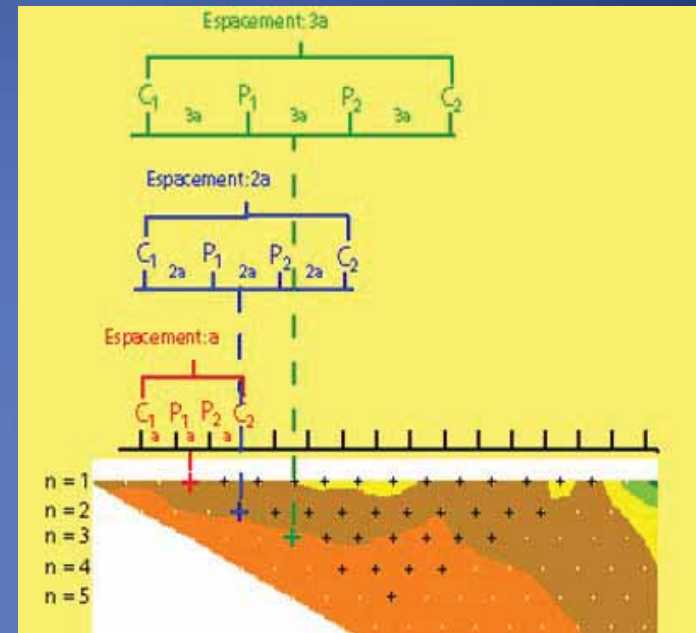
Configuration Wenner-Schlumberger inversée:  
 $\rho a = 2\pi a \Delta V / I$  ( $\Omega \cdot m$ )

Indirecte, comme toutes les méthodes géophysiques: **mesure** DDP intègre tous les matériaux traversés par le courant pour un écartement d'électrode donné, équivalents d'un milieu homogène et isotrope



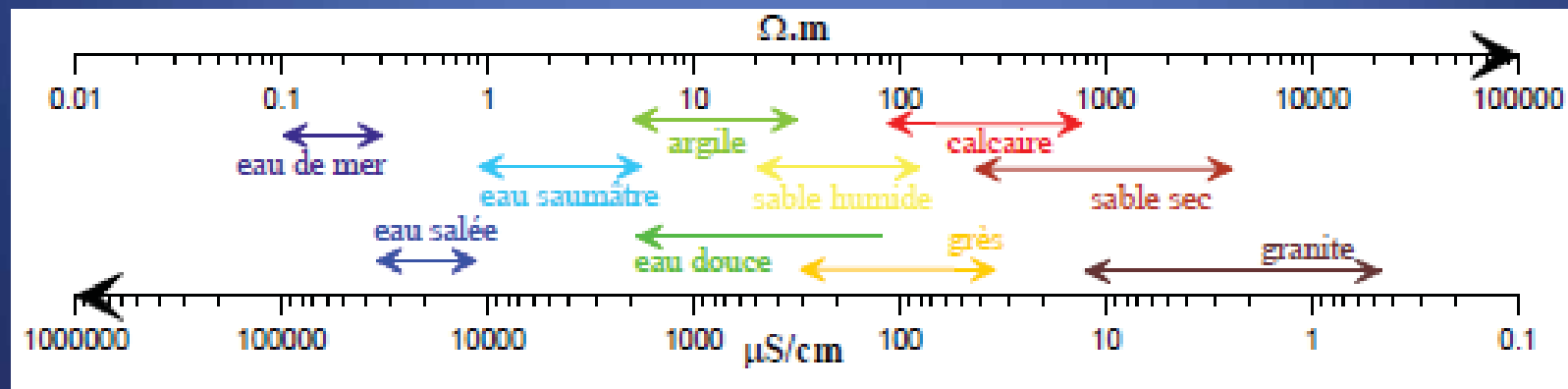
# La tomographie de résistivité électrique (TRE)

Traitement : inversion Res2DINV  
Interpolation par itération : à chaque pas, la robustesse entre pseudosections calculée (modèle direct) et observée (mesures réelles) estimée par un résidu.



Quelques contraintes :

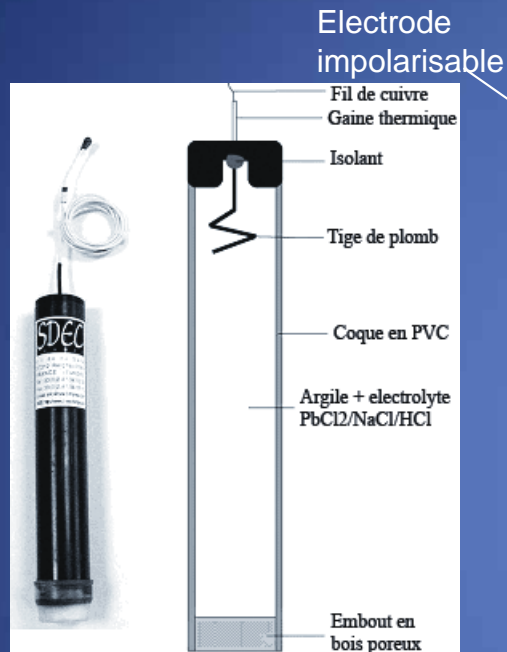
- taille vs profondeur: protocole,
- contrastes "géoélectriques" des matériaux constituant le milieu analysé
- Saturation en eau chargée (conductivité inverse de la résistivité)



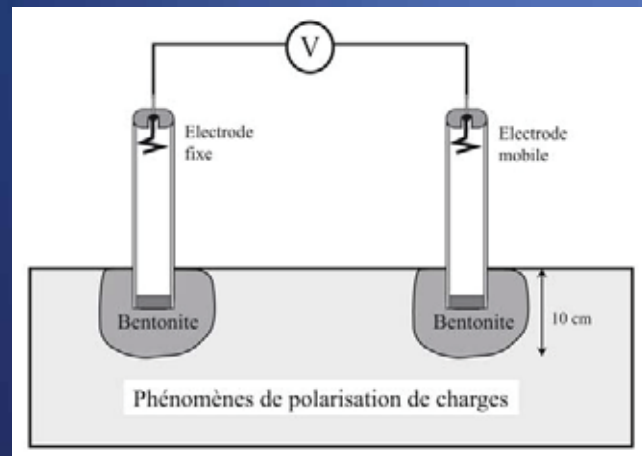


# Le Potentiel Spontané

Mesure passive d'un courant naturel du sous-sol



Multimètre à haute impédance



# Le Potentiel Spontané (PS)

Mécanismes passifs de polarisation de charges en sous-sol

Circulation des fluides

Molécule d'eau

Potentiel d'électrofiltration  
 Gradient d'écoulement  
 Transport des ions aqueux  
 Courant d'origine électrocinétique

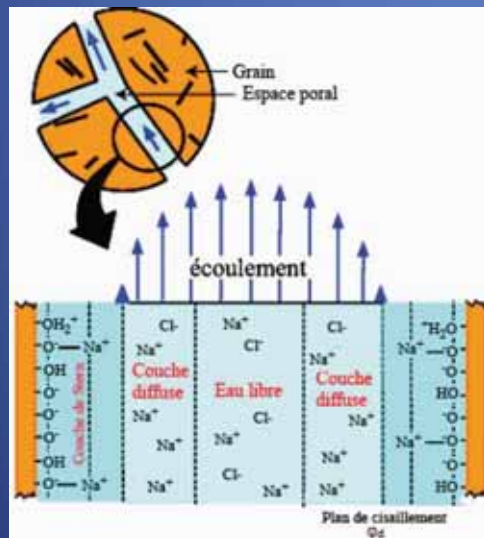
Gradient de potentiel chimique

Ions

Potentiel d'électrodifusion  
 Gradient chimique  
 Différentiel de mobilité C+/A-  
 Gradient de charges électrolytique : courant net

Electrons

Potentiel électro-redox  
 Transfert des électrons des couples rédox entre zones d'Eh différent assuré par un corps conducteur



50-100mV

Source principale du PS

15mV

Sensible à CEC argiles

> 50mV à >100 mV

fronts rédox -métallogénie



# Anomalies de champ magnétique total

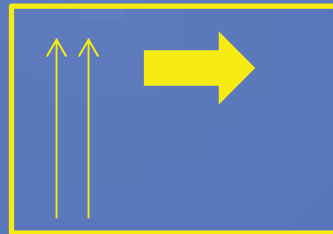
Tout objet soumis au champ magnétique terrestre  $H$  acquiert une aimantation induite  $M$  colinéaire  
L'objet alors assimilable à un dipôle

Anomalie  $T$  : somme vectorielle de la direction locale  $H$  et du dipôle : + au pôle – (et inversement)

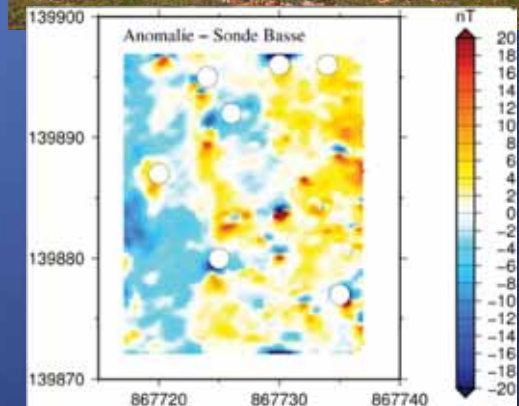
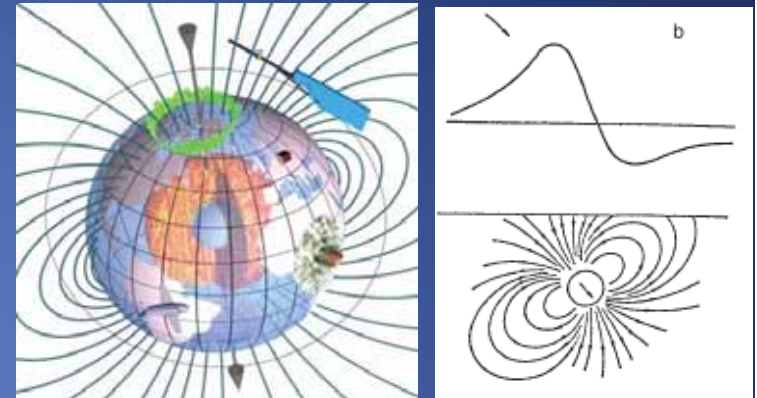
Intensité  $T$ : volume, distance,  $K$  susceptibilité :  $M=K.H$ ;

$K$  mesure [minéraux magnétiques] et la nature du minéral  
 $K$  magnétite:  $3 \text{ SI}$ , Khématite, goethite:  $10^{-3} \text{ SI}$ ;  $K$  argiles= $10^{-6} \text{ SI}$ ,  
 $K$  calcite, quartz, Kaol= $-10^{-6} \text{ SI}$

Instrument : magnétomètre portable mesurant la valeur algébrique



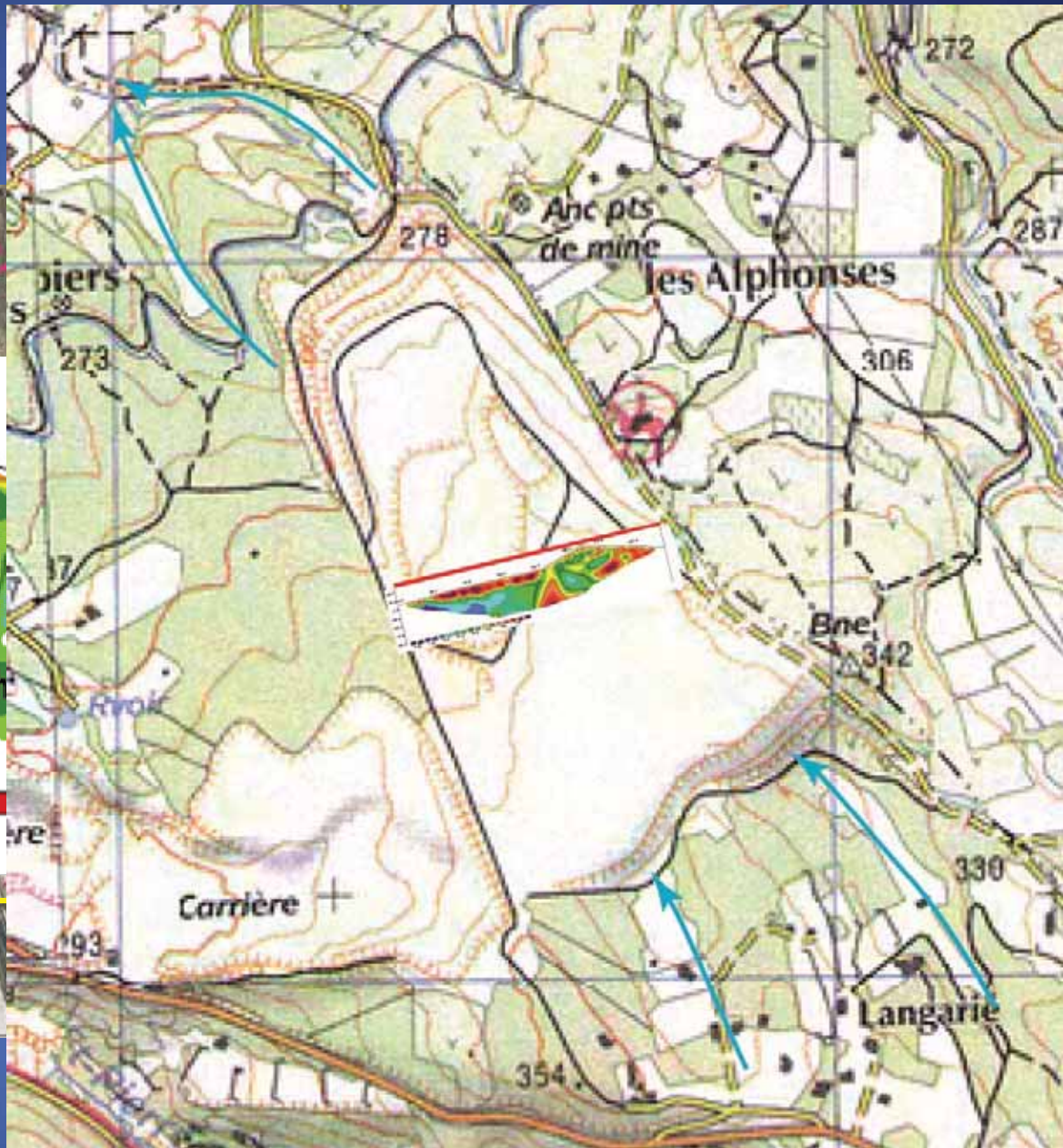
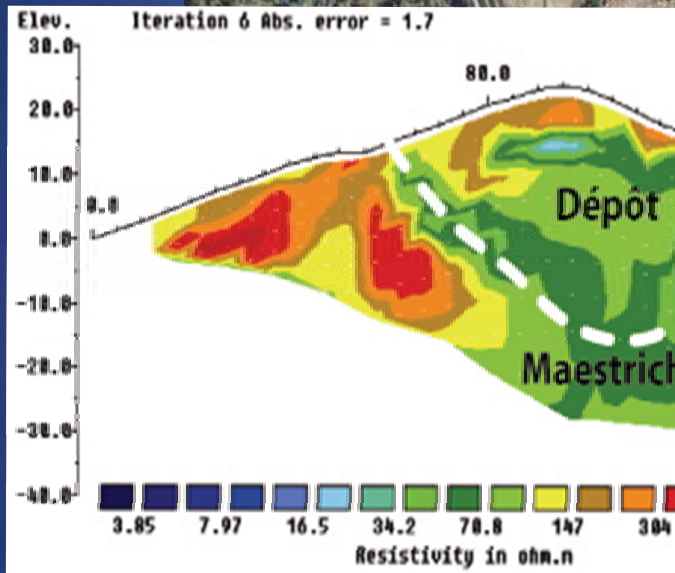
- Acquisition sur le terrain
  - mesures en continu (10Hz) sur profils isolés/parallèles
- Post-acquisition
  - correction/retrait de mesures anormales/inutiles
  - filtrages et interpolation --> carte
  - modélisation --> interprétation
- Contraintes : bruit magnétique ambiant, variation diurne, espacement adapté, différence de  $K$  objet encaissant



# Les Sauvaires



E



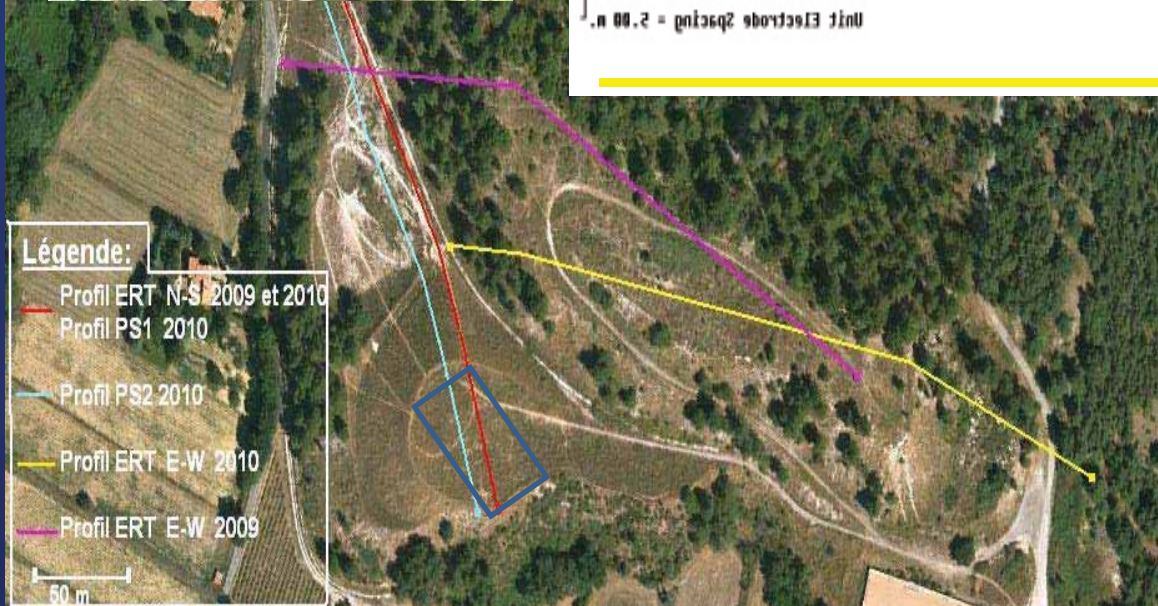
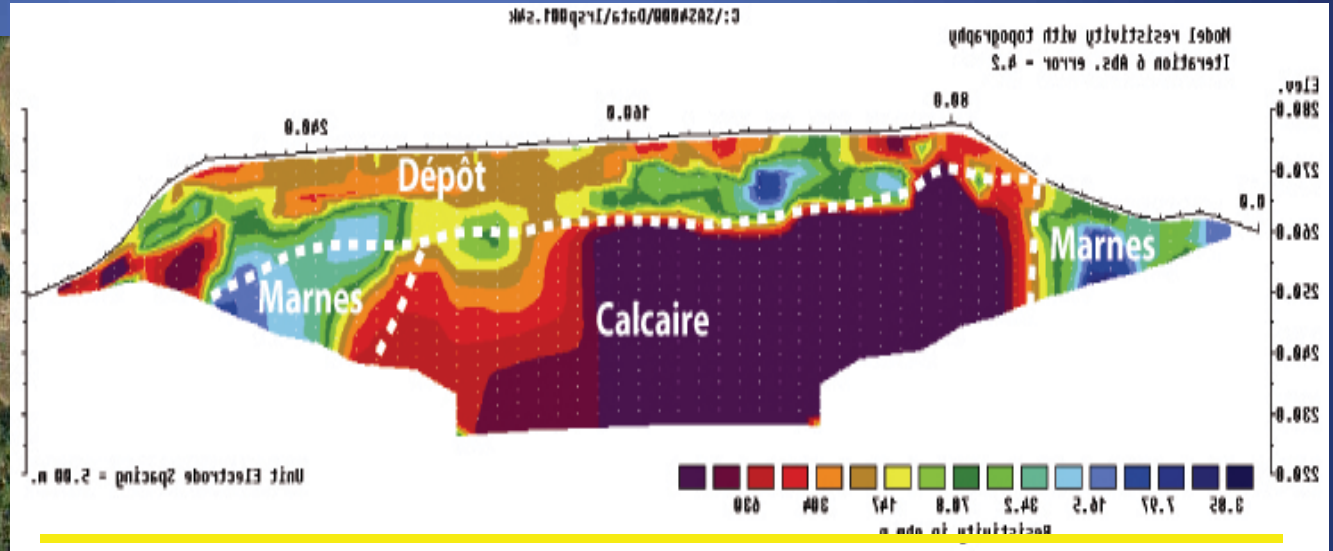
Comblement de vallée :  
Dépôts discordants sur alternance argilites/calcaires,  
hétérogènes par parties (périodes d'aménagement)



# Terril St Pierre



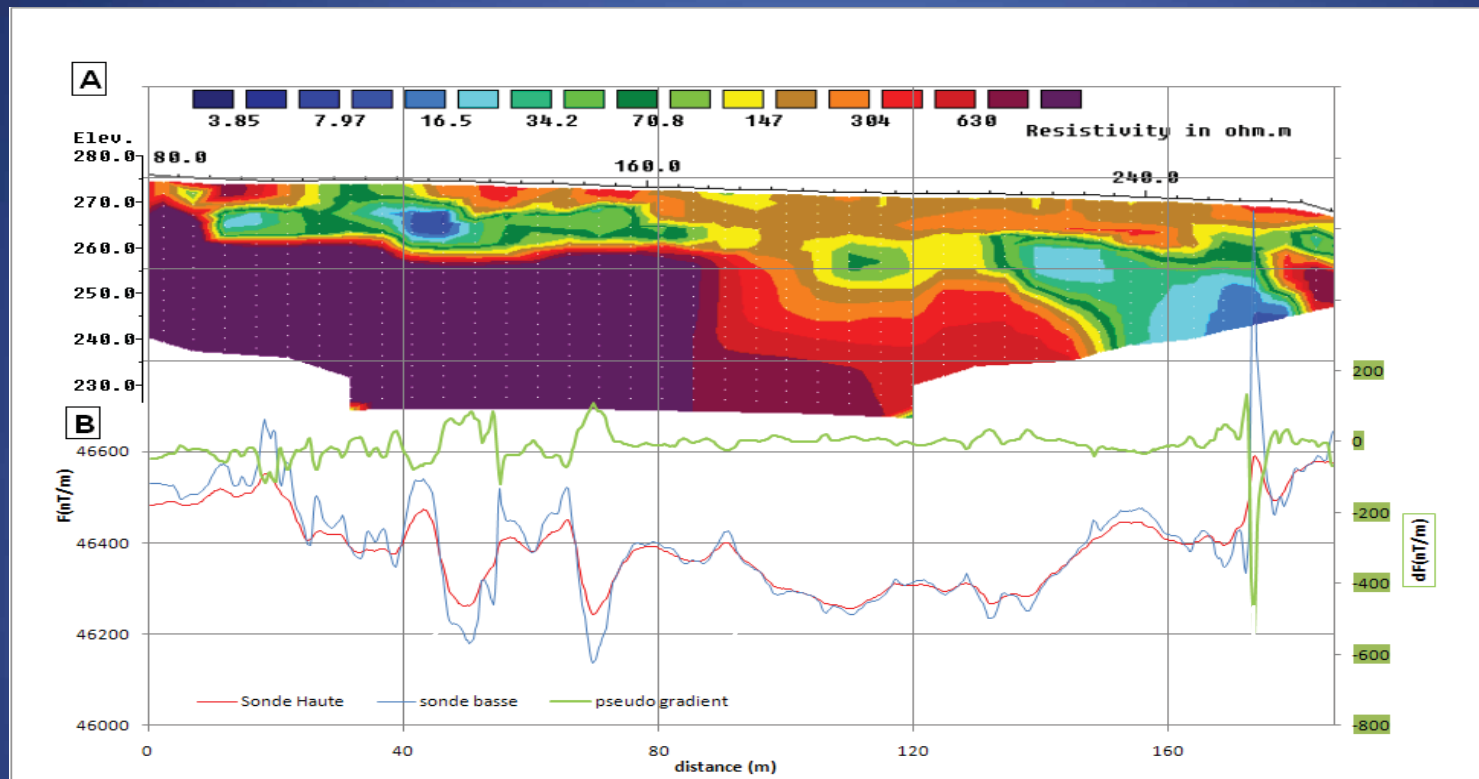
Flanc W de la colline des Frères  
 Dépôts de la fin du XIX<sup>ème</sup> à 1970, aménagés.



Profil TRE:  
 Adossement aux reliefs  
 (pendages conformes)  
 Dépôts hétérogènes



# Profils magnétiques



1: courtes  $\lambda$  ( $\sim 1$ m), forte intensité  $\sim 100^e$  nT, fort gradient : superficiels objets métalliques, canalisation

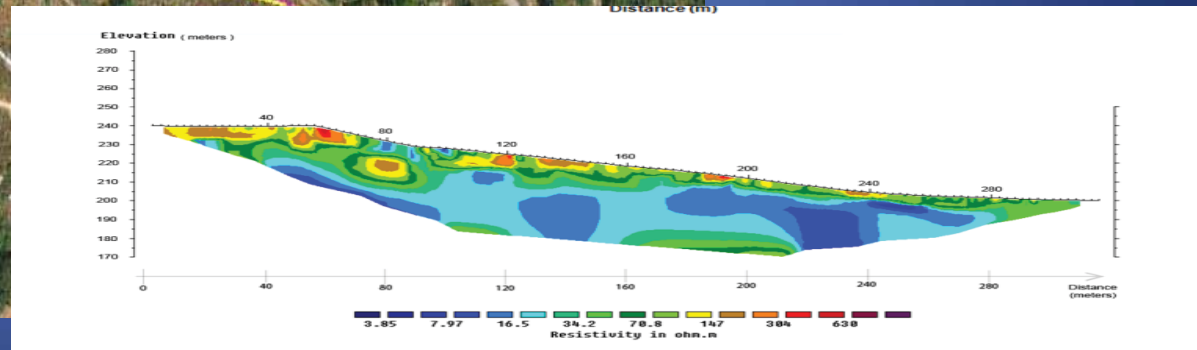
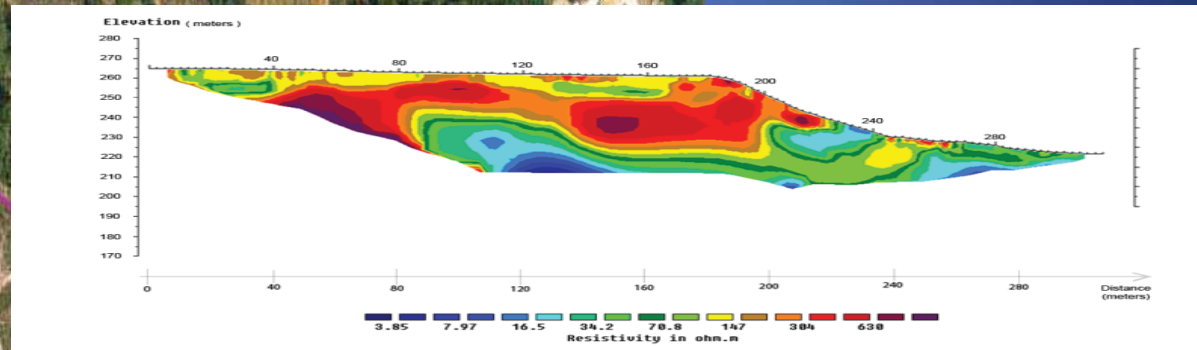
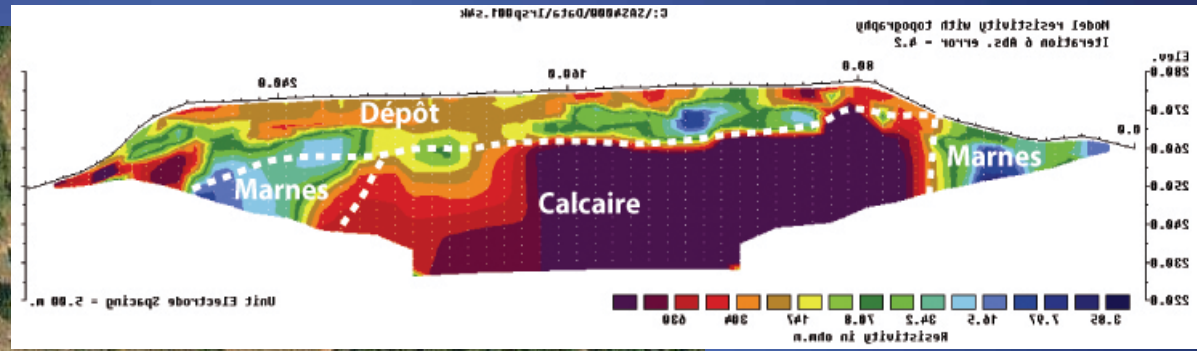
2: grande  $\lambda$  et gradient faible : profond et peu magnétique: substratum calcaire

3: signaux intermédiaires : hétérogénéité magnétique des dépôts: paléofoyers?

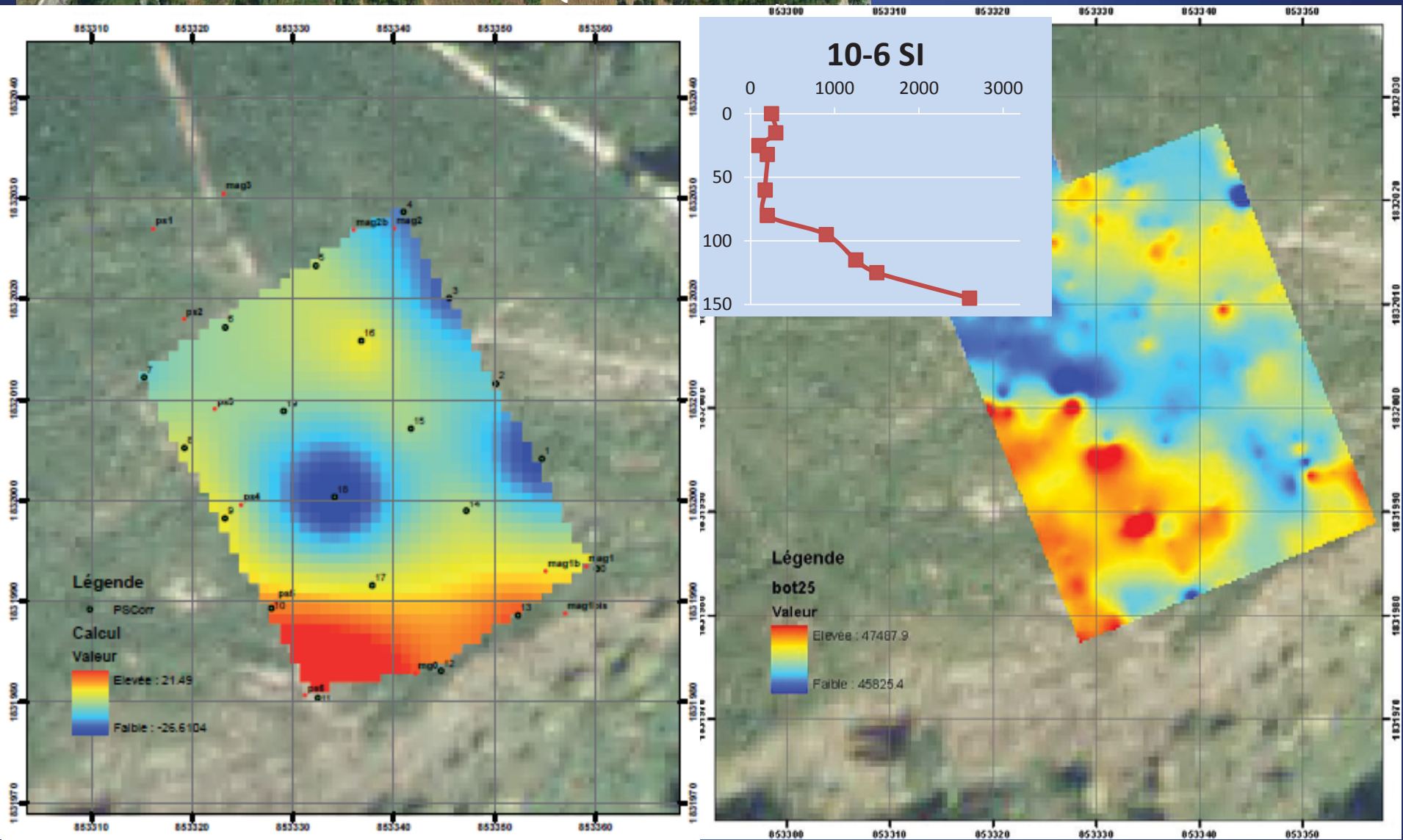
# Géométrie de nappe, suivi hydrogéologique : Terril St Pierre



- Légende:**
- Profil ERT N-S 2009 et 2010
  - Profil PS1 2010
  - Profil PS2 2010
  - Profil ERT E-W 2010
  - Profil ERT E-W 2009
- 50 m



# ANOMALIES MAGNÉTIQUES

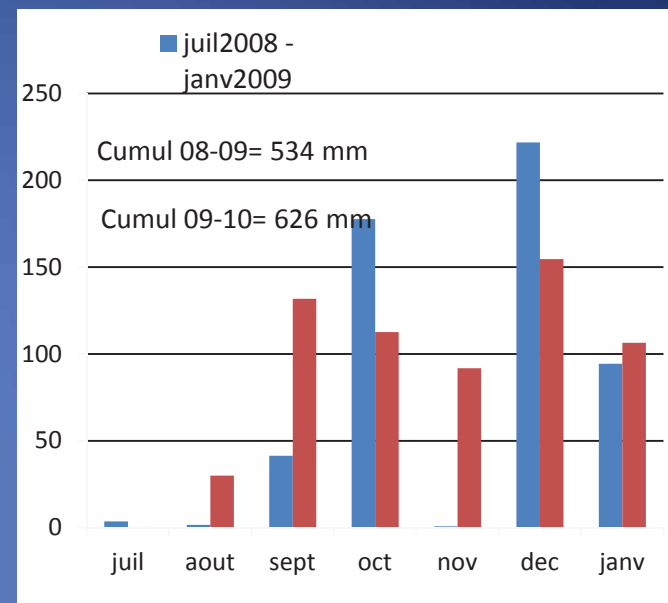
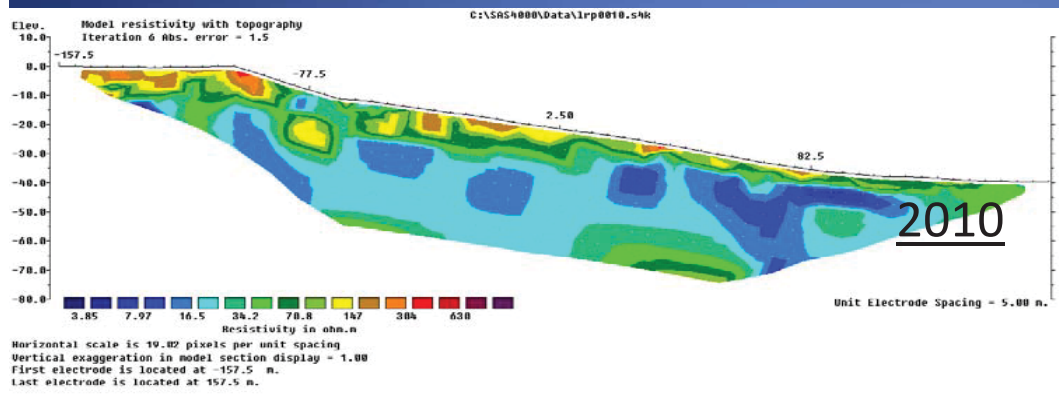
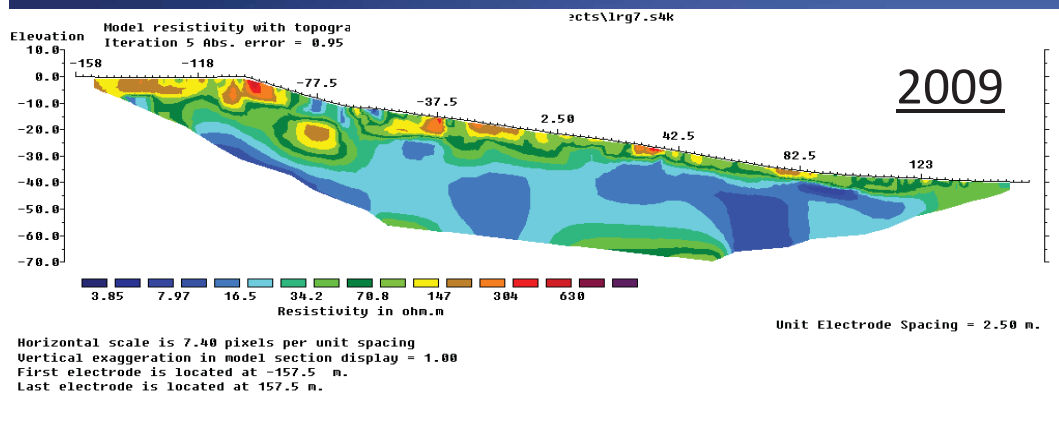


Anomalies PS 40 mV

Ecoulements aux interfaces

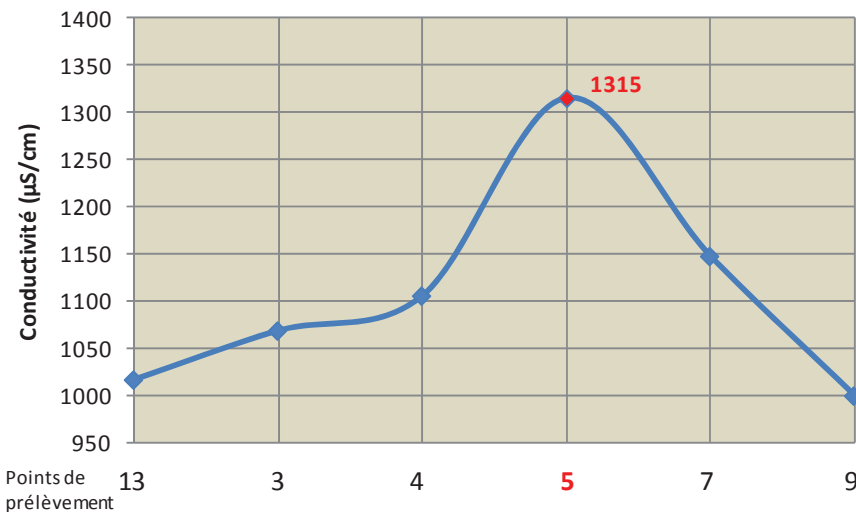
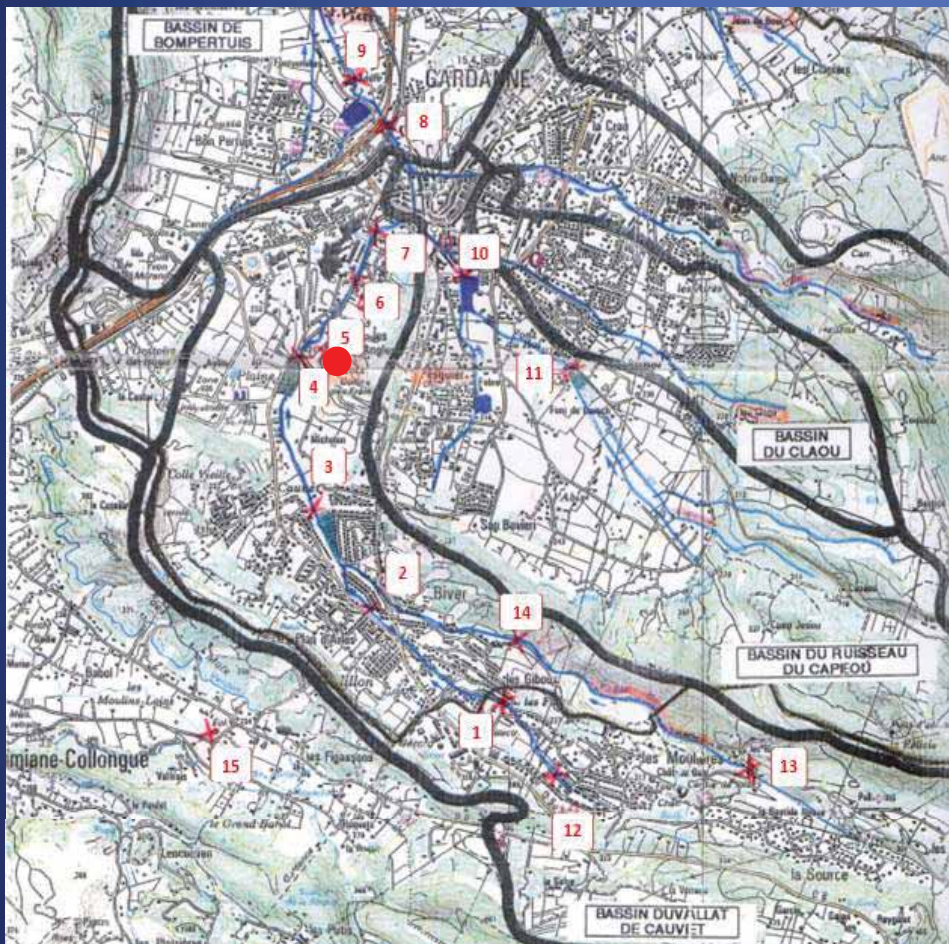


# Suivi hydrogéologique TRE



Variabilité cohérente avec la différence de pluviométrie annuelle

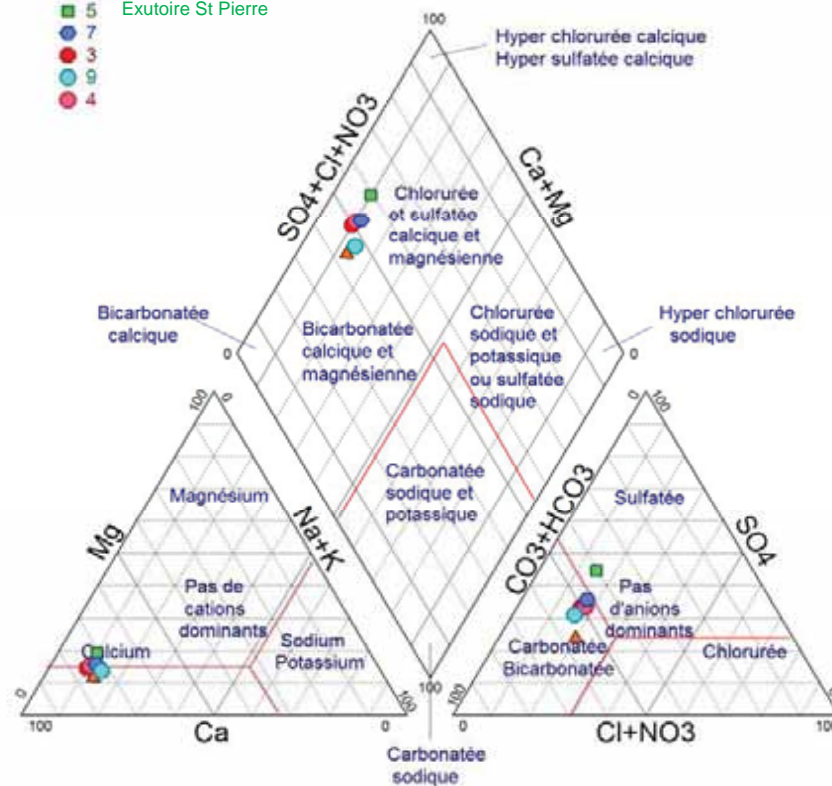
# Hydrochimie exutoire St Pierre (Luynes)



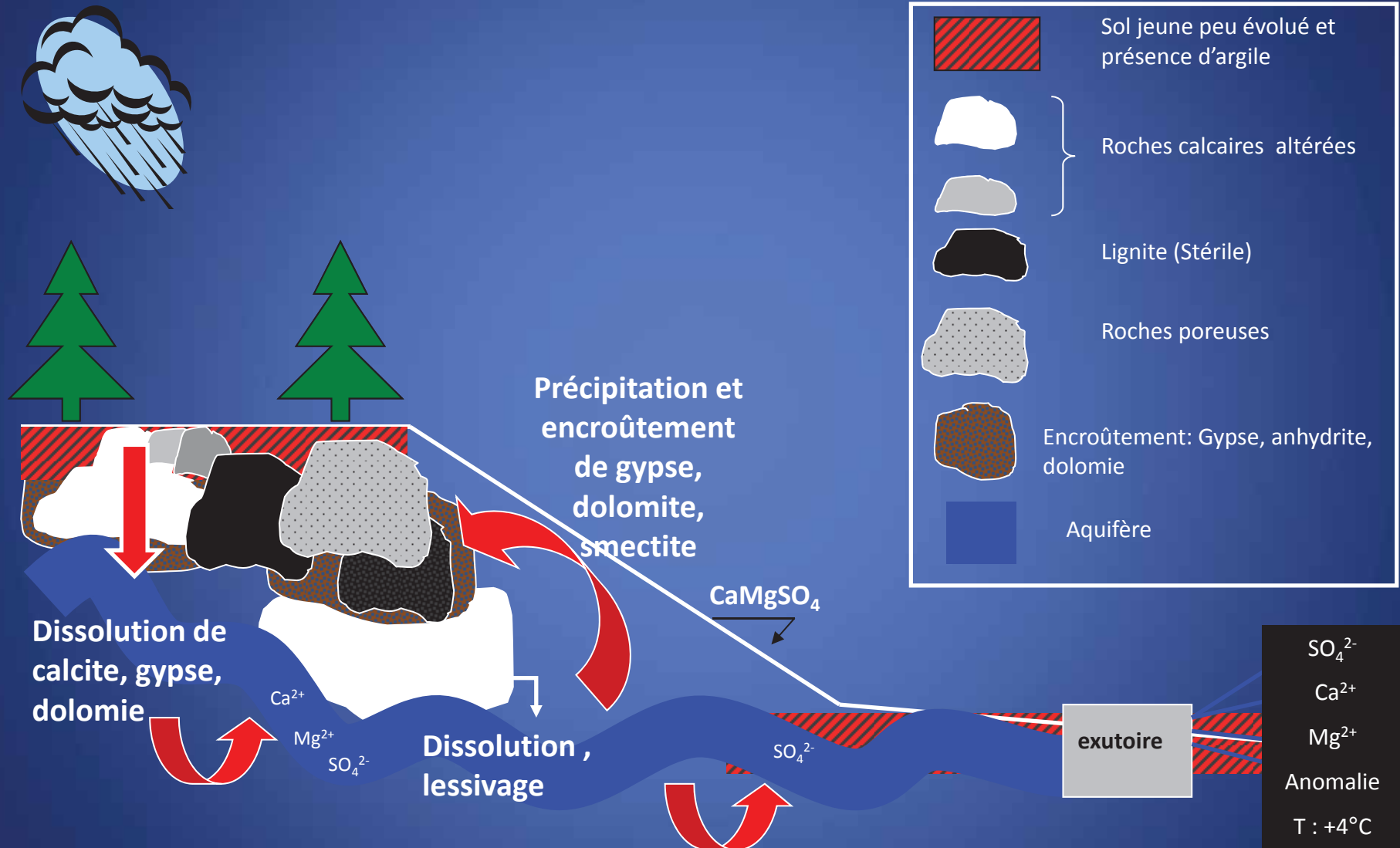
Points de prélèvement: 13, 3, 4, 5, 7, 9  
 AMONT, EXUTOIRE, AVAL

Campagne 2009

- ▲ 13 Bassin versant Amont
- 5 Exutoire St Pierre
- 7
- 3
- 9
- 4



# En résumé:





# Terril Germain



Fosse pédo GM1:  
Redoublement  
d'horizon

## Historique:

1839-1939 : exploitation du Puits Germain,  
vente d'une part de la production aux usines Lafarge en 1924  
(cimenteries à proximités)

## Géologie:

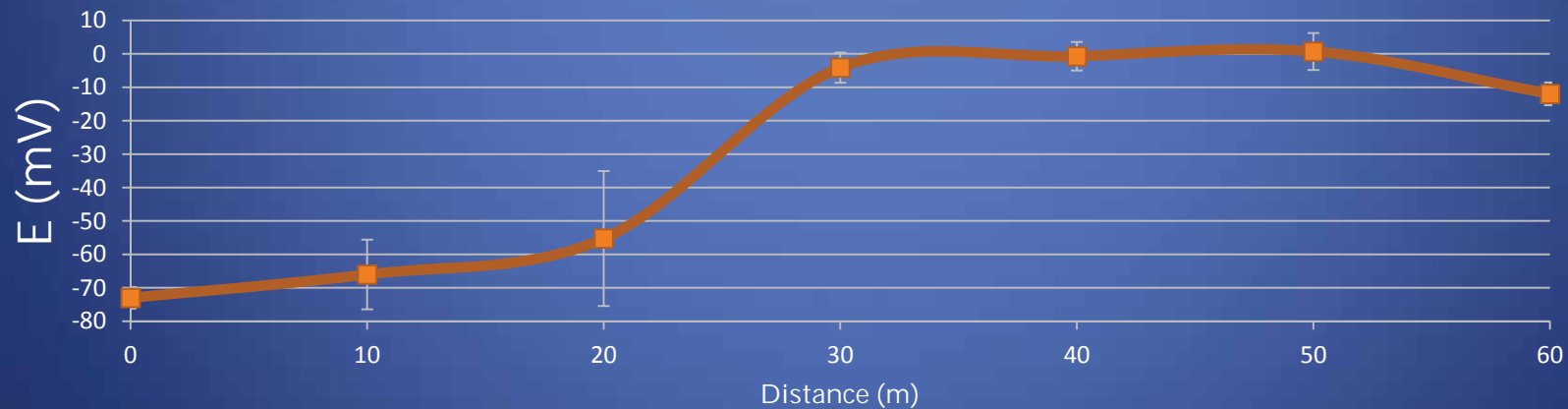
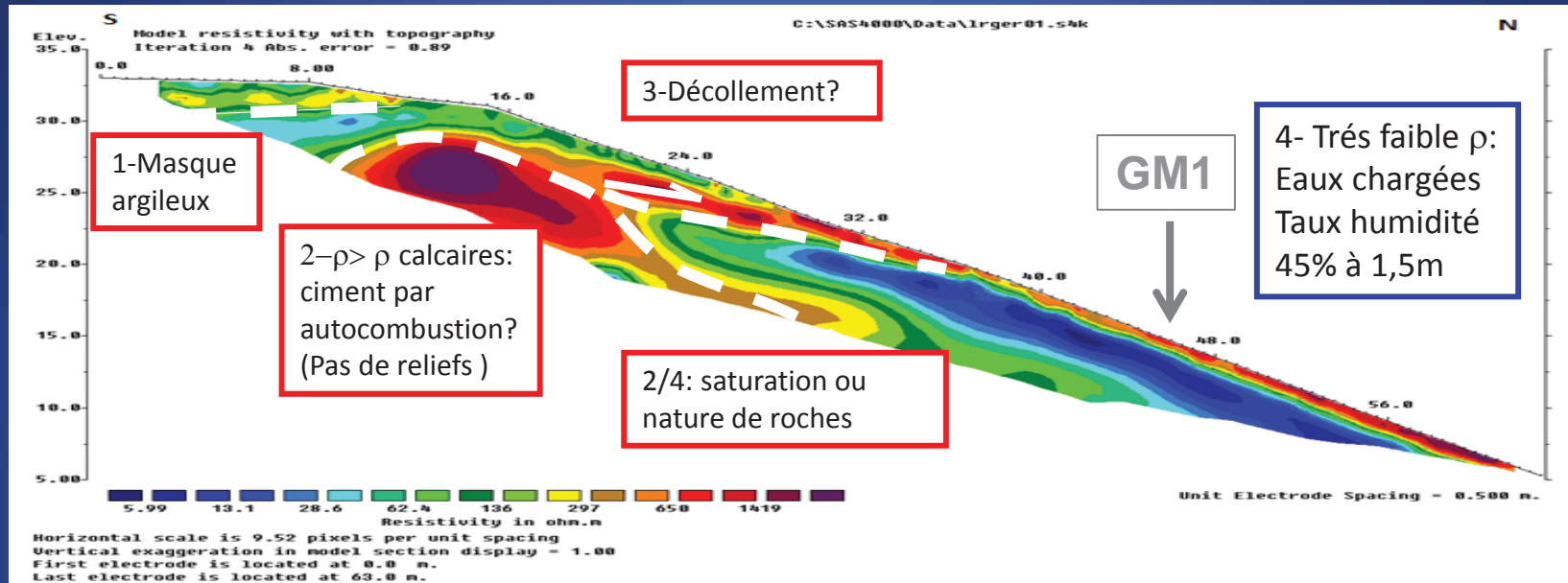
Assises du Fuvelien, chaîne de l'Etoile  
Trias pourvoyeur de gypse pour cimenteries à proximité  
Epannage Chaux (Ineris)

## Relief artificiel

Creeping et chablis: Instabilité superficielle



# Profil ERT, PS



PS :  $\Delta = +70\text{mV}$ : intensité et signe cohérent avec écoulement

# Conductivité, pH et température des eaux

| Echantillons        | Conductivité à 25°C ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) | pH   | T    |
|---------------------|--|------|------|
| EG1                 | 1701   | 8,8  | 10   |
| EG2                 | 4325   | 12,8 | 10,2 |
| EG3                 | 7691   | 13,2 | 10   |
| Seuil de potabilité | 1100   |      |      |

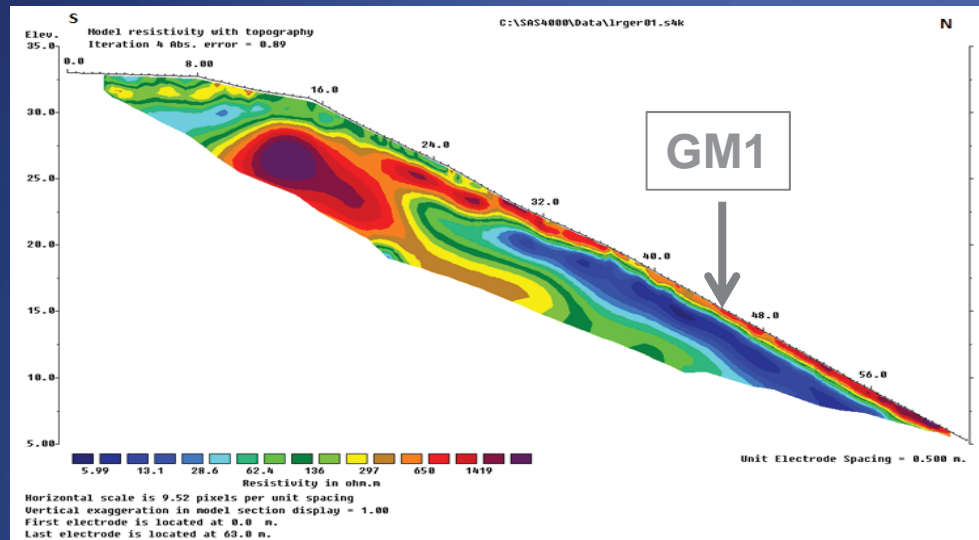
Eaux issues du terril :  
conductivité et Ph forts



Précipitations à l'exutoire EG2



# Corrélations TRE / Magnétométrie

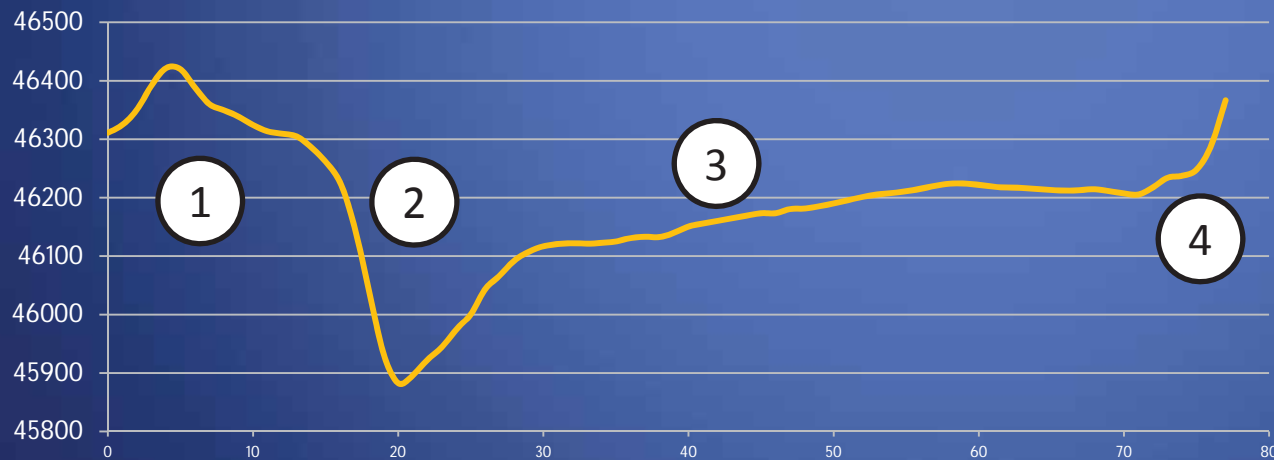


1-Déchets métalliques (décharge) + masque argileux

2-Contact anormal confirme l'hétérogénéité de matériaux  
Concentration oxydes de fer magnétique estimée : 1%

Autocombustion?

F(nT)



3-Anomalie négative non localisée: accumulation des matériaux amagnétiques ( $K < 0$ ):

# Pyrométamorphisme: diagnostic magnétique a posteriori



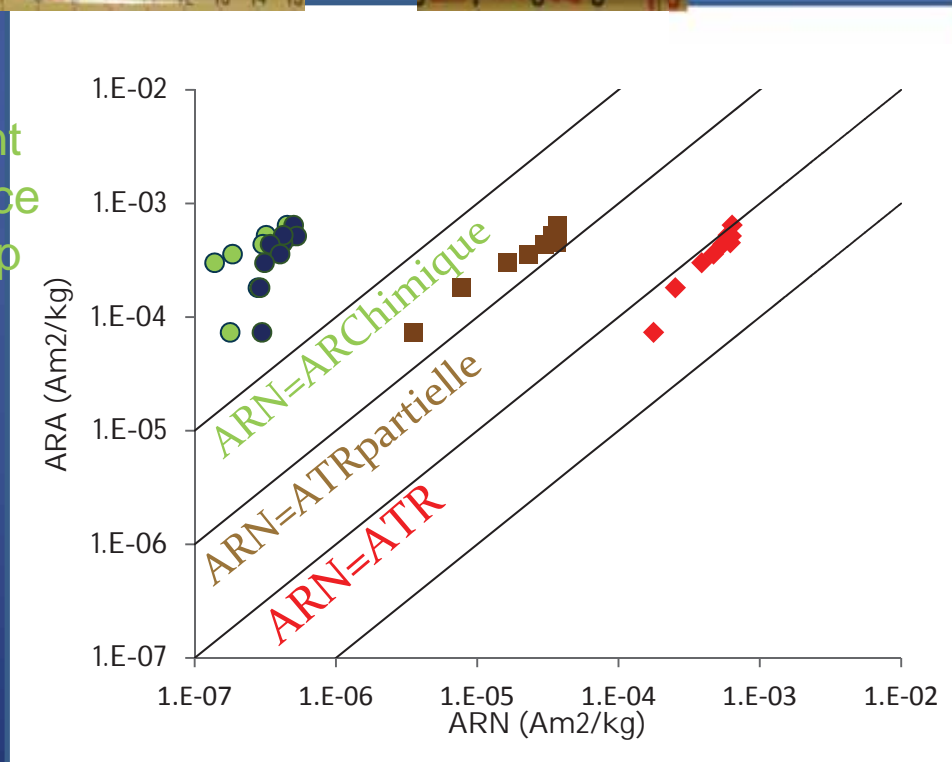
Intensité de l'aimantation proportionnelle à la température subie

T<sub>atm</sub> ARC,  
paléoenvironnement

T<sub>atm</sub> < T < T<sub>c</sub>  
Oxydation ménagée des sulfures (T ≈ 300°C)

T<sub>process</sub> > T<sub>c</sub>  
T<sub>c</sub> mag = 580°  
T<sub>c</sub> hém = 680°  
T min autocombustion

Flamboyant de Provence hors champ



# Conclusions

- Imagerie des structures en relations avec les nappes
- Croisements des méthodes géochimiques, géophysiques et minéralogiques convergentes vers modèles d'altération météorique et sous couverture.  
Bilan géochimique : instrumentation
- Contribution au suivi hydrologique, qualification des eaux (sulfates, HAP?)
- Aléas d'instabilité mécanique/ Modalités diverses (Lessivage versus encroûtement, minéraux gonflants).
- Magnétisme des roches comme marqueur de processus physicochimiques (paléothermomètre du pyrométamorphisme)
- Méthodologie exportable



# Perspectives

Facilités de l'OHM: recherche base de données existantes, qualité sols air eau, météo, cartographie sols (naturels et urbains), autorisations administratives.

Instrumentation terril en complément d'un suivi ERT et PS

Bilan d'altération versus variabilité saisonnière

Affinement du modèle géophysique : paramètres gérant l'ERT /PS

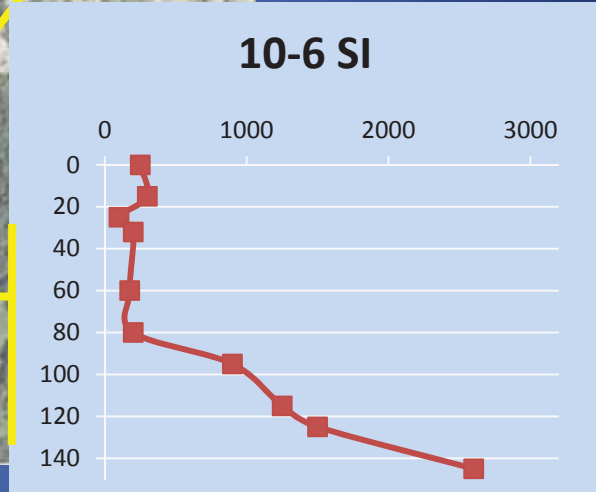
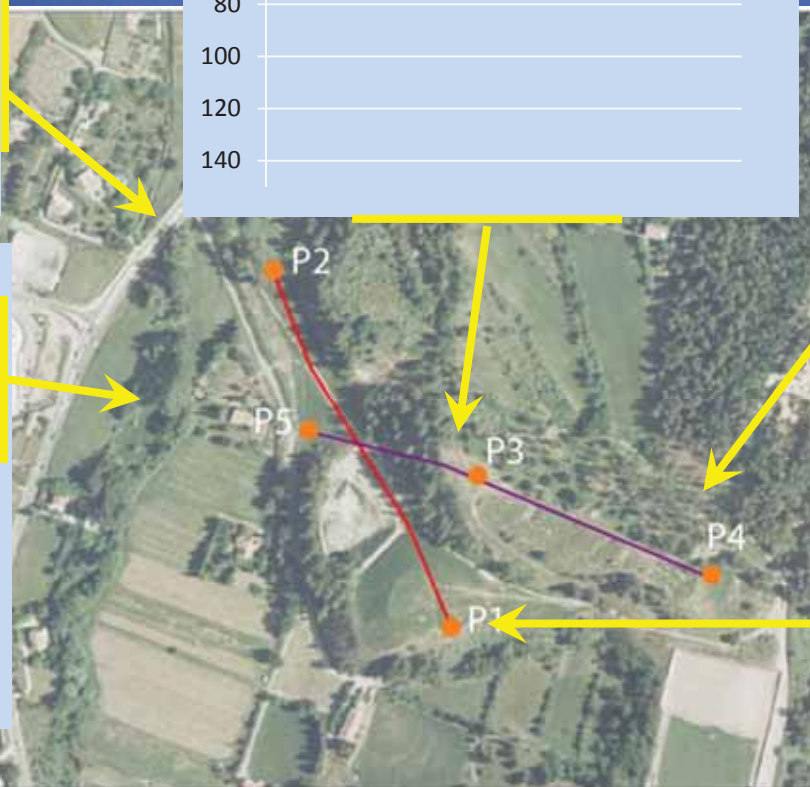
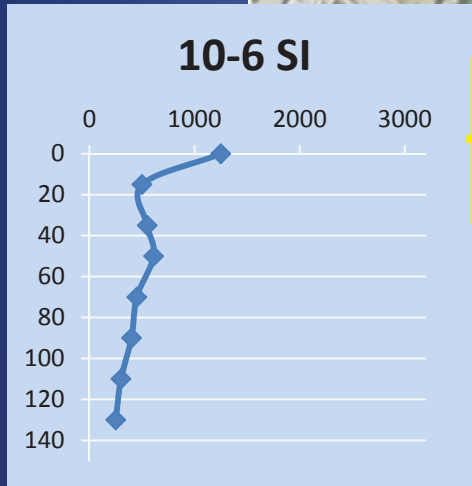
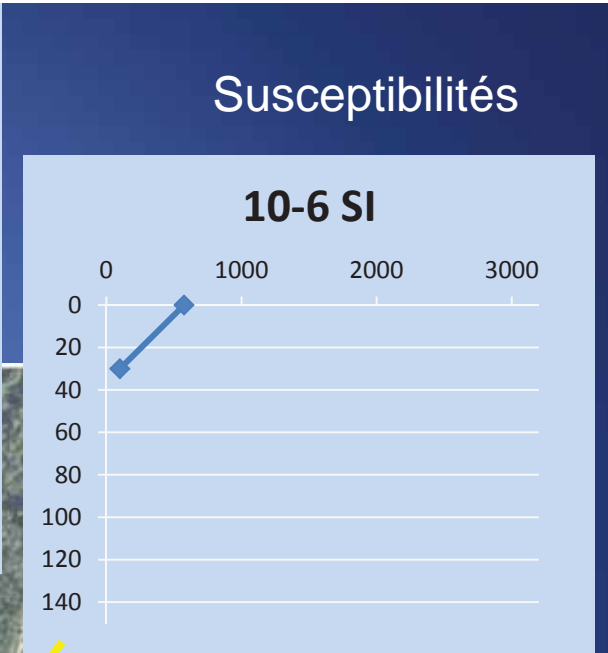
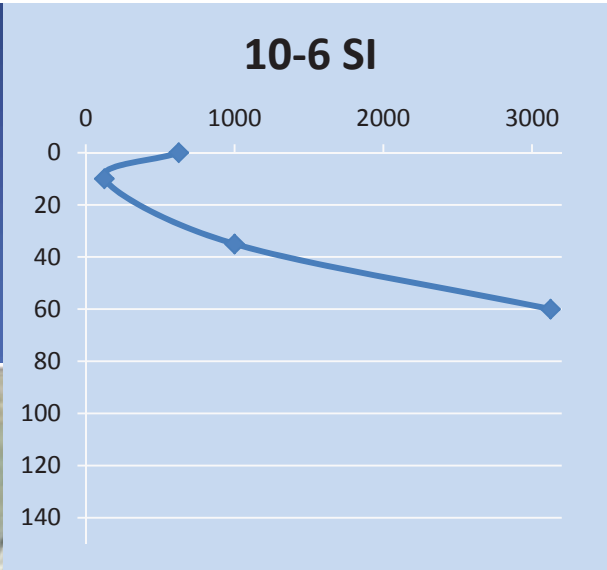
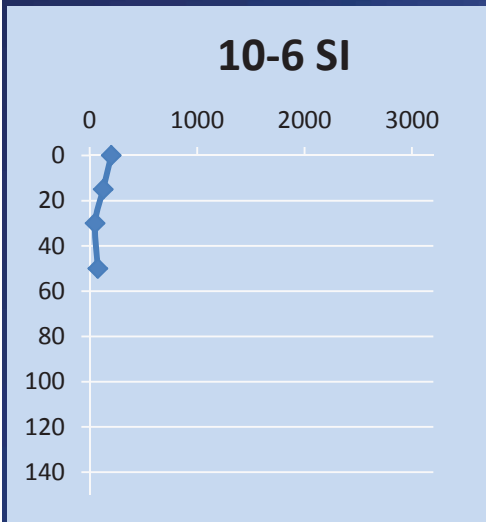
Site pérenne pour ateliers de formation

Diagnostic a priori autocombustion (Magnétisme et minéralogie) : Défend, Les Molx?

Stages masters?

Propriétés Biogéophysiques

Merci de votre attention!

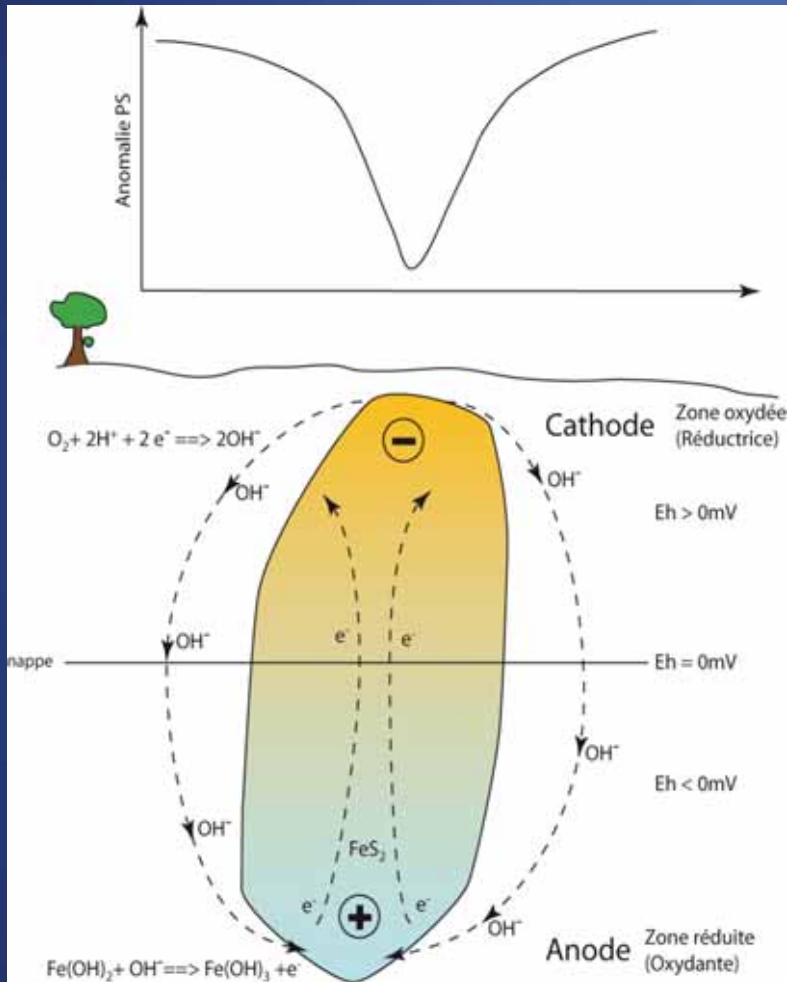


Peu d'horizonation, hétérogénéité des profils (profondeur), susceptibilités faibles  
signature de masque argileux d'âge récent

Enrichissement basal: lithoreliques stérile: anomalies TRE et T de moyenne  $\lambda$ .

## Gisement métallique

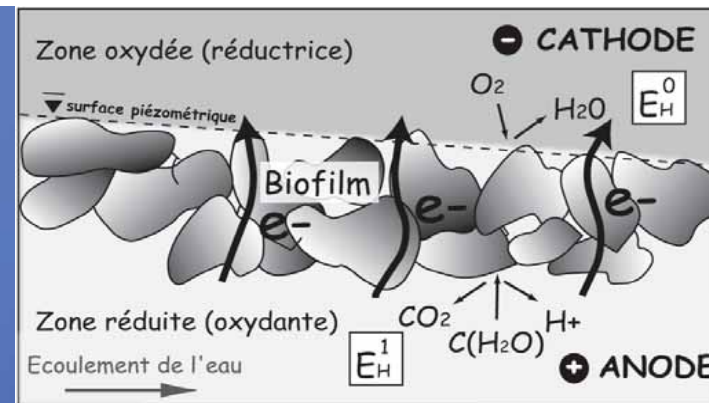
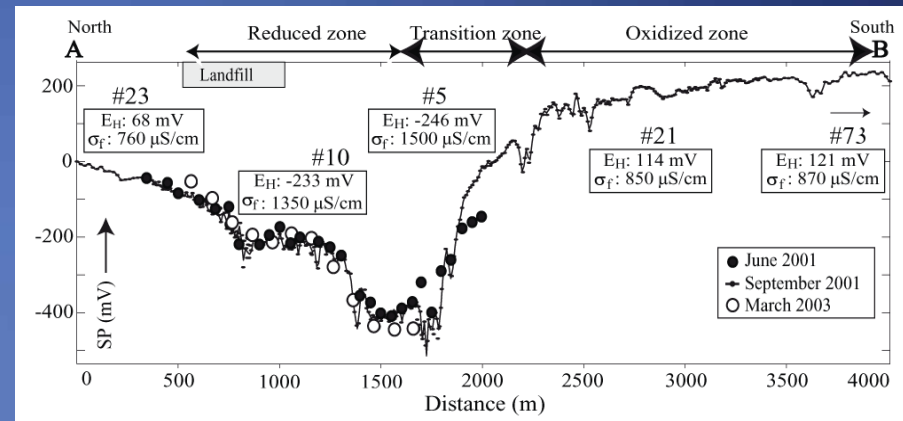
Réactions d'oxydation de surface en anaérobie : Anode



Réactions de réduction  $O_2$  : Cathode  
Flux net par transport d' $OH^-$  préservant l'électroneutralité globale

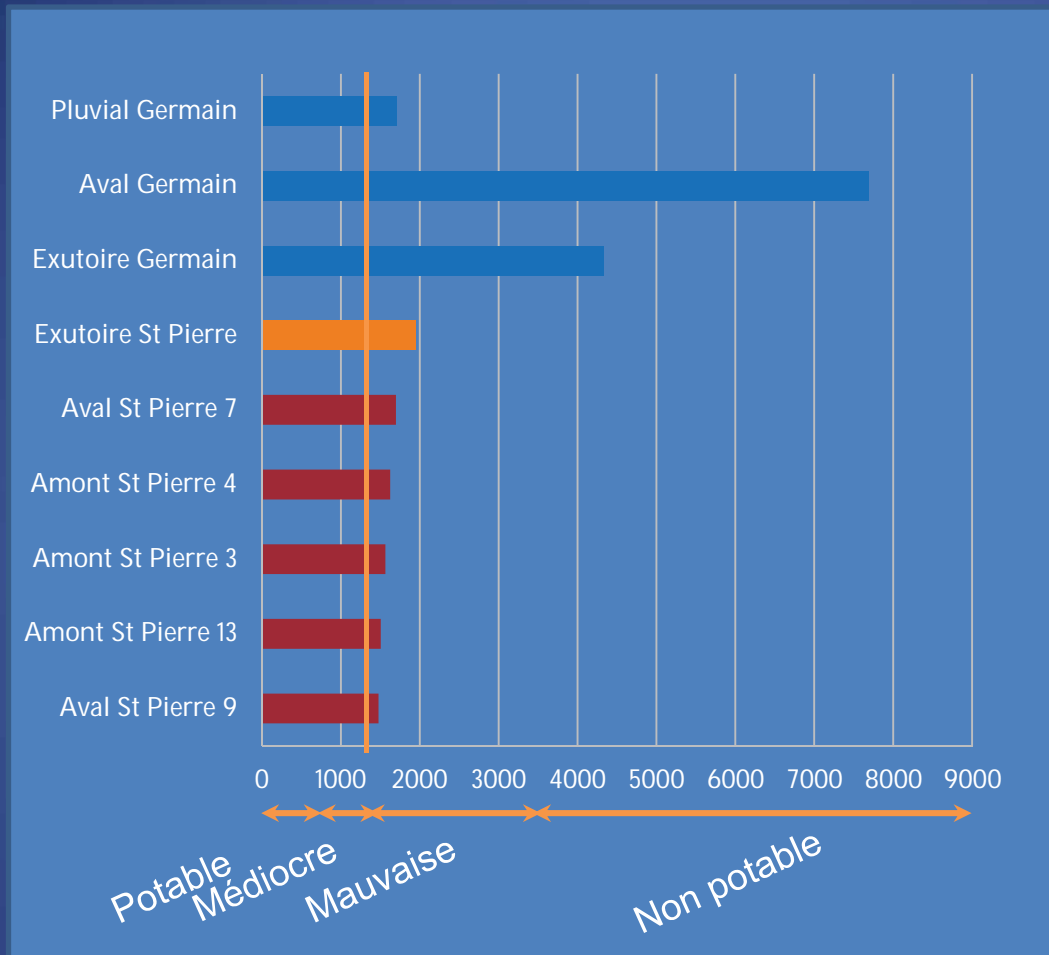
## Panaches

Réactions d'oxydation de la matière organique (catalyseur bactérien) : Anode



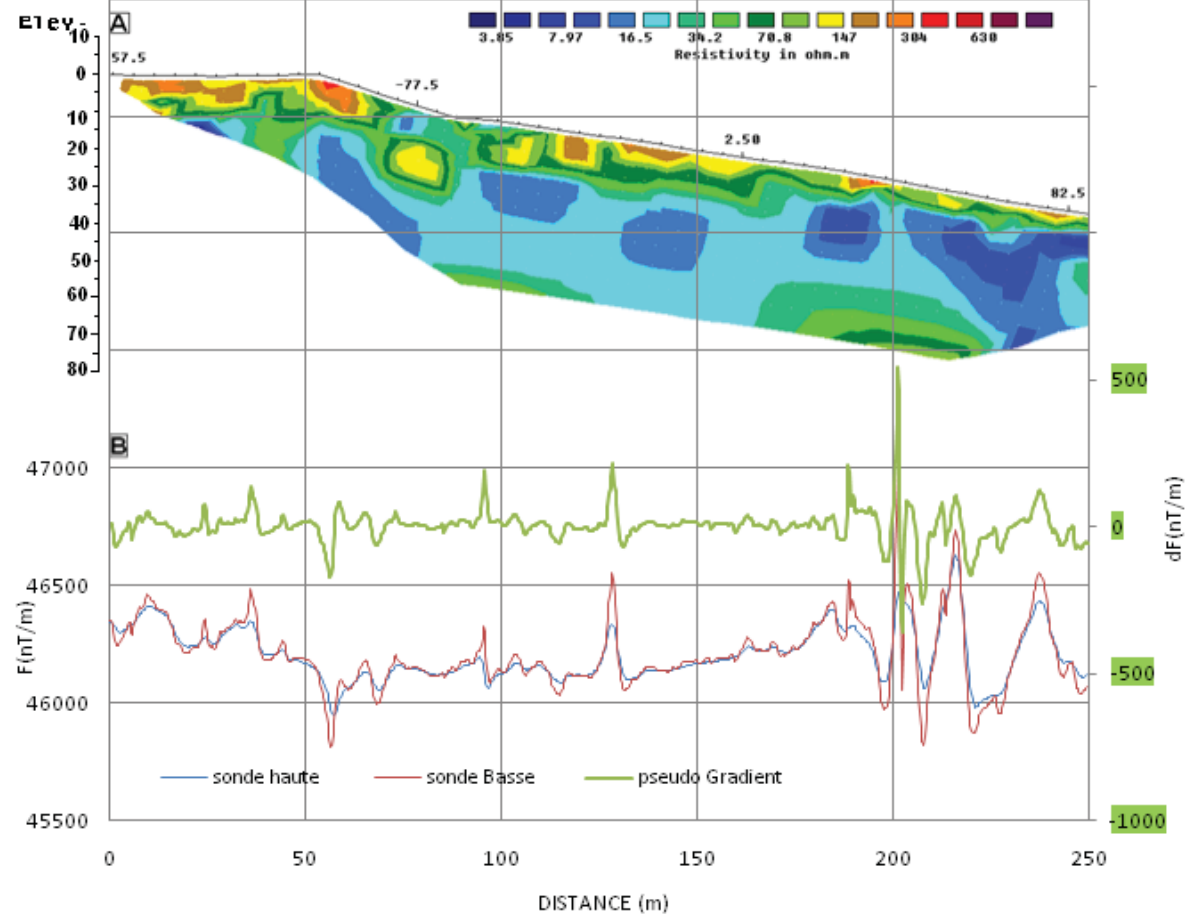
Réactions de réduction des accepteurs d'électrons :  $O_2$ , N,  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{3+}$  (selon séquence de l'énergie libre de Gibbs) : Cathode



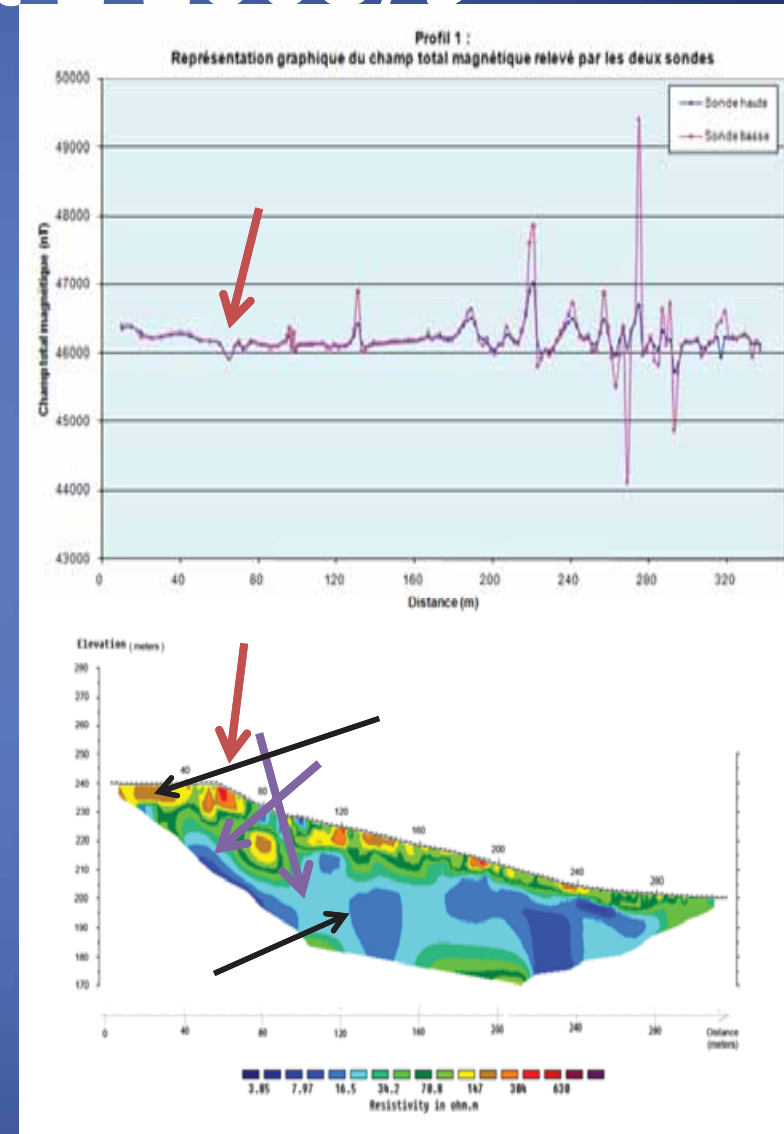
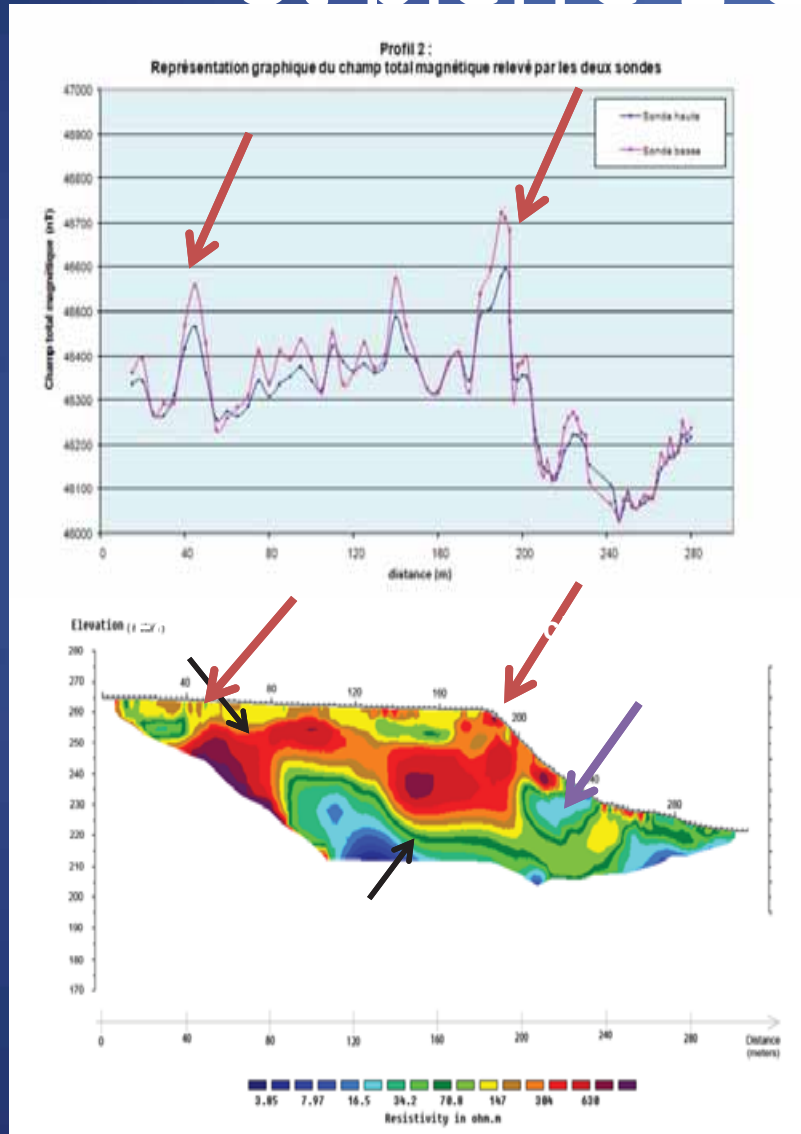


Conductivité recalculée  
à 25°C (µS.cm-1)

Conductivité proportionnelle aux concentrations en espèces  
dissoutes  
Eaux anormalement chargées



# St pierre 1 et 2 2008/9





# Graphiques de Susceptibilités

Carte des aménagements du Terril St-Pierre  
Echelle : 1/2000<sup>ème</sup>  
Fond de carte HBCM- DSA Provence

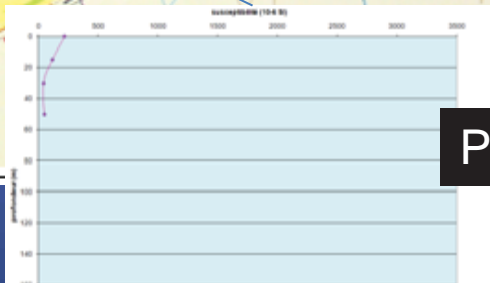
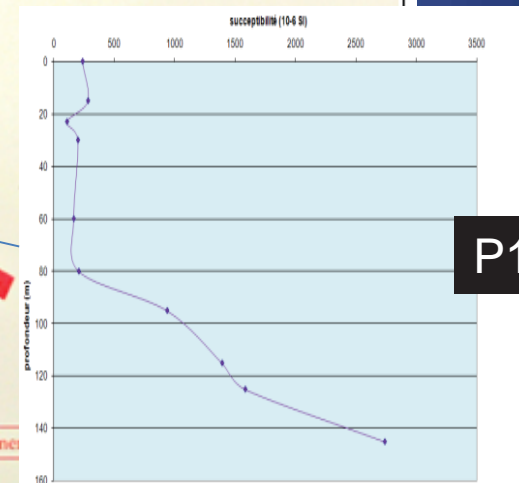
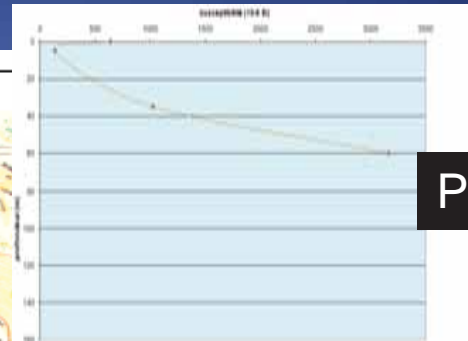
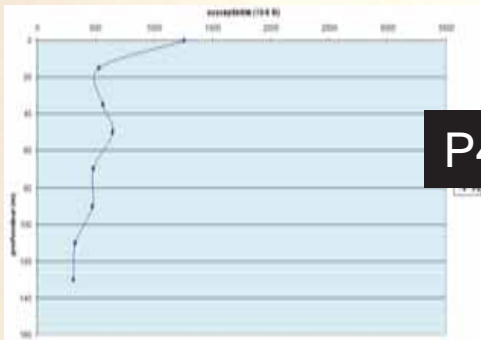
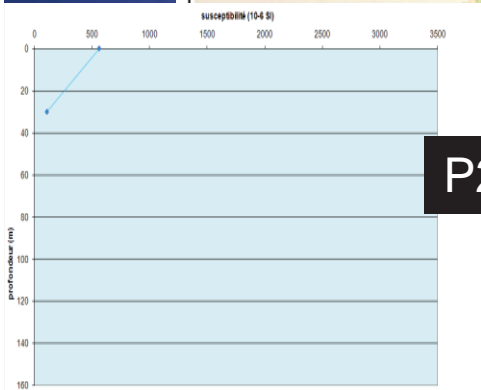
P3

P4

P2

P1

P5



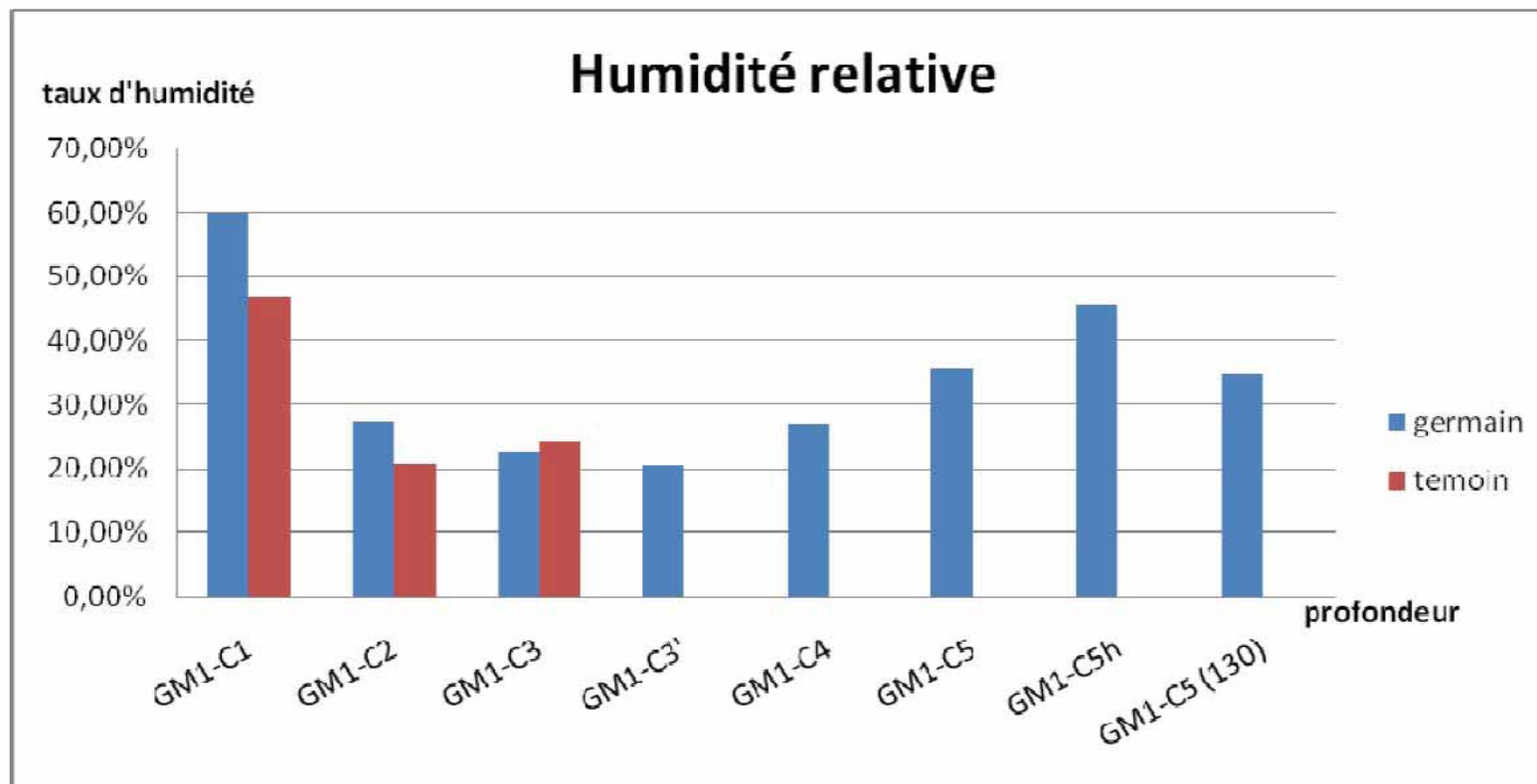
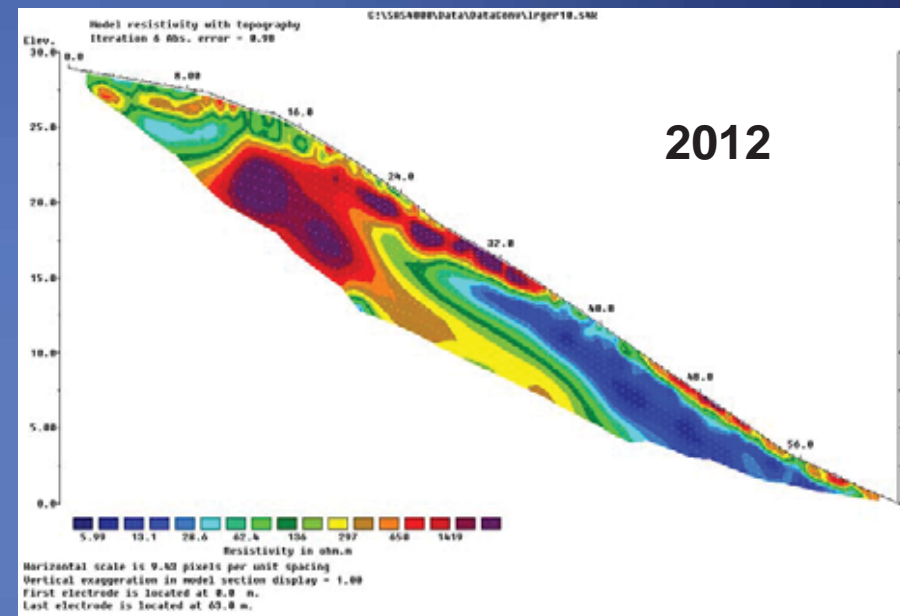
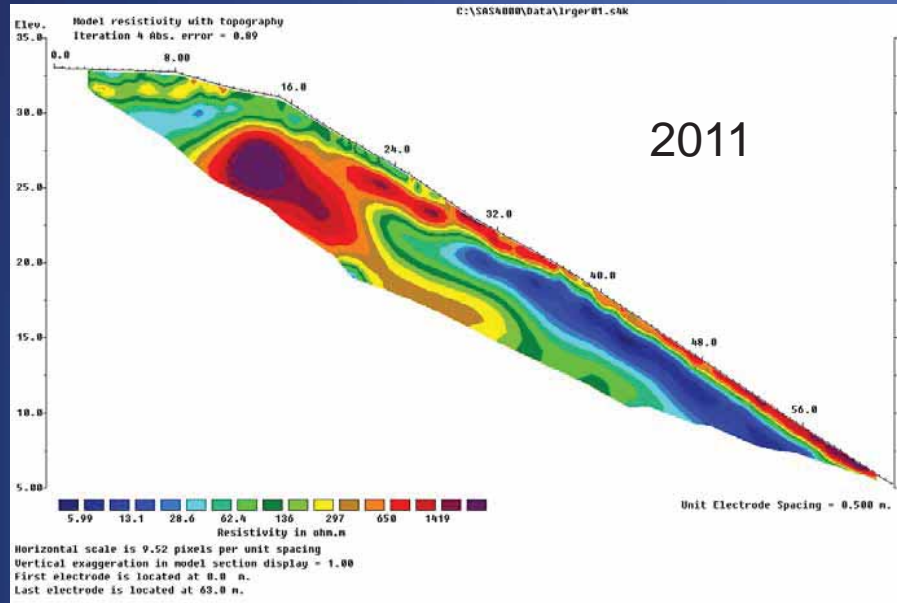


Figure 13 : Humidité relative des différents horizons

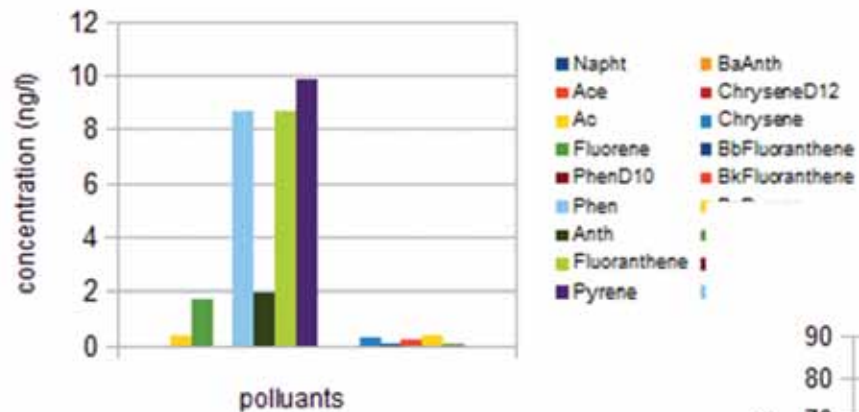
# Suivi TER



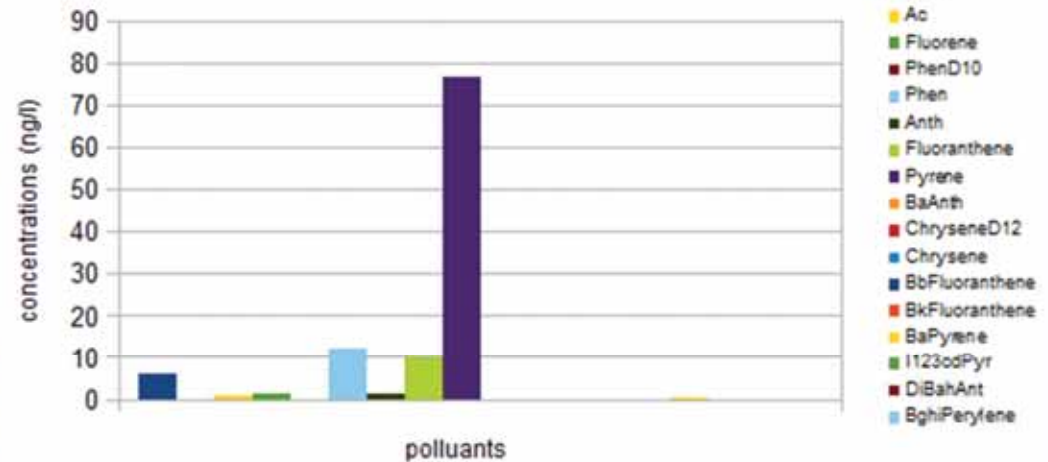


# HAP

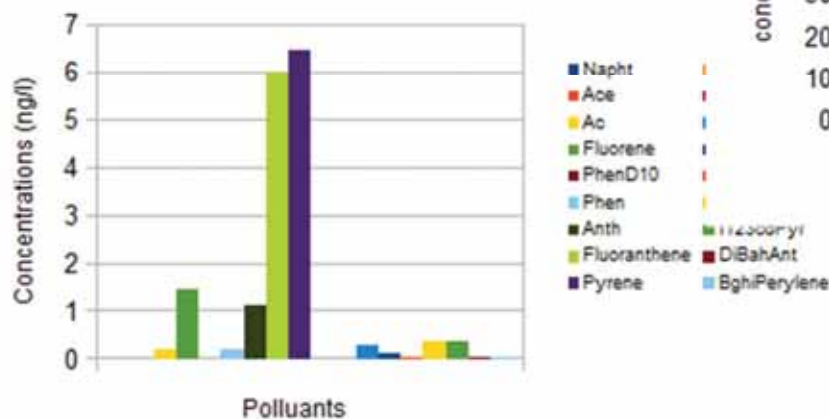
Concentrations HAP au point EGA1



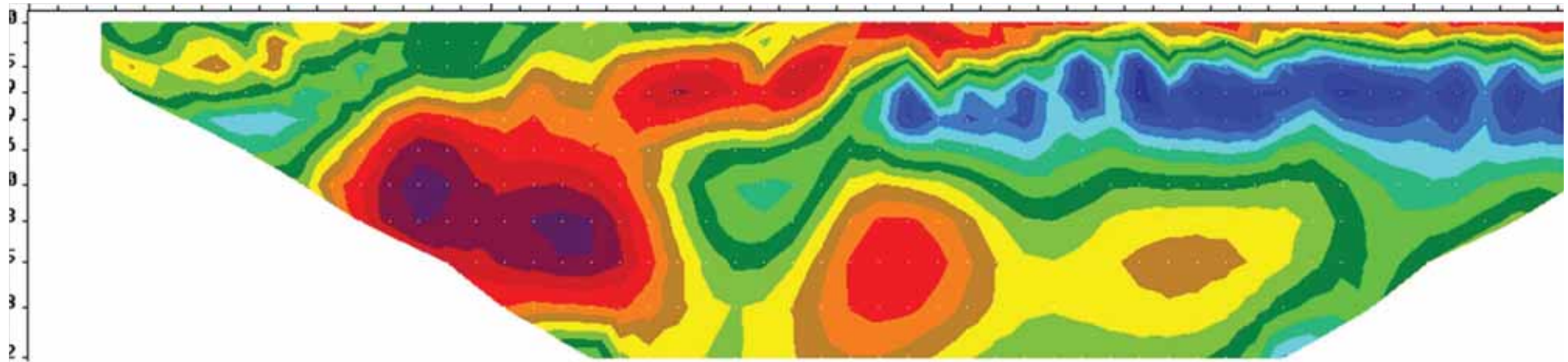
Concentration EGL7



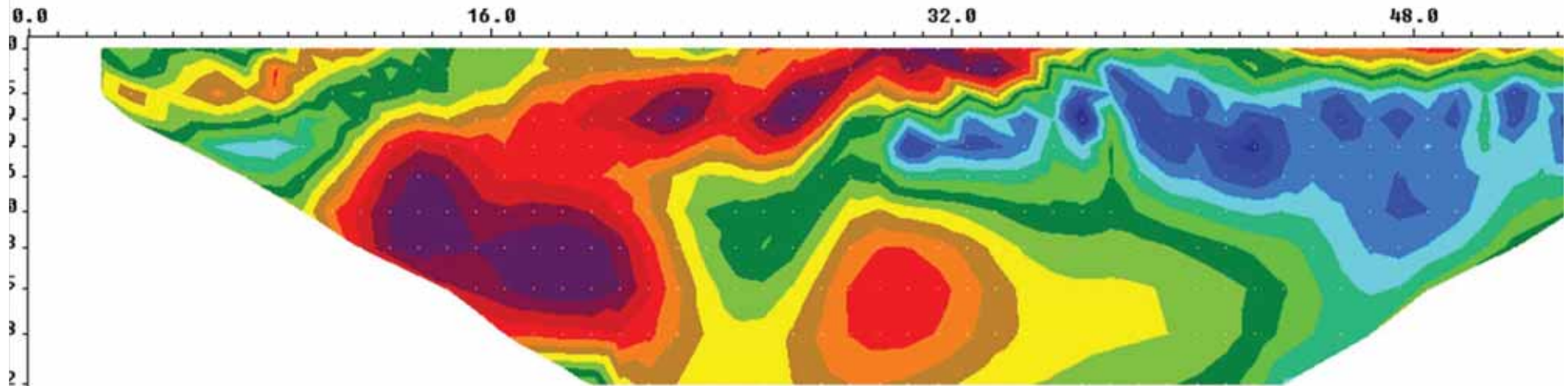
Concentration HAP au point EGEMB3



Traces de pyrène et fluoranthène (isomère structurel):  
houille et résidu de combustion incomplète.



First data set Model Resistivity Section (RMS error 0.96%)

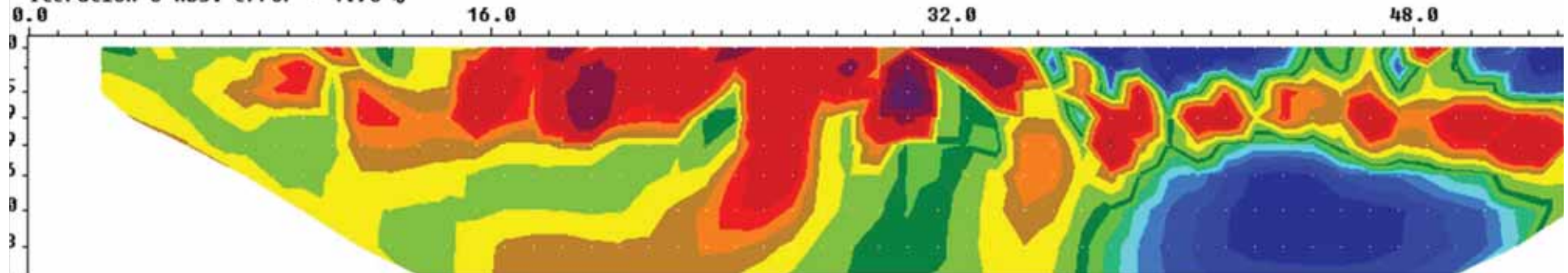


Second data set Model Resistivity Section (RMS error 1.90%)



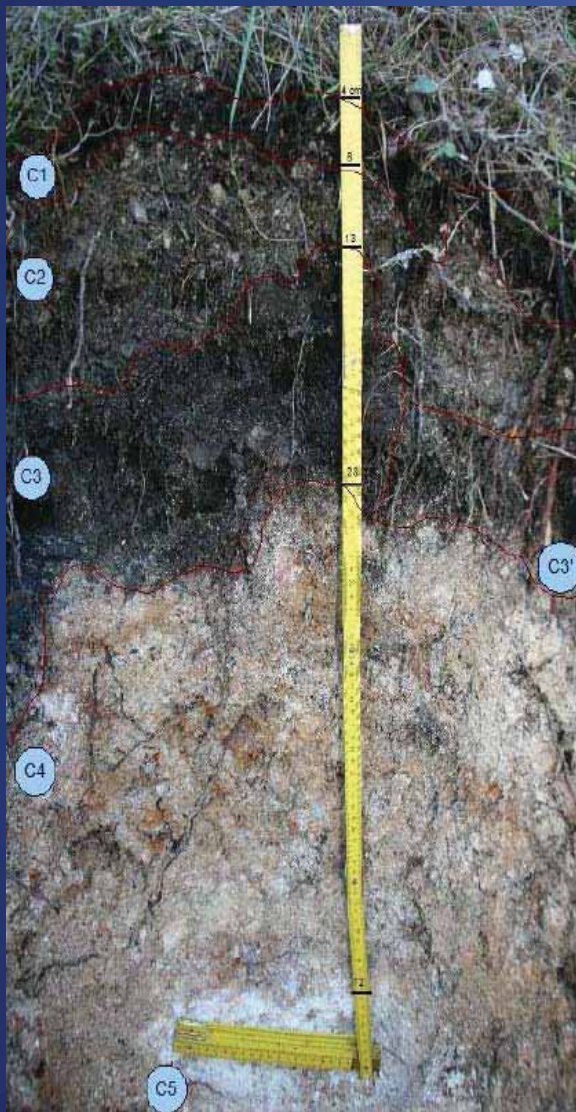
Unit

Iteration 6 Abs. error = 1.90 %





# Minéralogie profil pédologique GM1



| Echantillons | Minéralogie  |
|--------------|--|
| GM1C2        | Calcite, Quartz<br>Dolomite, Illite, Hématite  |
| GM1C3        | Calcite, Quartz<br>Aragonite, Dolomite, Hématite   |
| GM1C4        | Calcite, Quartz<br>Gypse, Ettringites  |
| Cailloux     | Calcite, Quartz  |
| GM1C4        | Hématite, Aluminosilicates de Ca HT  |
| GM1C5        | Calcite, Quartz<br>(Perte de cristallinité)<br>Ettringites, Portlandite<br>(Chaux éteinte) |
| Cailloux     | Calcite, Quartz  |
| GM1C5        | Maghémite, Ettringites,<br>Aluminosilicates de Ca hydratés (+amorphes)                     |
| GM1C5 (base) | Calcite, Quartz,<br>Portlandite<br>(Perte de cristallinité)<br>Brucite, Ettringites        |

Cortège cohérent avec la chimie des eaux : altération active peu discriminant apports initiaux/ évolution in situ :

A la base  
Portlandite, Brucite  
Sulfates et Ettringites,  
Amorphisation dans l'horizon supérieur  
Gypse suçant :  
attaque sulfatée  
résidus de cimenteries

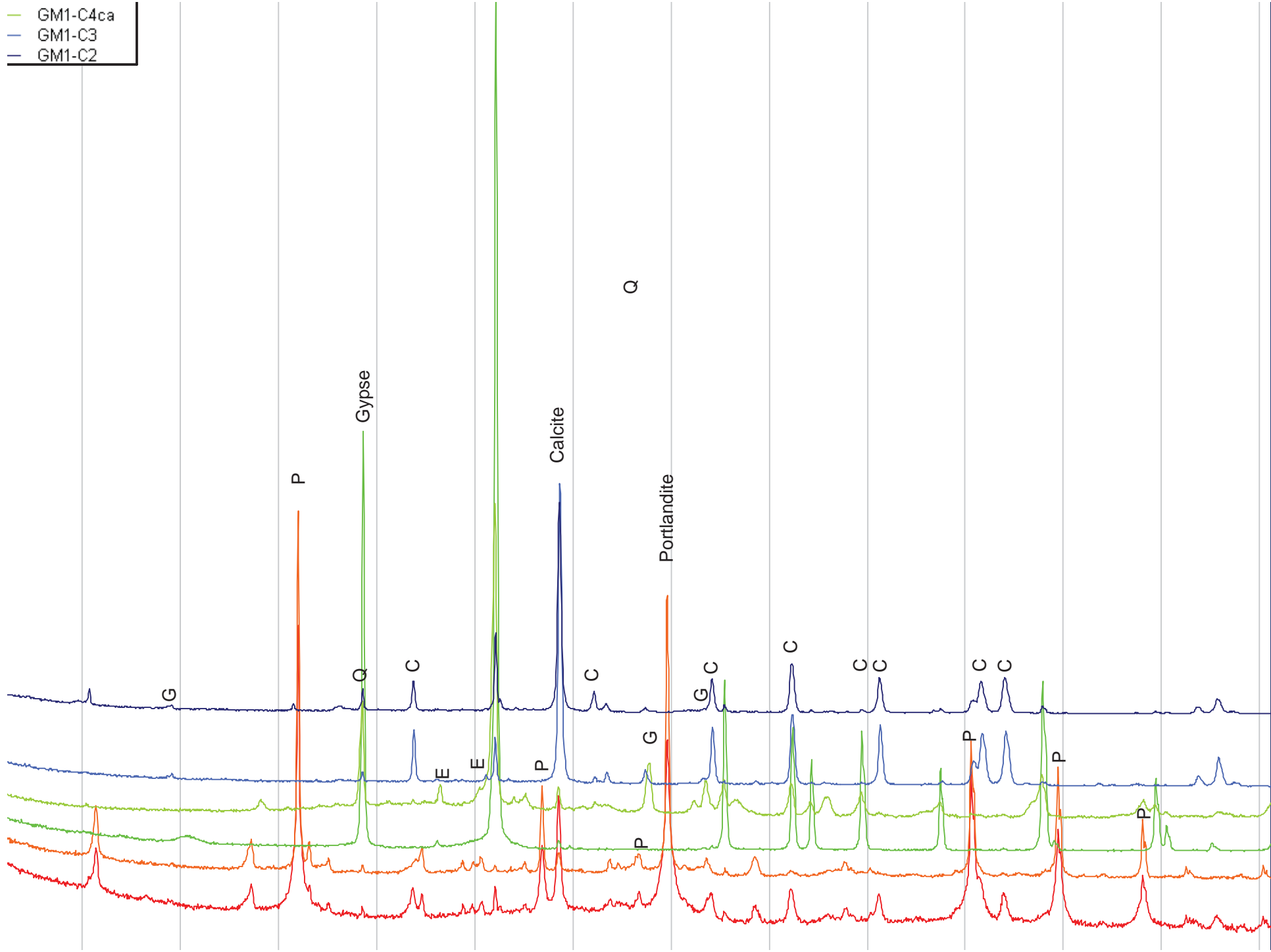
Mullite (Minéral HT > 800°C)

Pb: autocombustion/altération chaulage?

Température autocombustion?



— GM1-C4ca  
— GM1-C3  
— GM1-C2



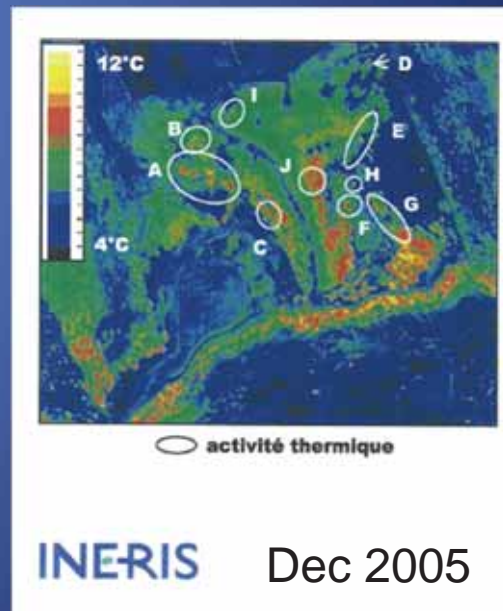
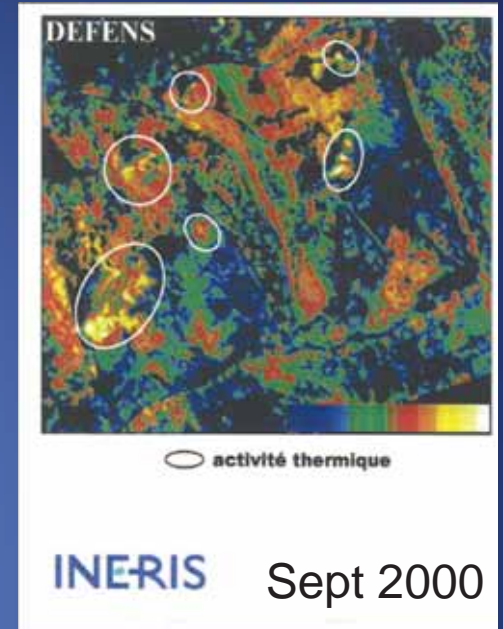
# Auto-combustion

MO+oxydation/dissolution de sulfure  $\Delta H > 0$  : risque incendie et production de chaux vive

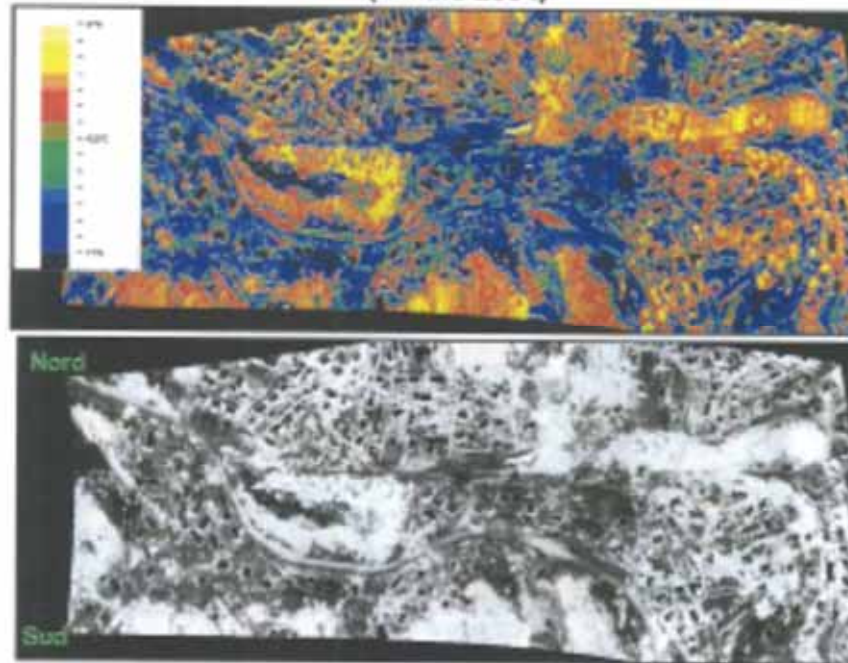
- Fumerolles malodorantes après-guerre, température de rougeoiment, végétation thermophile

Suivi thermographique Terril de défends  
INERIS (2004-2005))

Aménagement BRGM ))



**CdF Provence**  
**analyse thermographique du terril Germain**  
**(2 mars 2004)**

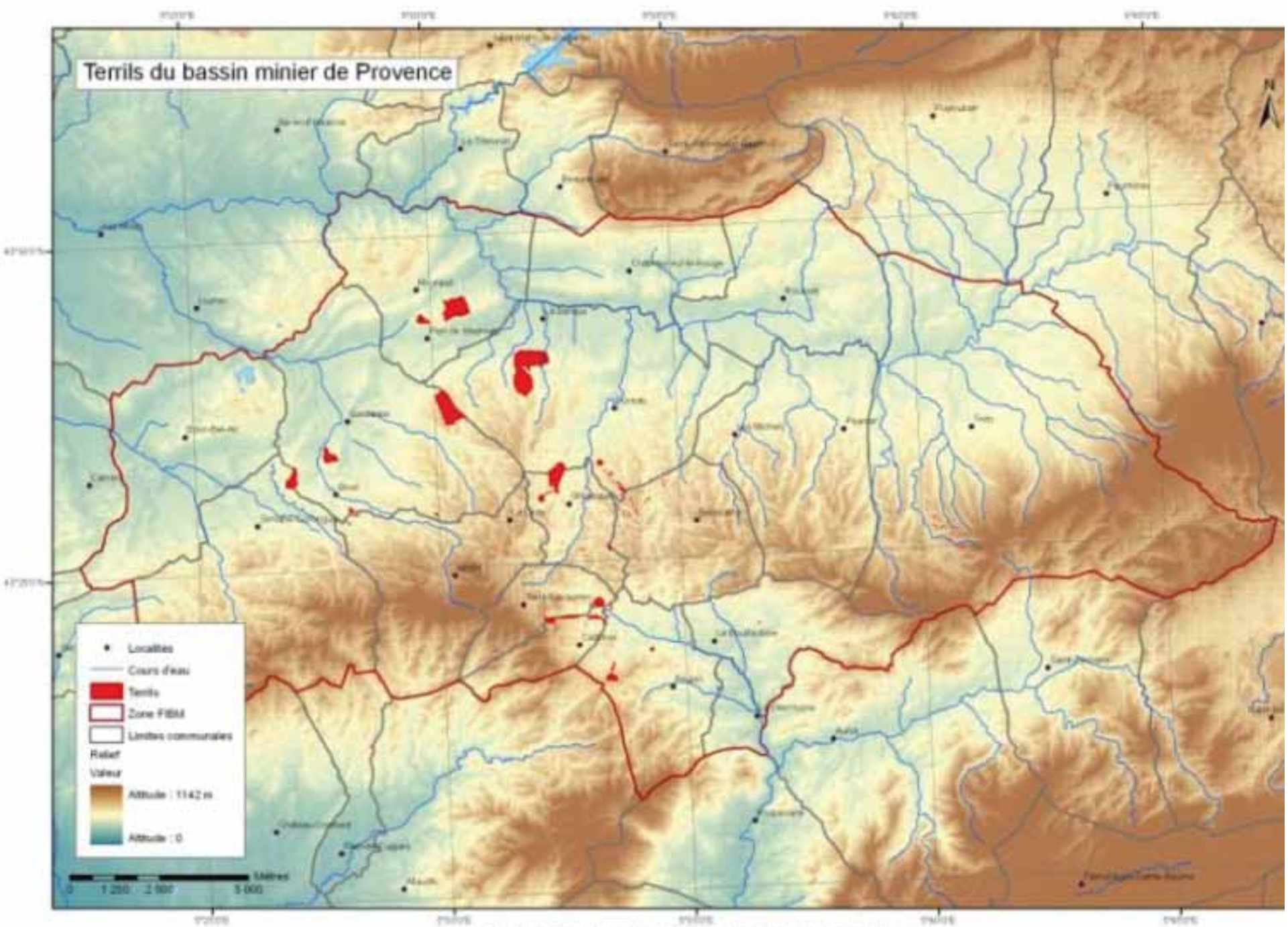


**INERIS**

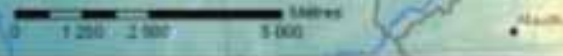
DRS-07-62756-06784A - FIGURE 37



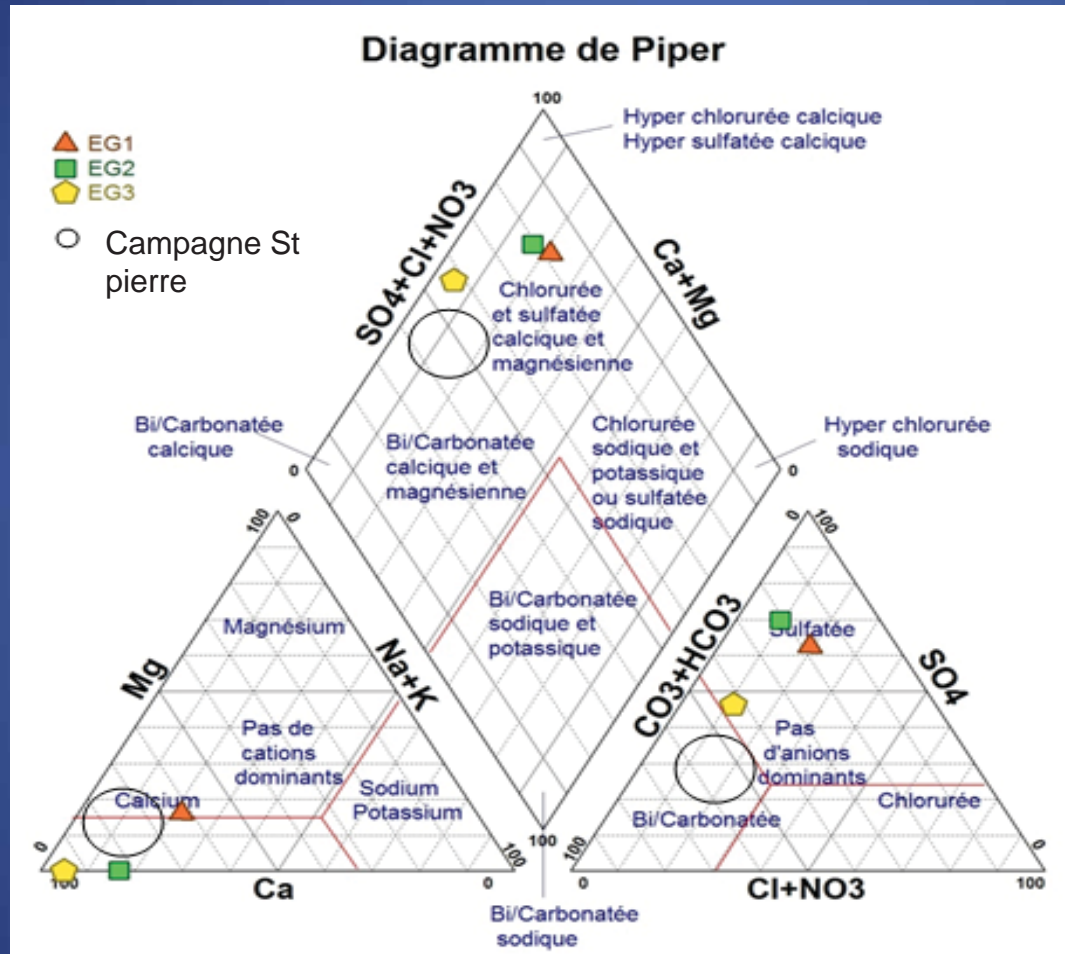
# Terrils du bassin minier de Provence



- Localités
- Cours d'eau
- Terrils
- Zone FBM
- Limites communales
- Relief
- Valeur
- Altitude : 1142 m
- Altitude : 0



# Composition chimiques des eaux

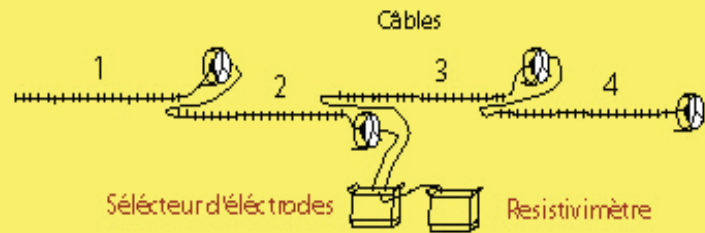


Composition chimique anormale de Germain  
Enrichissement en ions calcium et sulfates et carbonates.

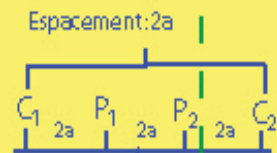
Diagramme de Piper des eaux prélevées en comparaison des eaux naturelles (cercle : campagne précédentes : terriil St Pierre et Luyes)



# La tomographie de résistivité électrique (TRE)



## Protocole d'acquisition : Wenner a

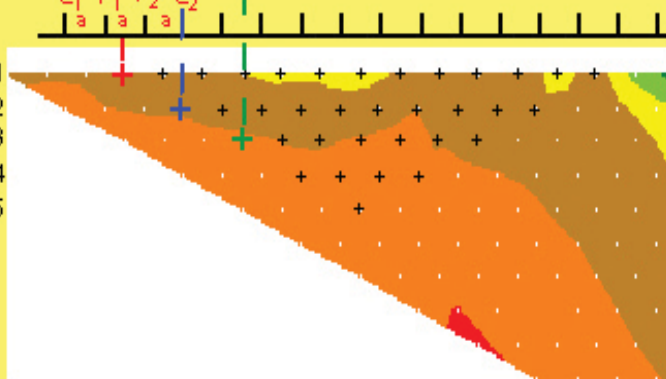


Espacement:  $a$



$C_1, C_2$  : électrodes d'injection du courant  
 $P_1, P_2$  : électrodes de mesure

$n = 1$   
 $n = 2$   
 $n = 3$   
 $n = 4$   
 $n = 5$



**Méthode :** permet d'imager en 2D (ou 3D) les variations de résistivité électrique du sous sol.

**Investigations de sub-surface** sur des terrains présentant des contrastes de résistivité marqués.

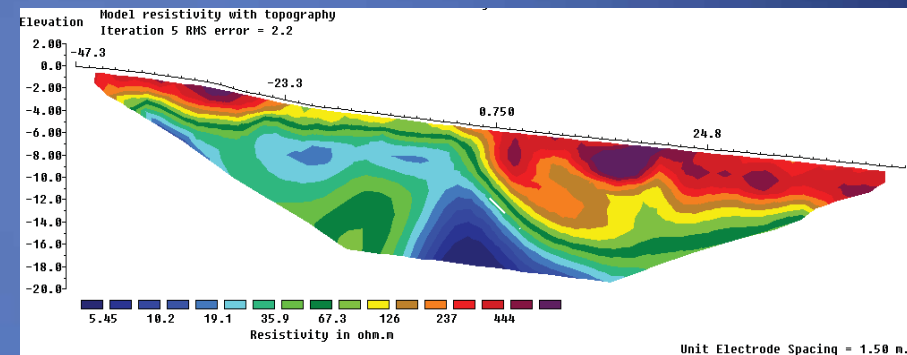
**Principe :** basé sur la loi d'Ohm

**Dispositif :** système multi-électrodes qui permet d'injecter un courant électrique dans le sol et d'effectuer automatiquement plusieurs centaines de mesures de résistivités apparentes indépendantes les unes des autres.

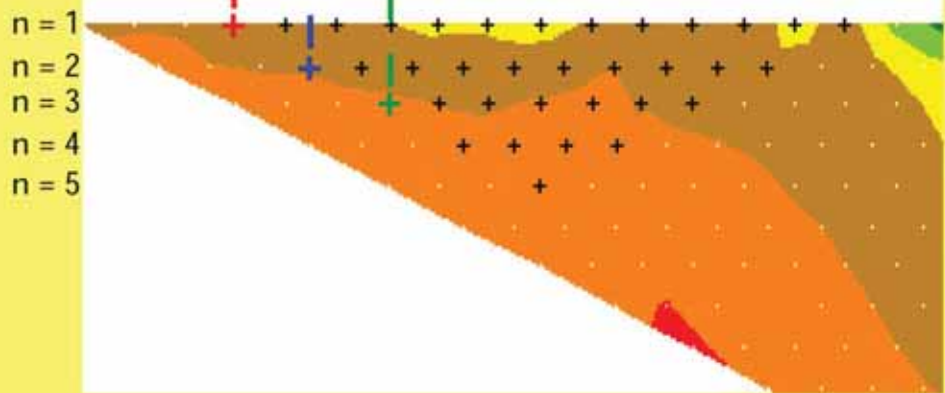
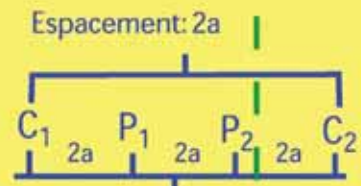
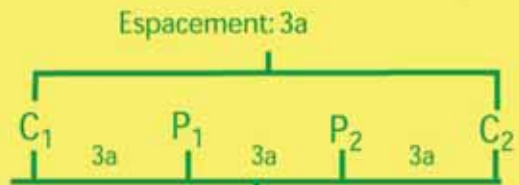
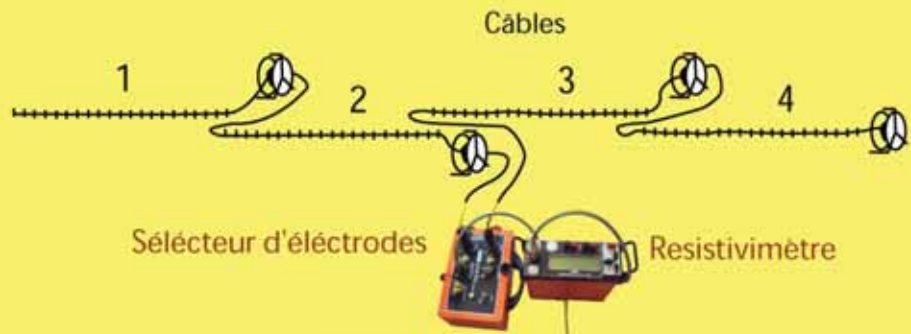
**Résultat :** image en coupe (X, Z) et en continu des variations de résistivité apparente des terrains traversés = « pseudo section »

**Traitement des données :** inversion (RES2DINV) donne une image des résistivités vraies

**Interprétation :** nature géologique et géométrie du sous-sol. Suppose une bonne connaissance des causes possibles des variations de la résistivité.







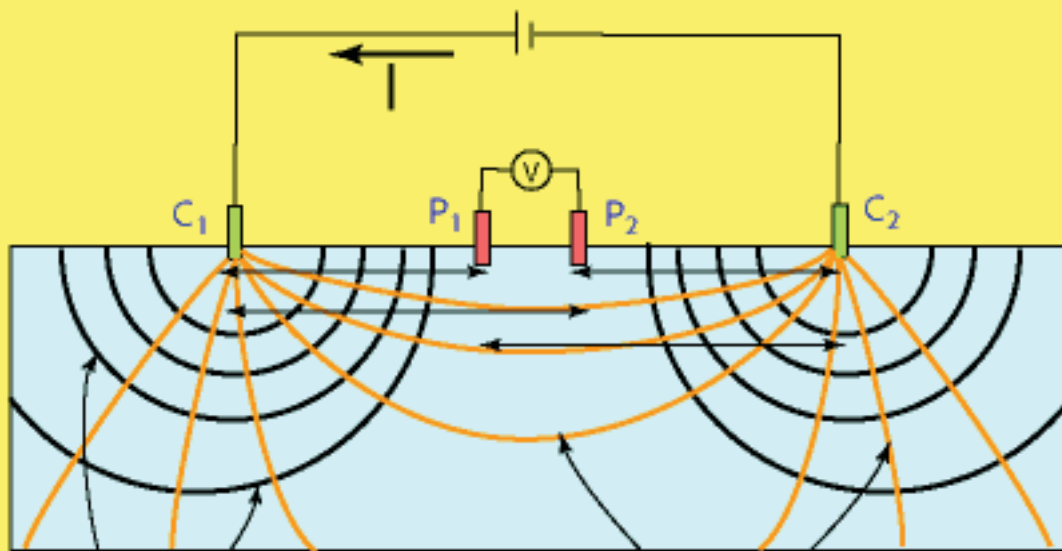
**Mesure** =  $\rho$  apparente  
qui intègre tous les  
matériaux traversés par  
le courant

**Inversion** = calcul  $\rho$   
en chaque point

## L'ERT, comme toutes les méthodes géophysiques

- Indirecte
- Permet d'obtenir une image "géoélectrique" en 2D du sous sol et donc de localiser et d'identifier des objets (géologiques ou autres) enfouis
- Quelques contraintes :
  - taille vs profondeur,
  - contrastes "géoélectriques" des matériaux constituant le milieu analysé
- Permet de mieux cibler
  - Forages
  - Tranchées
  - Fouilles

## Les Dispositifs les plus fréquemment utilisés



Lignes équipotentielles

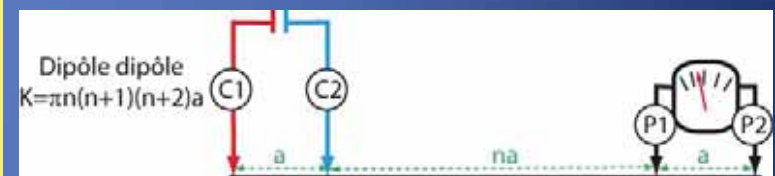
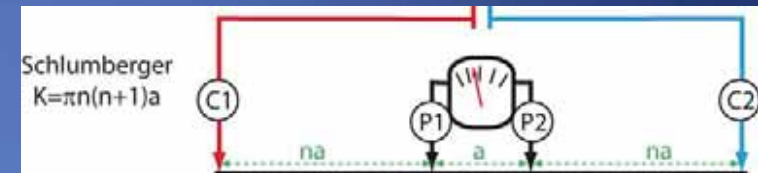
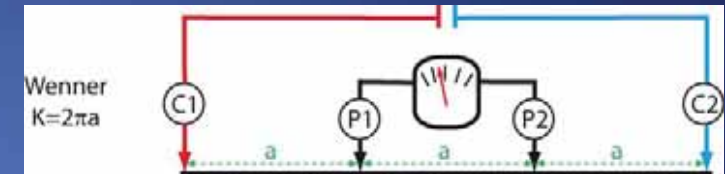
Lignes de courant

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I}$$

$\rho$  en Ohm.m,  $\Delta V$  en mV,  $I$  en mA,

$K$  est un facteur qui dépend de la configuration du quadripôle

$$K = 2\pi / (1/C1P1 - 1/C2P1 - 1/C1P2 + 1/C2P2)$$



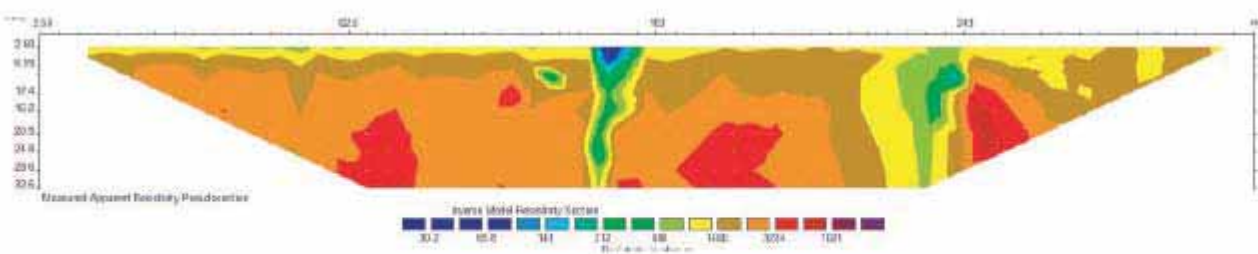
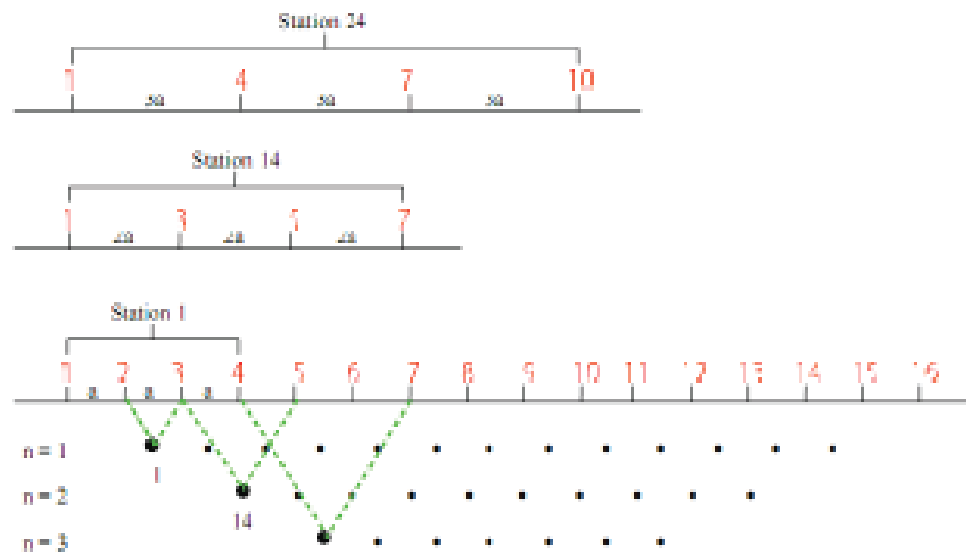
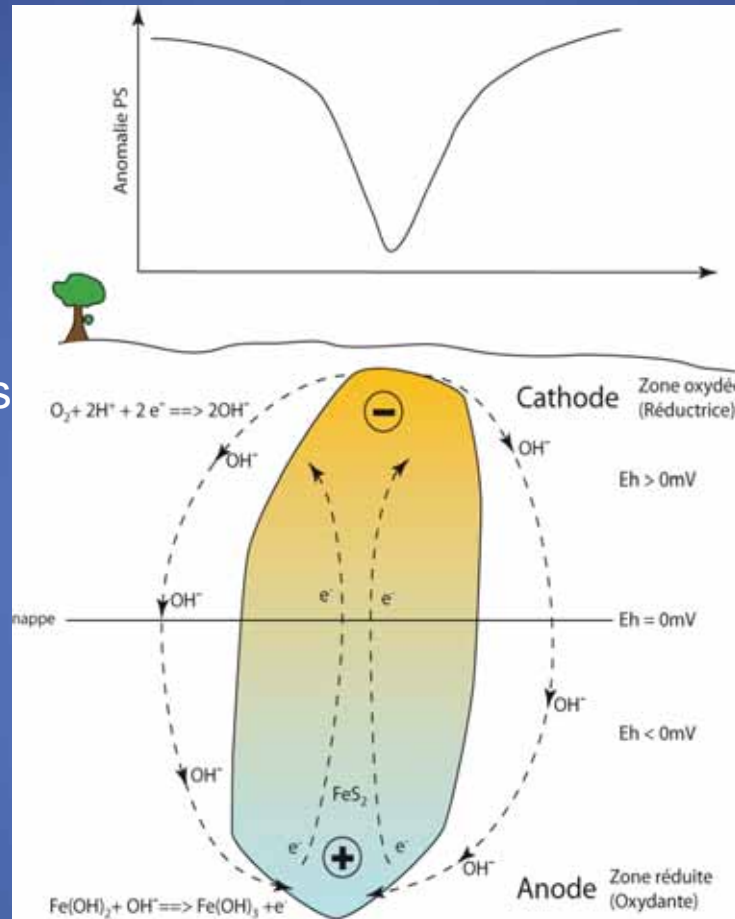


FIG. 7 - carte de pseudo-section



## Les porteurs de charges sont les électrons

**L'électro-redox** : Les électrons interviennent lors des réactions d'oxydo-réduction. Pour être à l'origine d'un courant électrique, ces électrons doivent être mis en mouvement dans un conducteur qui leur assure ainsi un transfert entre deux zones de conditions rédox différentes



## Gisement métallique :

La partie supérieure du filon (au dessus du niveau piézométrique) est oxydée ( $Eh > 0$ ), la partie inférieure (sous le niveau piézométrique) est réduite ( $Eh < 0$ ).

Dans la partie la plus profonde réactions d'oxydation localisées à la surface du conducteur métallique produisent des électrons → l'anode de la géobatterie,

La partie la plus superficielle des électrons sont consommés au travers de réactions de réduction, mettant en jeu l'oxygène → la cathode de la géobatterie

Un transfert d'électrons de la partie anaérobie (en profondeur) à la partie aérobie (plus superficielle) est alors généré par le biais du minerai métallique électroniquement conducteur. Simultanément, un flux d'ions est produit dans la formation géologique afin de conserver la neutralité des charges. Une densité nette de charge se crée et est responsable d'un courant électrique mesurable en surface sous la forme d'anomalies PS.

Eventuellement un petit rappel, sans vouloir prendre l'assistance pour des incultes.

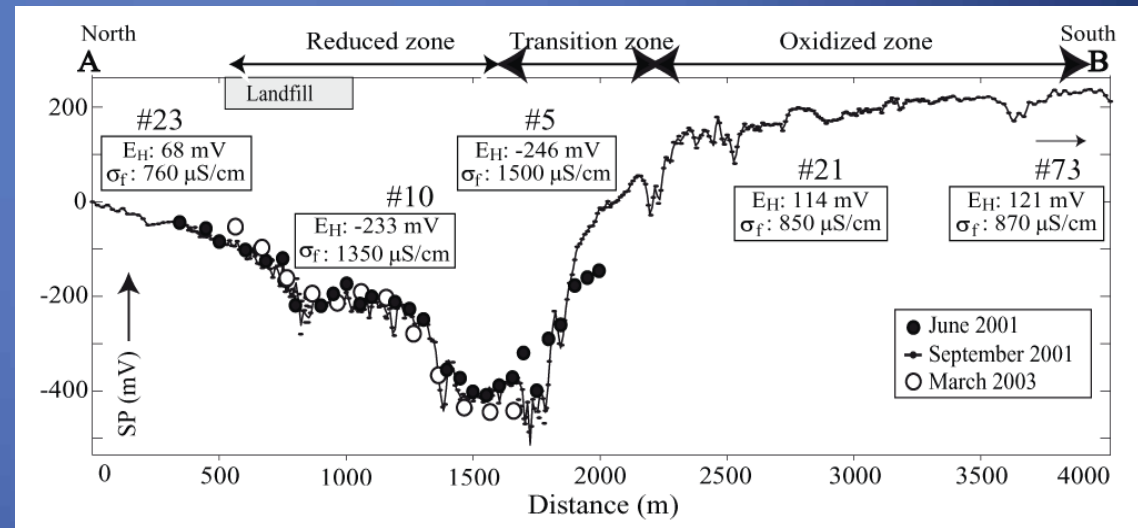
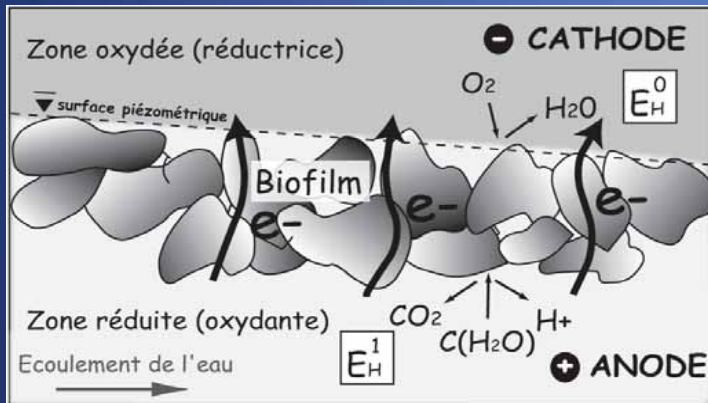
L'anode et la cathode sont définies d'après la **nature de la réaction** qui s'y produit et non selon le signe de leur polarité. **Anode = oxydation**, **cathode = réduction**

Panache de contamination est assimilé à des couples Redox, comme dans le cas de gisement métallique

Réactions d'oxydation de la matière organique s'accompagnent de réactions de réduction d'éléments chimiques accepteurs d'électrons ( $O_2$ ,  $N$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{3+}$ ) (selon séquence de l'énergie libre de Gibbs).

➤ séquence redox des zones les plus réductrice proche de la source vers les environnements plus oxydants au front du panache

➤ Les bactéries jouent ainsi le rôle de catalyseur des réactions d'oxydo-réduction.



## Les porteurs de charges sont les ions

**L'électro-diffusion** : Dans un électrolyte, les anions et cations n'ont pas la même mobilité. Ainsi, sous l'effet d'un gradient de concentration, les ions vont diffuser à des vitesses différentes, engendrant un déséquilibre de charge électrique et donc une densité de courant nette. Généralement faible (10 à 40 mV) voire négligeable

**L'électro-filtration** : Lorsque ces ions sont transportés par les molécules d'eau lors d'un écoulement dans le milieu poreux d'une roche, il se crée une source de courant d'origine électrocinétique. Nous verrons que ce phénomène est l'une des sources principales du potentiel spontané

Modèle 3 couches,

- Stern = cations adsorbés
  - ✓ Plan interne de Helmholtz = cations accolés au solide
  - ✓ Plan externe de Helmholtz = attraction électrostatique

• Diffuse (Gouy-Chapman) = cations permettant d'équilibrer déficit de charge à la surface du minéral

• Eau libre

En l'absence de mouvement, les charges se compensent et le système reste globalement électriquement neutre.

Lors d'un mouvement du fluide dans l'espace poral connecté (i.e. gradient de pression hydrique), les ions de l'électrolyte libre ainsi que les charges en excès de la couche diffuse vont être entraînés dans la direction de l'écoulement → courant électrique dit convectif. éventuellement mesurables à la surface du sol.

Ce mouvement relatif entre le solide et le liquide induit un cisaillement de la couche diffuse à quelques Å de la couche de Stern.

Plan de cisaillement = surface hydrodynamique où la vitesse du fluide nulle lorsque l'eau circule. Le potentiel électrique sur ce plan de cisaillement est

