

# *L'accoppiamento sismoelettromagnetico: evidenze e prospettive per lo studio dei fluidi all'interno della Terra*

Siniscalchi A. <sup>(1)</sup>, Romano G. <sup>(1)</sup>, Balasco M. <sup>(2)</sup> and Tripaldi S. <sup>(1)</sup>



<sup>1</sup>*Università di Bari, Dipartimento di Scienze della Terra e GeoAmbientali,  
Bari, Italia.*



<sup>2</sup>*Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale, CNR,  
Tito Scalo - Potenza, Italia.*

## *Sommario*

La risposta elettromagnetica connessa ad un'azione meccanica nel sottosuolo supposto disomogeneo con porosità e contenuto in fluidi variabile

- Da un punto di vista delle modificazioni permanenti (fratturazione permanente della roccia con ingresso di fluidi) mediante il parametro macroscopico resistività elettrica (monitoraggio magnetotellurico)
- Da un punto di vista dei transienti indotti da sorgenti meccaniche siano esse naturali o artificiali (effetti sismoelettromagnetici)

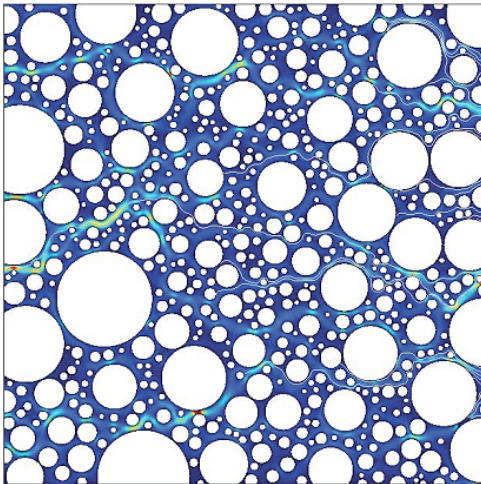
**Roccia:** *aggregato di minerali*

Porosità

Permeabilità

Fluidi (composizione, salinità)

Mezzo poroso saturato  
da fluidi (o parzialmente  
saturato)

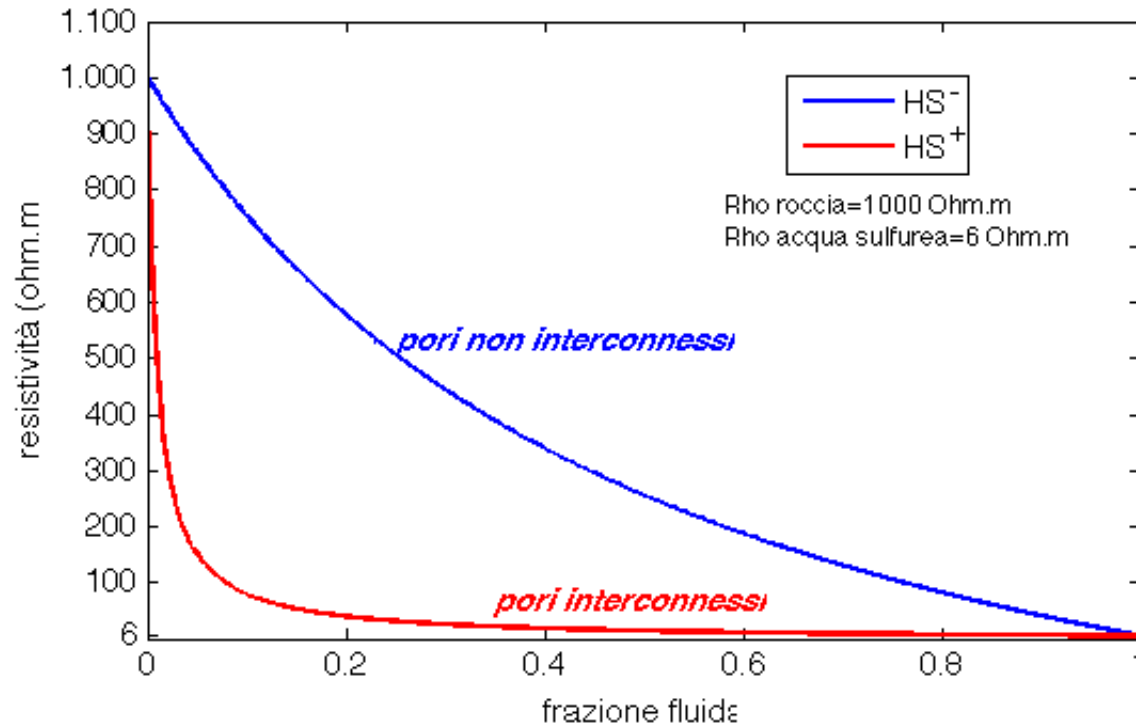


*Comsol, Typical example of simulated fluid flow  
through porous media; Image by: E. Holzbecher, S.  
Oehlmann, Georg-August University Göttingen.*



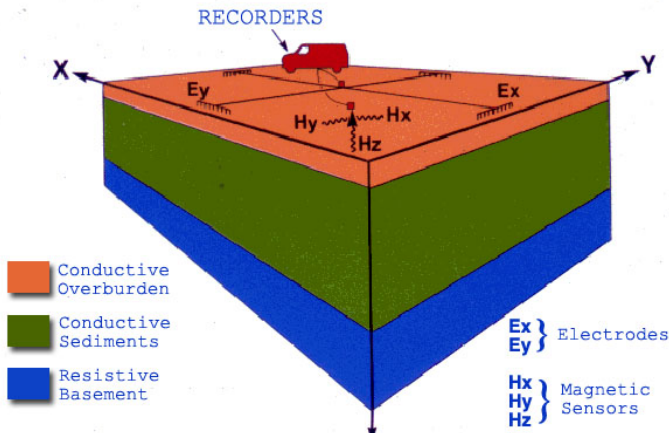
## Effetti sulla resistività in presenza di fluidi

Molti modelli per la stima della resistività del sistema roccia contenente fluidi. Ad esempio, nell'ipotesi di mezzo a 2 fasi omogeneo e isotropo il modello Hashin-Shtrikman (1962) individua due limiti (bounds) per la minima e la massima conducibilità del sistema.



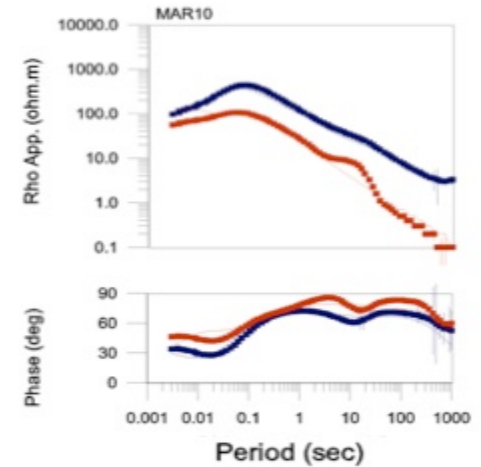
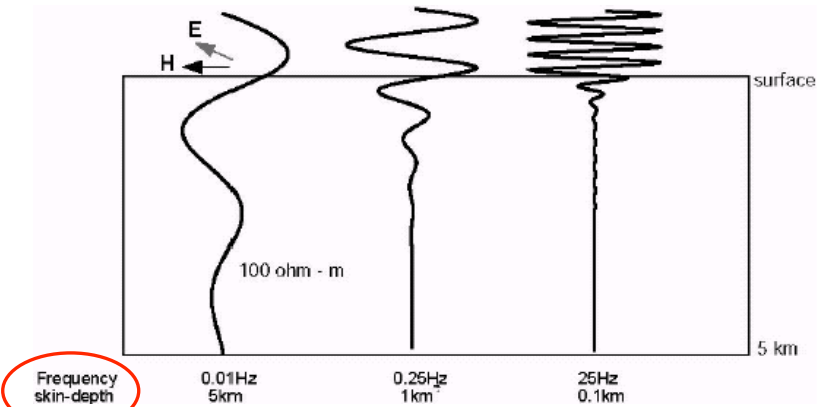
# Magnetotellurica

Misura simultanea delle componenti variabili dei campi elettrico e magnetico naturali



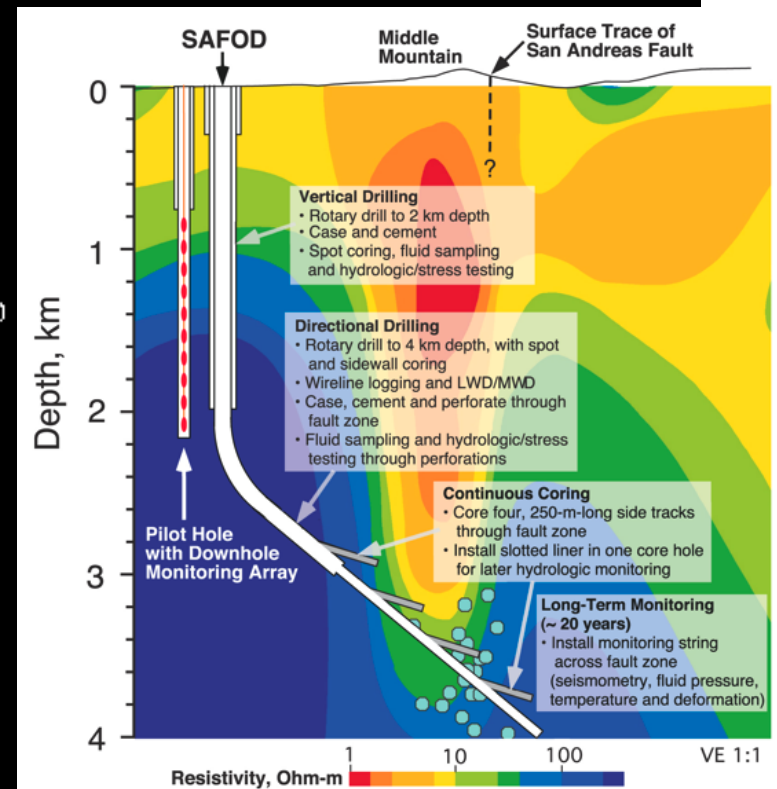
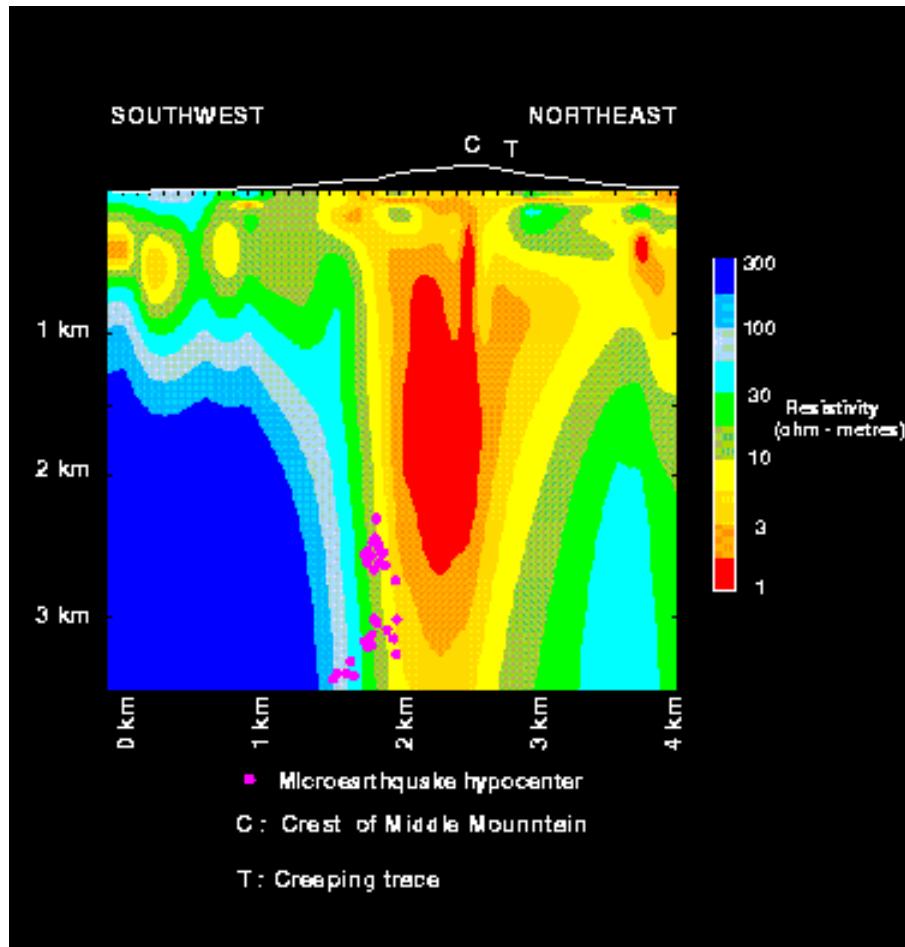
$$\begin{pmatrix} E_x(\omega) \\ E_y(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx}(\omega) & Z_{xy}(\omega) \\ Z_{yx}(\omega) & Z_{yy}(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x(\omega) \\ H_y(\omega) \end{pmatrix}$$

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu} \left( \frac{E}{H_{\perp}} \right)^2$$



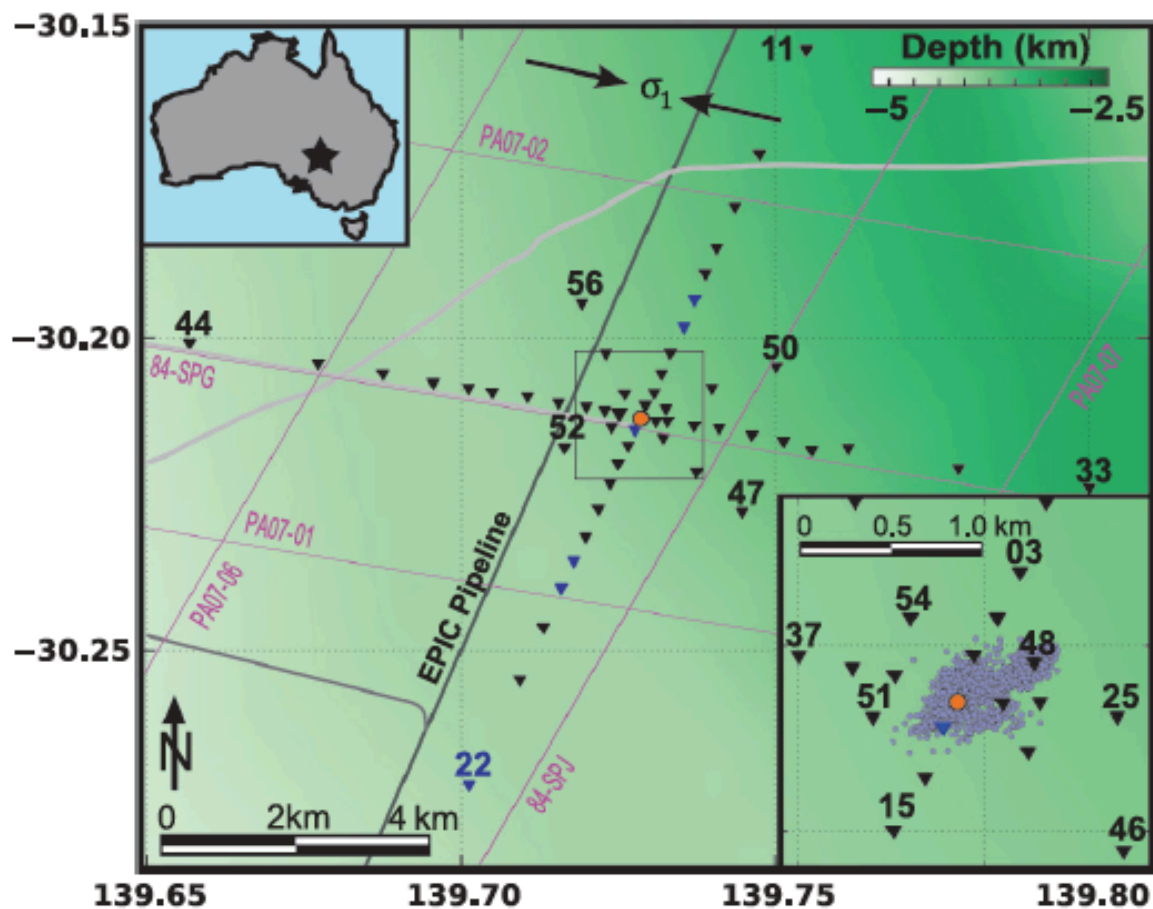
L'intervallo di frequenza controlla la profondità di esplorazione.

# Parkfield: il modello di resistività è il modello di riferimento ....



*Link Wikipedia: San Andreas Fault Observatory at Depth*

# Risposta MT nell'area interessata da un pozzo durante Fratturazione idraulica



● Pozzo di iniezione

▼ Stazioni MT

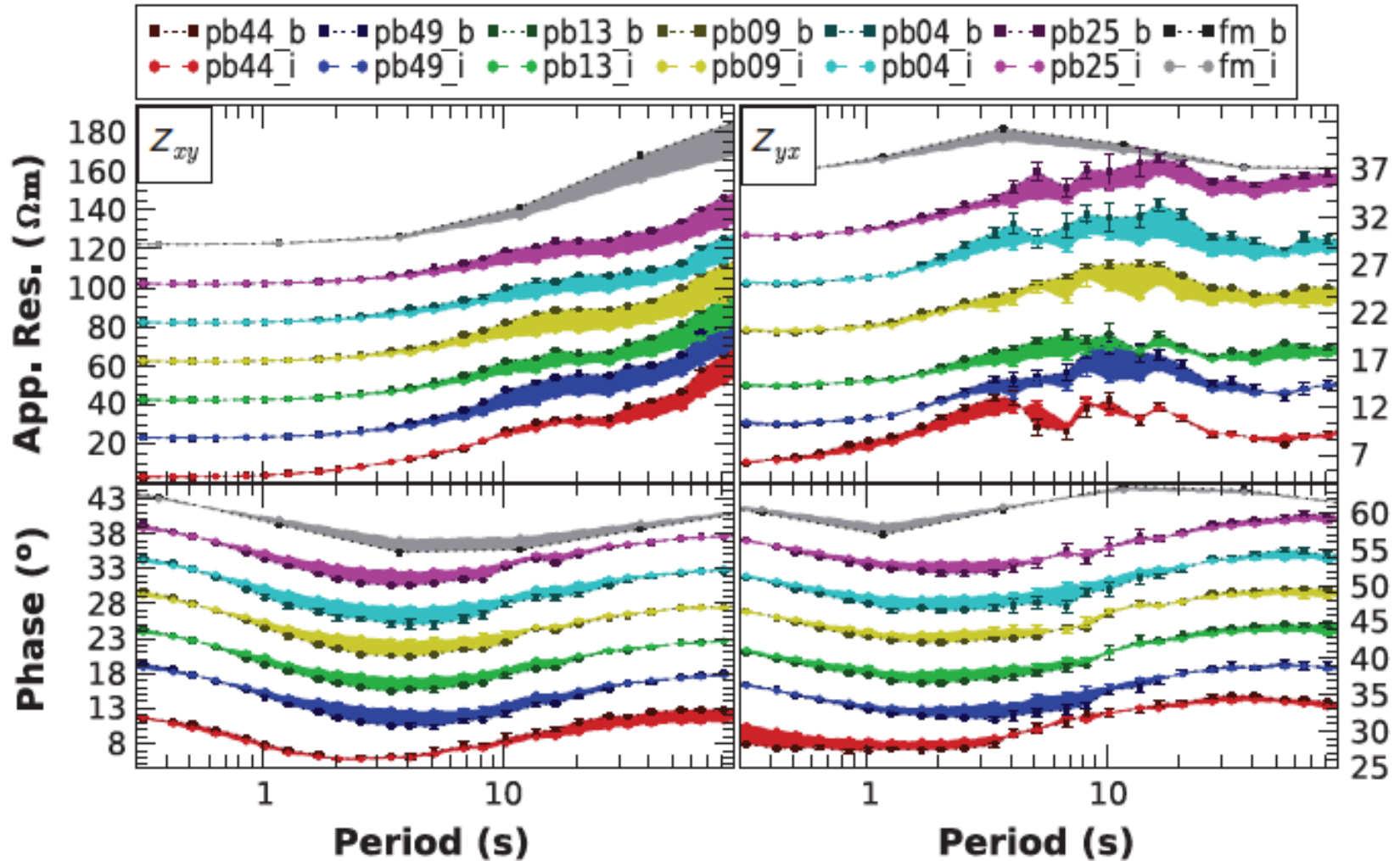
SPG ( $\approx$  W-E)  
linea di sismica a riflessione

Nota: Esperimento con  
profilo MT ripetuto nel  
tempo

(Peacock et al., 2013)

Il colore di fondo è in relazione alla profondità del basamento dedotta dalla gravimetria

## Variazioni della funzione risposta MT osservate



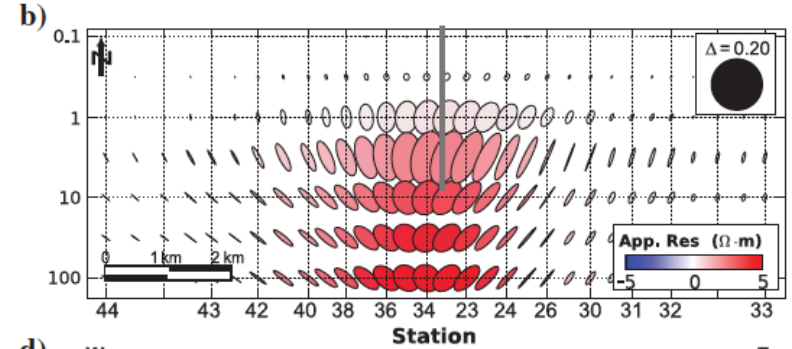
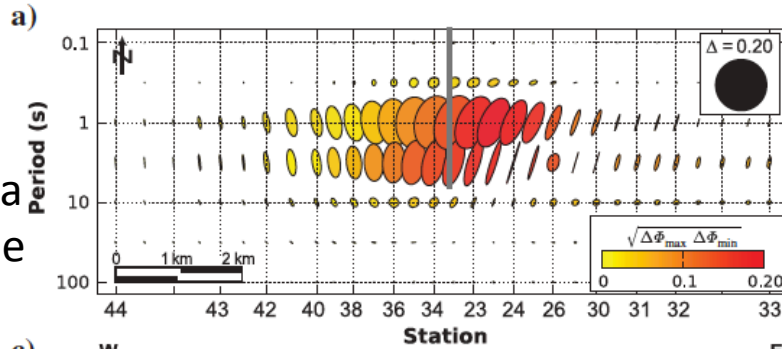
(Peacock et al., 2013)



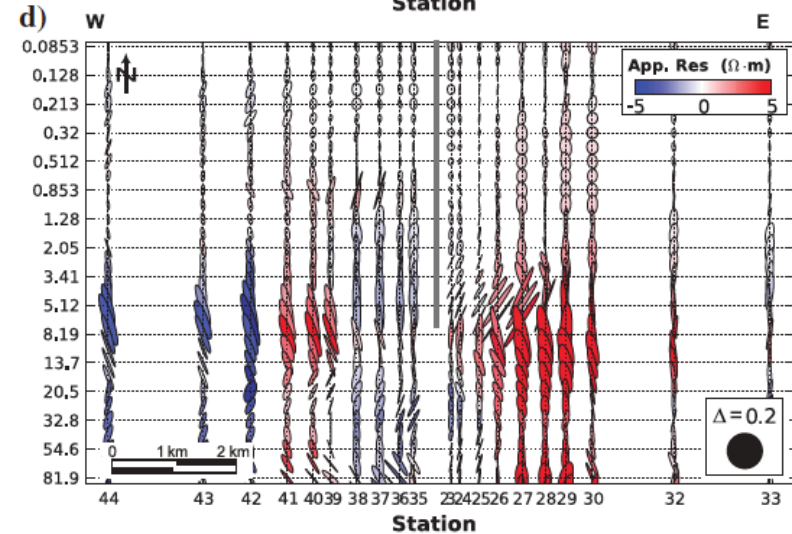
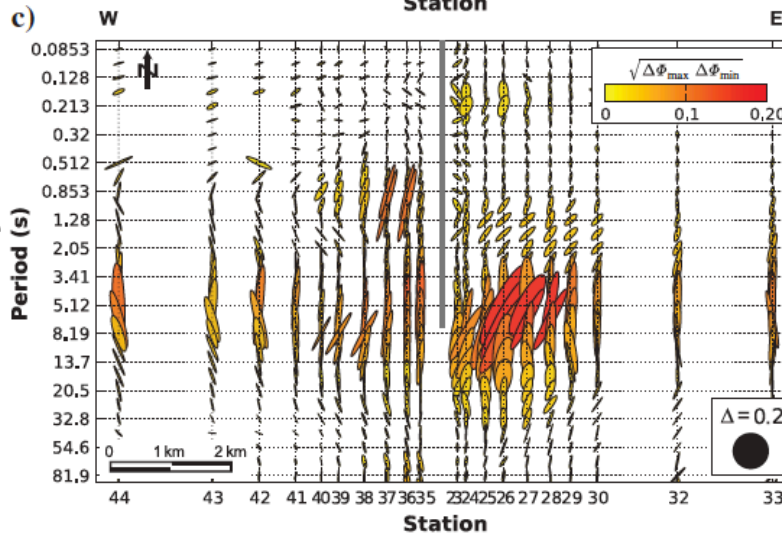
## Variazioni di fase

## Variazioni di resistività apparente

Attese dalla  
simulazione

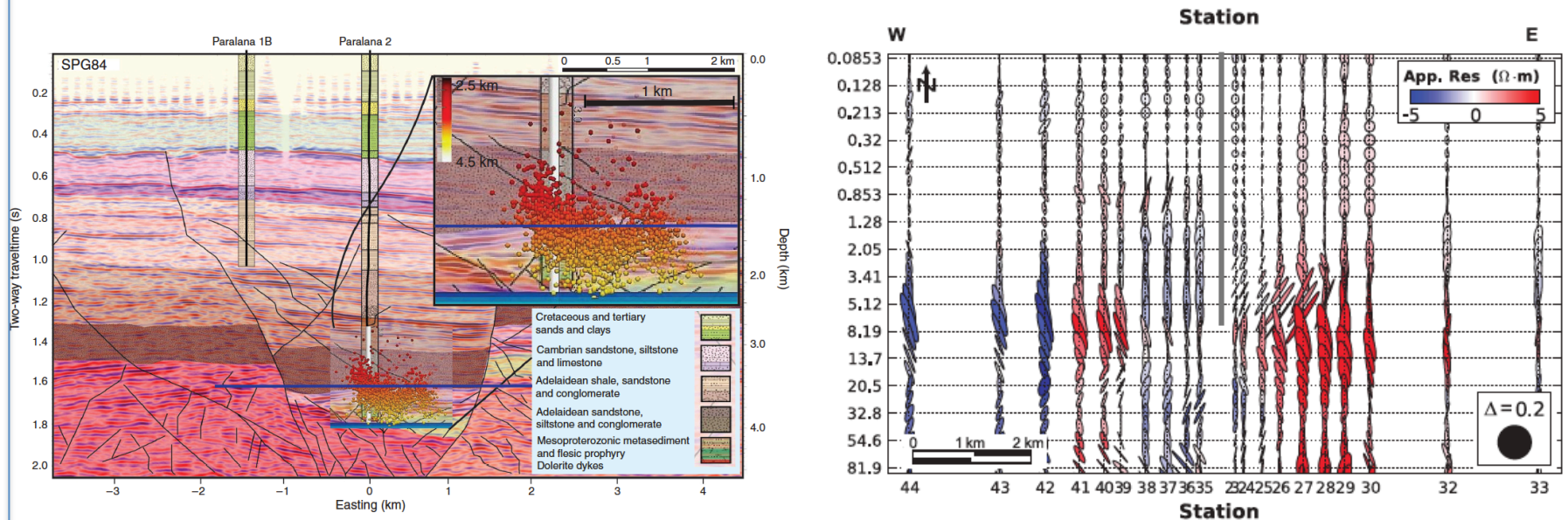


Osservate



(Peacock et al., 2013)

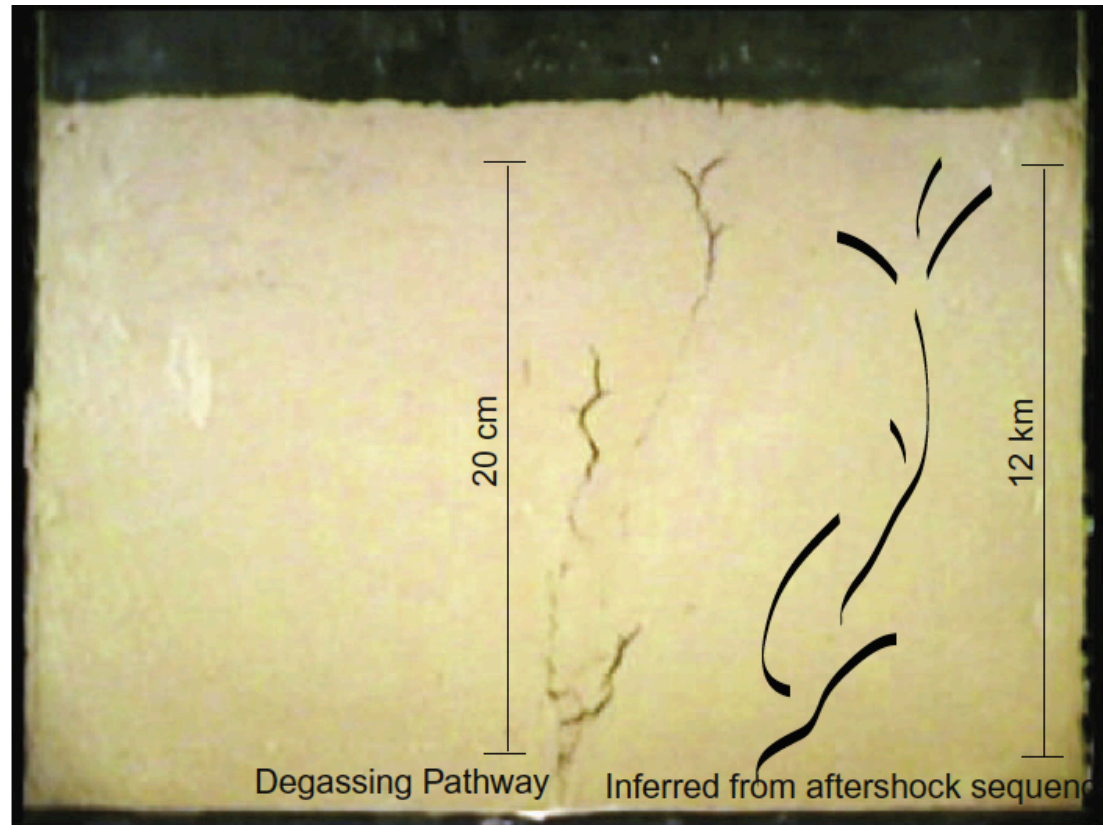
L'asimmetria rispetto al pozzo di iniezione è dovuta alla direzione di fratturazione preferenziale del corpo geologico soggetto al fracking come testimoniato dalla distribuzione dei micro-terremoti



(Peacock et al., 2013)

L'idro-fratturazione richiama una maggiore quantità di fluidi all'interno degli spazi vuoti generati e ciò determina un abbassamento della resistività elettrica nella regione interessata.

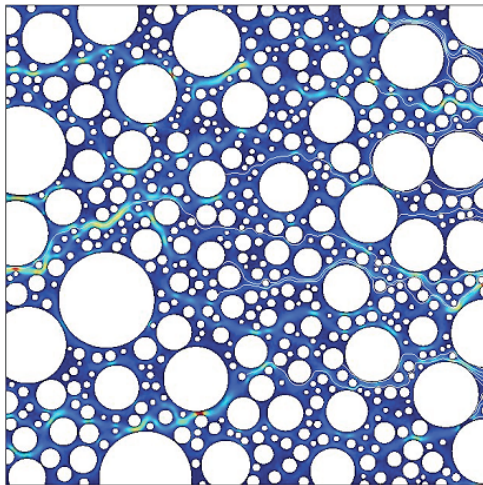
## Esperimenti di laboratorio e analisi di microterremoti



La fratturazione non è isotropa ed il volume fratturato è determinata da fattori non completamente controllabili dagli operatori.

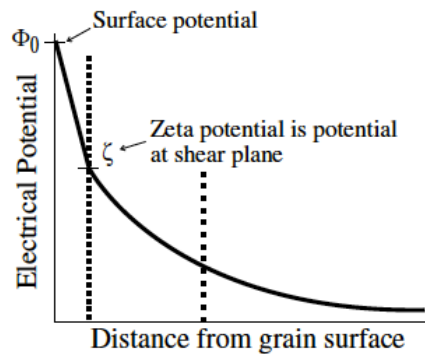
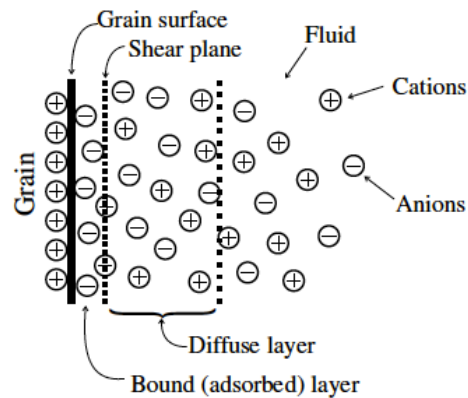
# Seismo-ElectroMagnetic Signals (SEMS)

Porous medium  
fluid-saturated (or  
partially saturated)



*Comsol, Typical example of simulated fluid flow through porous media; Image by: E. Holzbecher, S. Oehlmann, Georg-August University Göttingen.*

pore scale: electric  
double-layer model

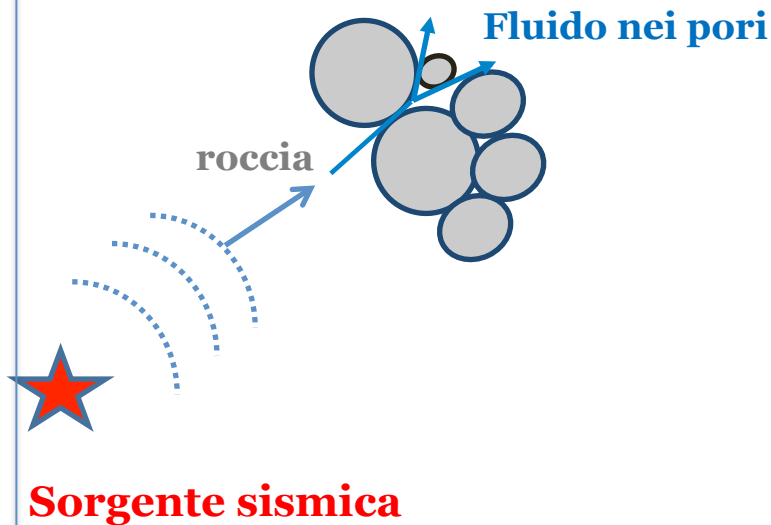


(Shaw, 1992)

Accoppiamento delle  
equazioni delle onde  
elastiche ed  
elettromagnetiche  
(Pride, 1994)

# Effetti sismoelettromagnetici

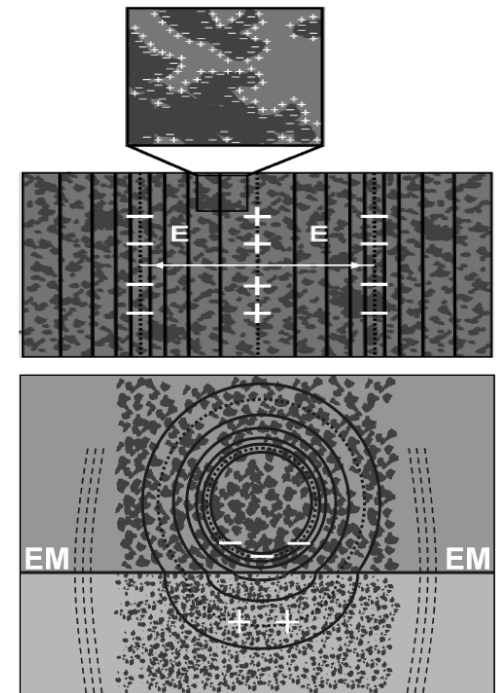
## Tre tipi di segnali em possibili:



1. Generazione di un'onda em indipendente alla sorgente (es. Hu&Gao, 2011)

2. Effetto cosismico

3. Generazione di un'onda em indipendente ad una discontinuità nella porosità e grado di saturazione



*Redrawn after Schakler (2011)*

# Equazioni sismoelettromagnetiche nei mezzi porosi

Per ogni frequenza del campo d'onda  $e^{-i\omega t}$

## Equazioni del campo d'onda sismico (Biot-Gassmann)

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = -\omega^2 [\rho \mathbf{u} + \rho_f \mathbf{w}] - \mathbf{F}$$

$$\boldsymbol{\tau} = [K_G \nabla \cdot \mathbf{u} + C \nabla \cdot \mathbf{w}] \mathbf{I} + G \left[ \nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{u} \mathbf{I} \right]$$

$$-P = C \nabla \cdot \mathbf{u} + M \nabla \cdot \mathbf{w}$$

} Equazioni costitutive

## Equazioni del campo Elettromagnetico (Maxwell)

$$\nabla \times \mathbf{E} = i\omega \mathbf{B}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = i\omega \mathbf{D} + \mathbf{J} + \mathbf{C}$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$$

} Equazioni costitutive

Dove:

- il vettore  $\mathbf{w}$  rappresenta lo spostamento della fase fluida nel materiale poroso

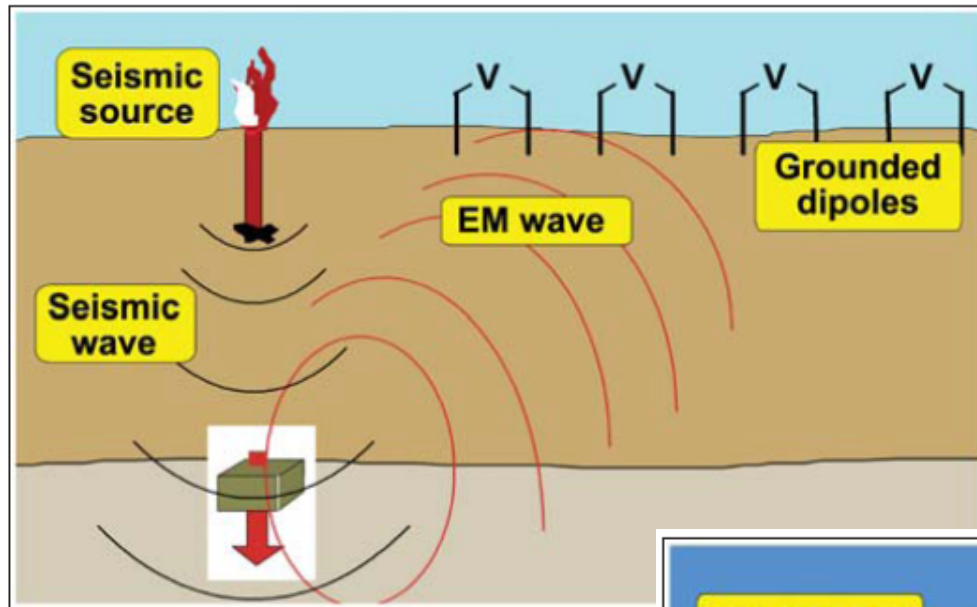
- Il simbolo  $\mathbf{C}$  indica le sorgenti

## Equazioni del trasporto (accoppiamento)

$$\mathbf{J} = L \left[ -\nabla P + \omega^2 \rho_f \mathbf{u} + \mathbf{f} \right] + \sigma \mathbf{E}$$

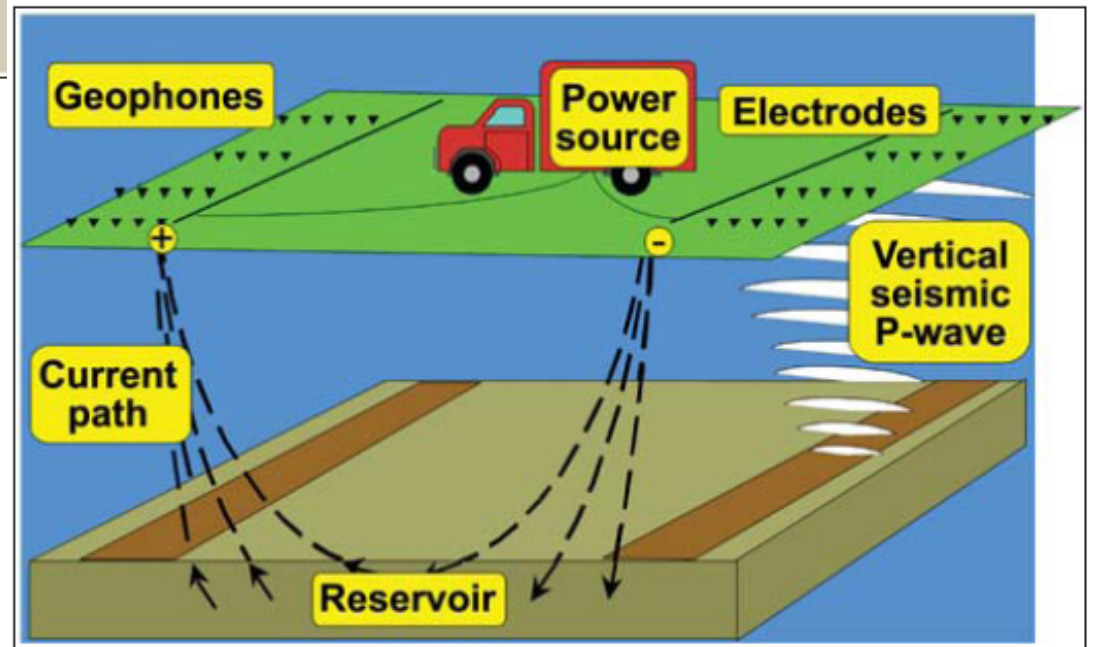
$$-i\omega \mathbf{w} = \frac{k}{\eta} \left[ -\nabla P + \omega^2 \rho_f \mathbf{u} + \mathbf{f} \right] + L \mathbf{E}$$

(Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media. Pride, 1994)

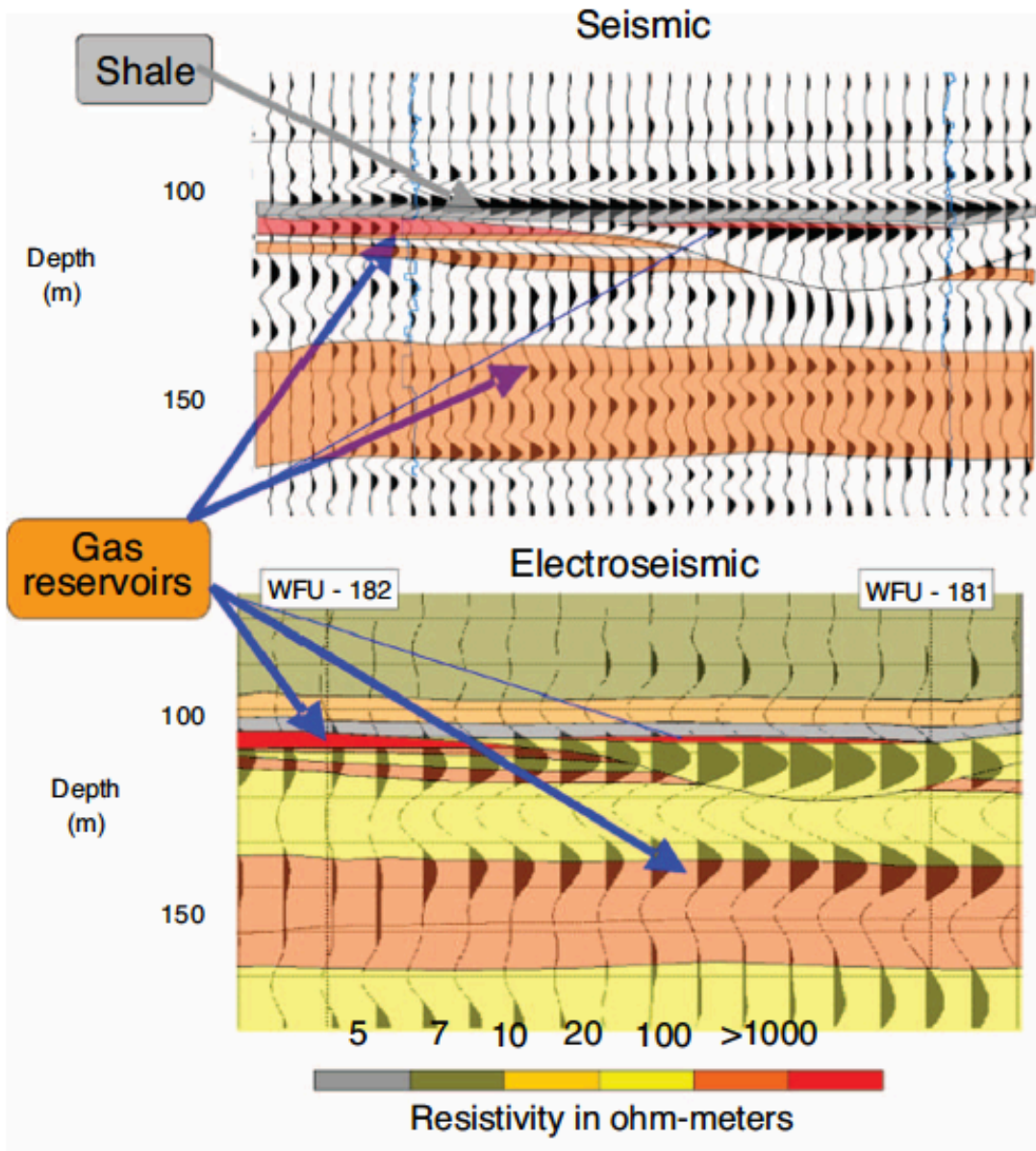


Metodo sismo-elettromagnetico

Metodo elettro-sismico



Thompson et al., 2007 (ExxonMobil, Canada)

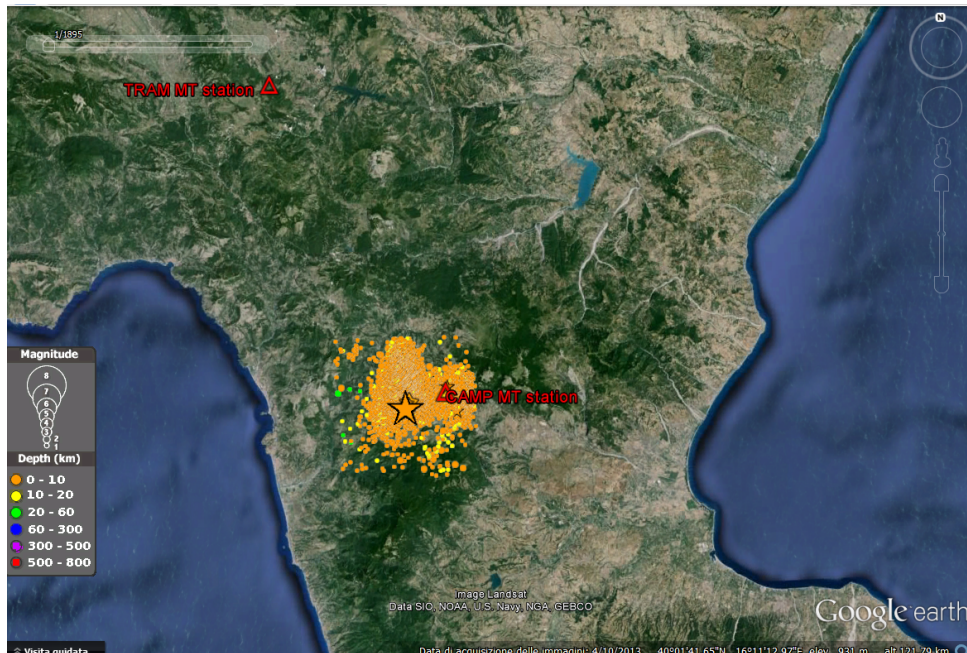


L'ampiezza del segnale elettrosismico è maggiore di quella del sismico puro

Thompson et al., 2007 (ExxonMobil, Canada)



# Monitoraggio MT in area sismica



Due stazioni MT (Hx, Hy, Ex, Ey)  
in registrazione continua in Italia  
Meridionale

Frequenza di campionamento:  
6.25 Hz

1<sup>a</sup> Condizione Favorevole : uno dei due  
siti ubicato proprio nell'area epicentrale  
dello sciame sismico del Pollino nel  
periodo 2012-2014

# *Segnali sismoelettromagnetici*

**Oggetto:** Rilevabilità dei segnali SEMS durante

- Terremoti
- Esperimenti di sismica attiva

**Metodi:** Analisi con la Wavelet Morlet

Individuazione dell'intervallo di frequenze

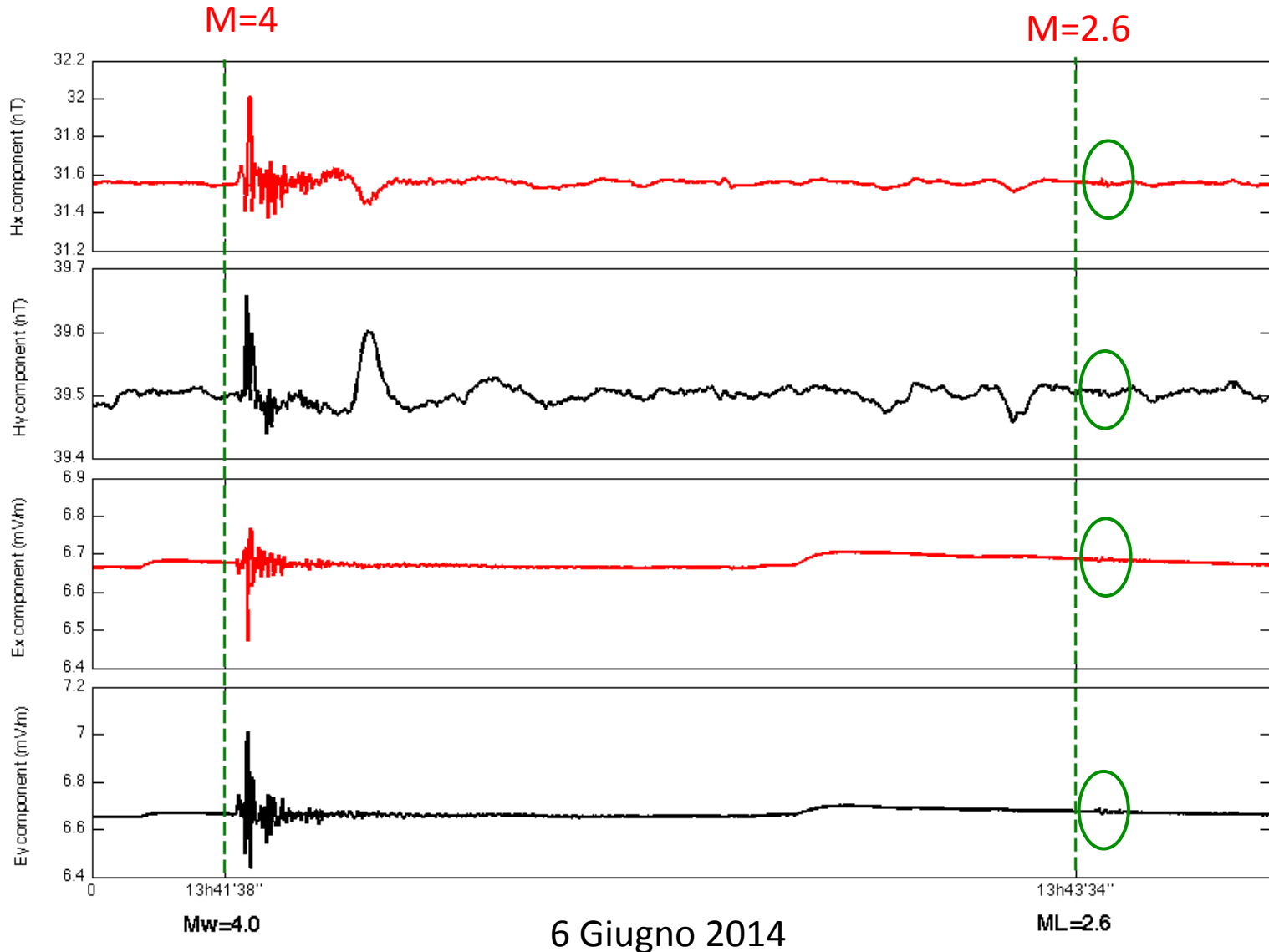
Filtraggio dei dati (zero-phase shift)

Stima del rapporto S/N

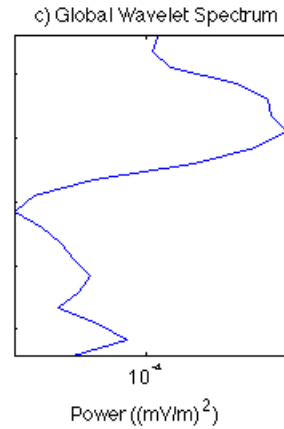
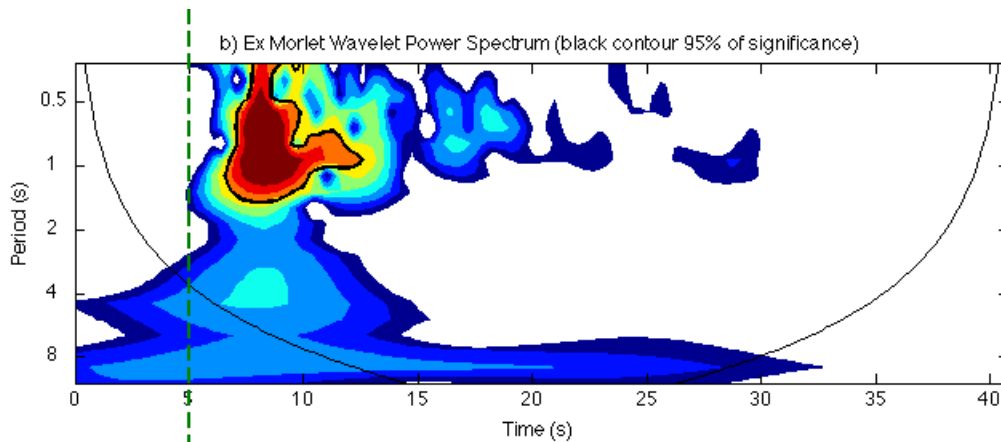
Stima delle ampiezze dei segnali SEMS

# Rilevabilità dei segnali SEMS durante il verificarsi di Terremoti

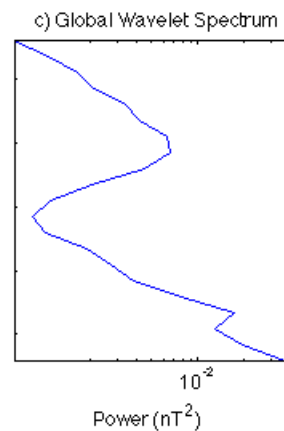
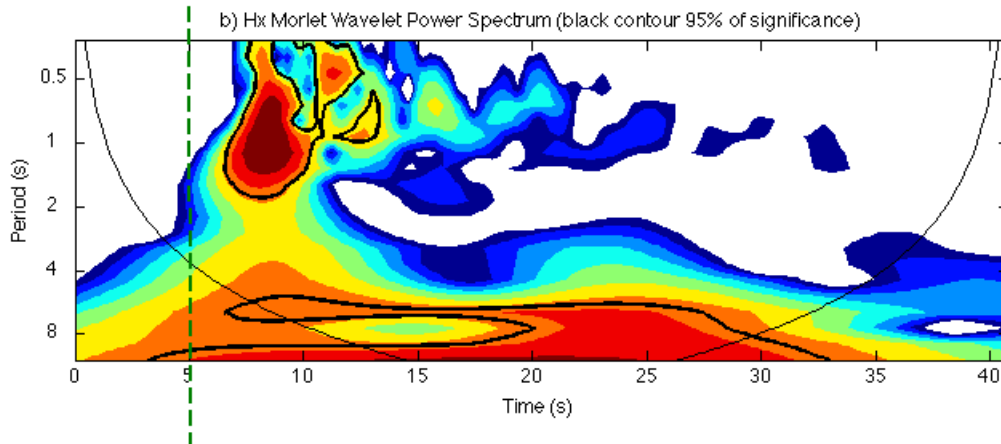
## Esempio di segnali sismoelettromagnetici registrati nella stazione MT del Pollino



# Morlet Wavelet Analysis



Sulle componenti del  
campo elettrico



Sulle componenti del  
campo magnetico

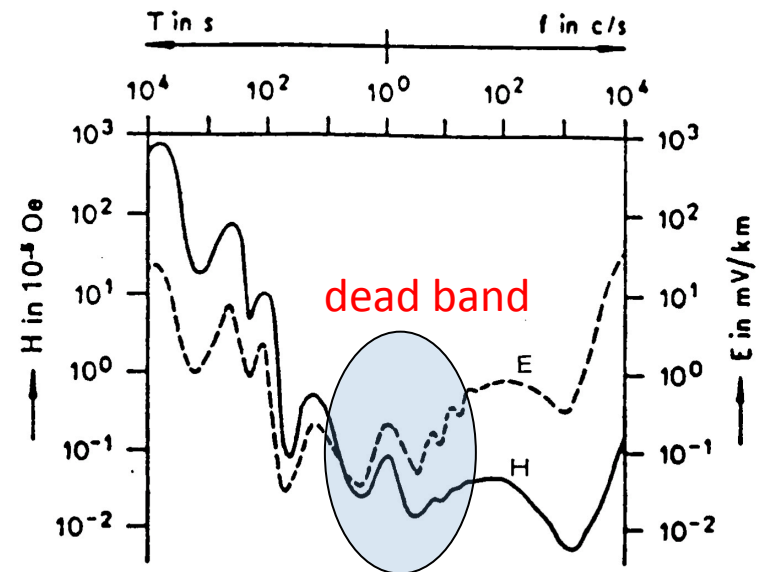
**Evento sismico**

## Morlet Wavelet: risultati

*Sia le componenti del campo elettrico che di quello magnetico indotte dall'evento sismico appaiono confinate a periodi maggiori di 2s durante eventi locali (distanza epicentrale <50 km)*

*(il periodo più basso, 0.32 s, è condizionato dalla frequenza di campionamento adottato nella misura in continuo)*

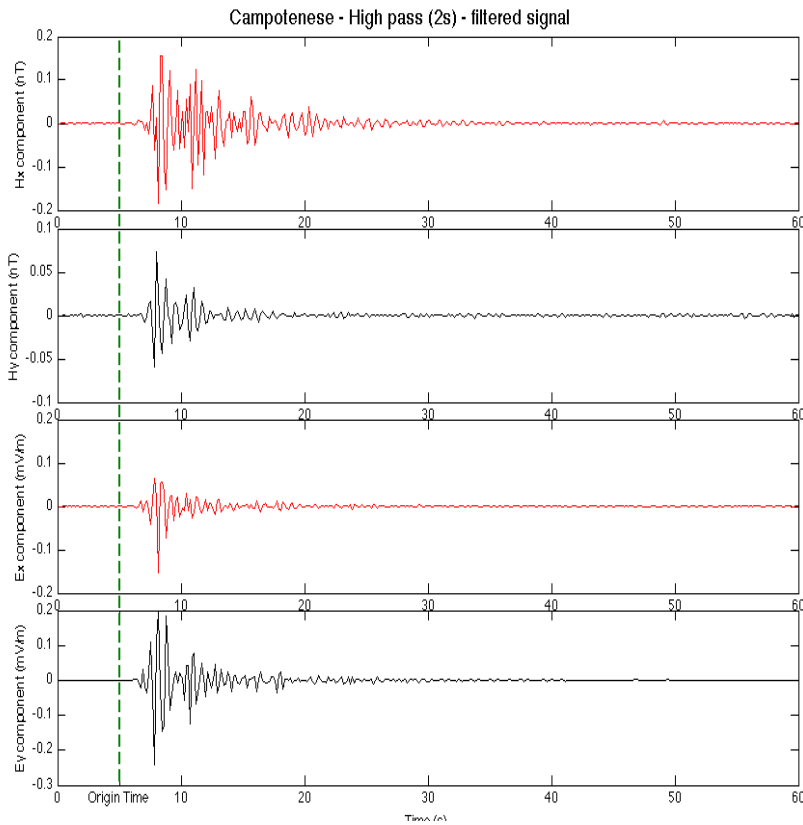
Ciò significa che i SEMS cadono nell'intervallo della cosiddetta MT dead band:



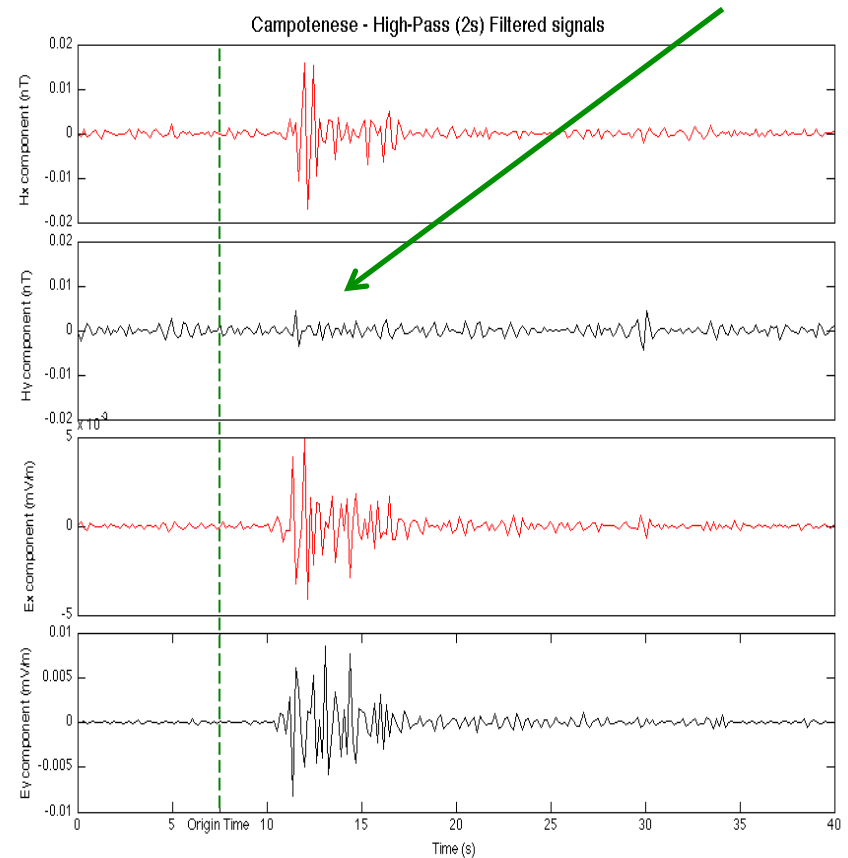
2<sup>a</sup> Condizione Favorevole che ci ha dato l'opportunità di verificare la ripetibilità del fenomeno e di costruire un data-base completo per possibili indagini statistiche.

# Filtro passa-alto (zero-phase shift)

M=4

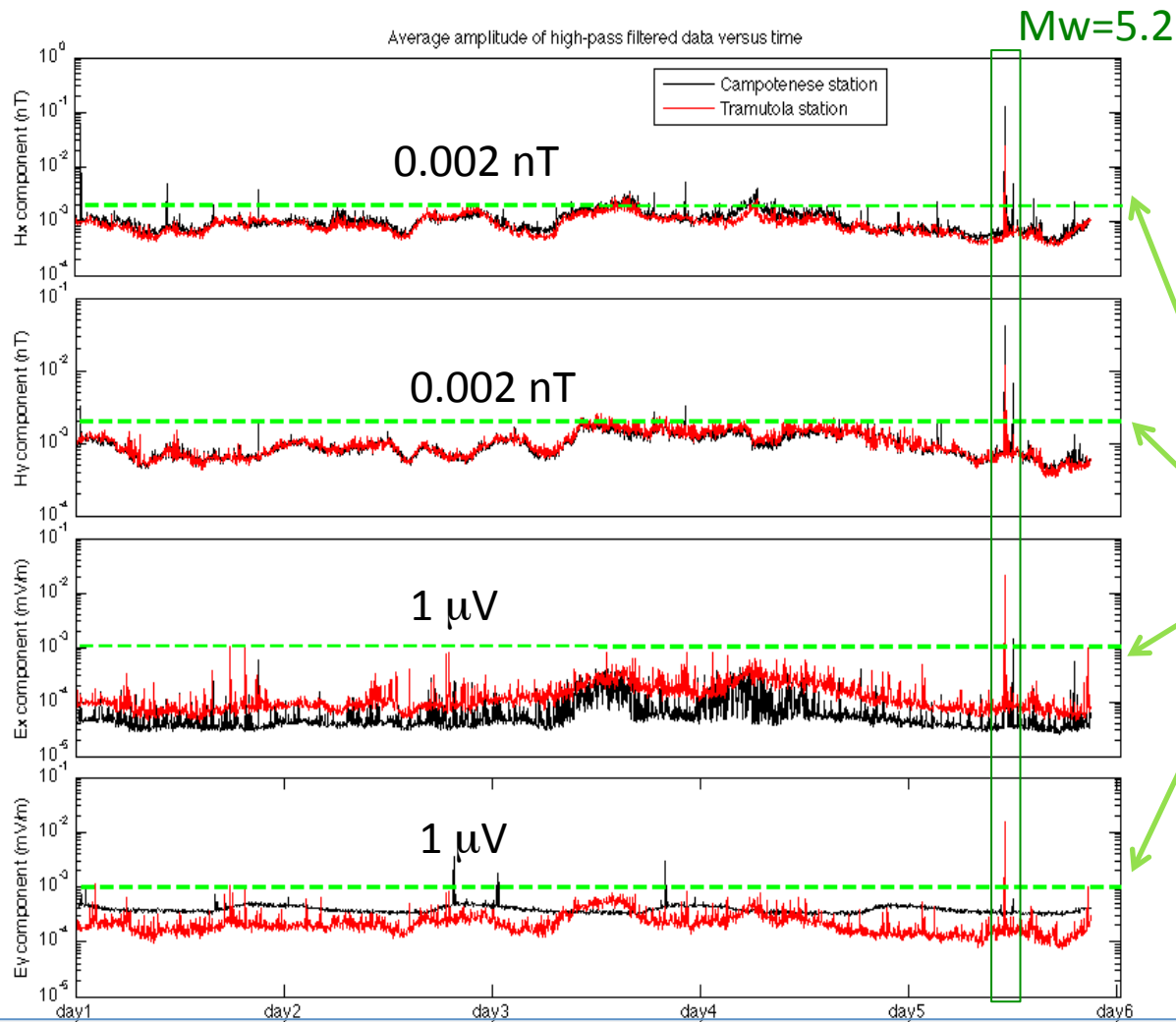


M=2.6 No SEMS registrati su Hy (W-E)



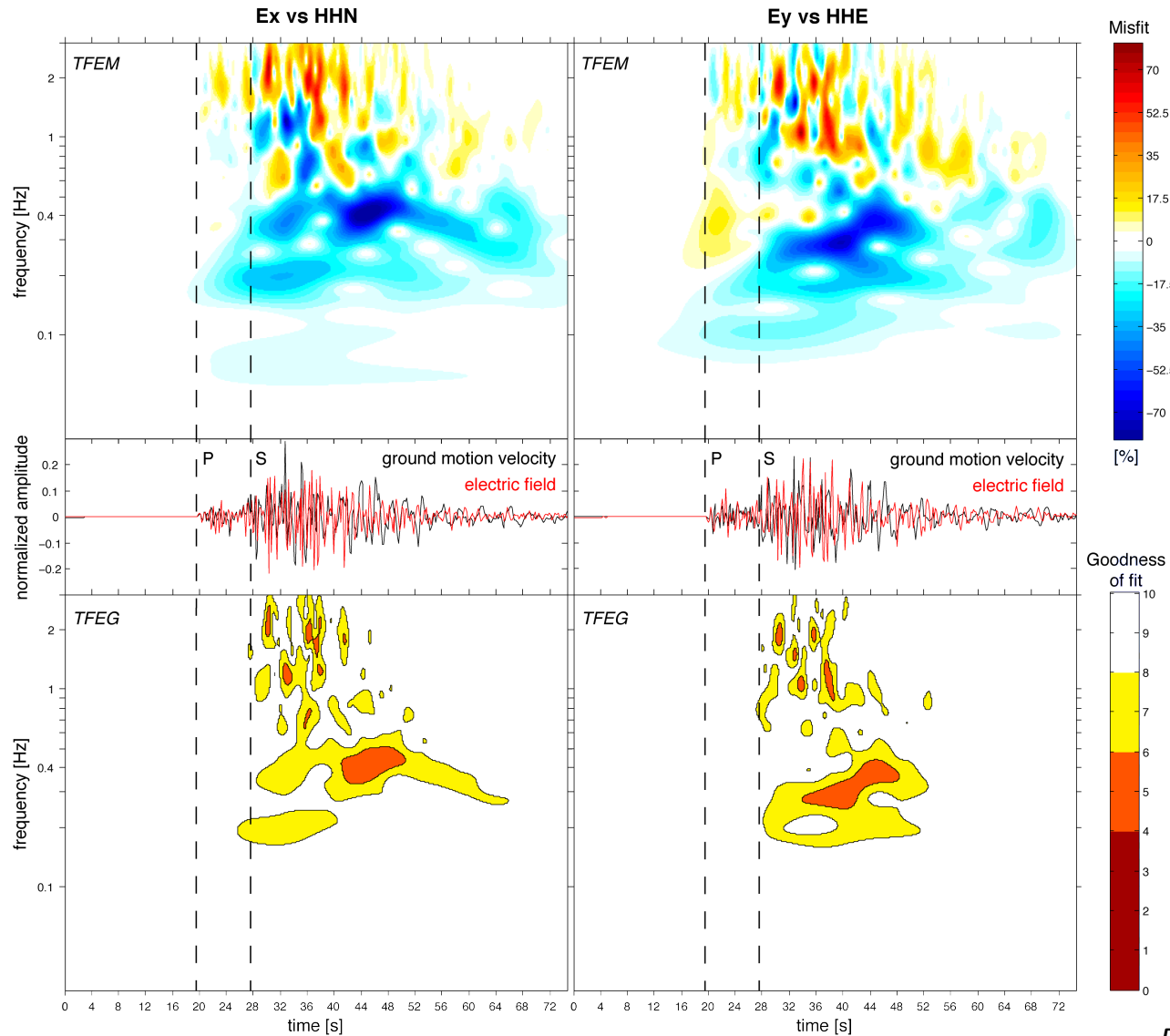
Ciò supporta ulteriormente l'ipotesi che non si tratti di movimento dei sensori magnetici

# Segnale MT stimato nell'intervallo di frequenze dei segnali SEMS



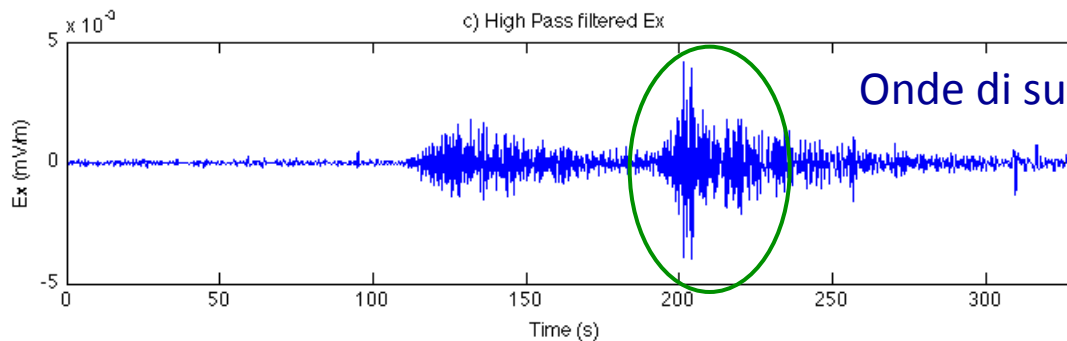
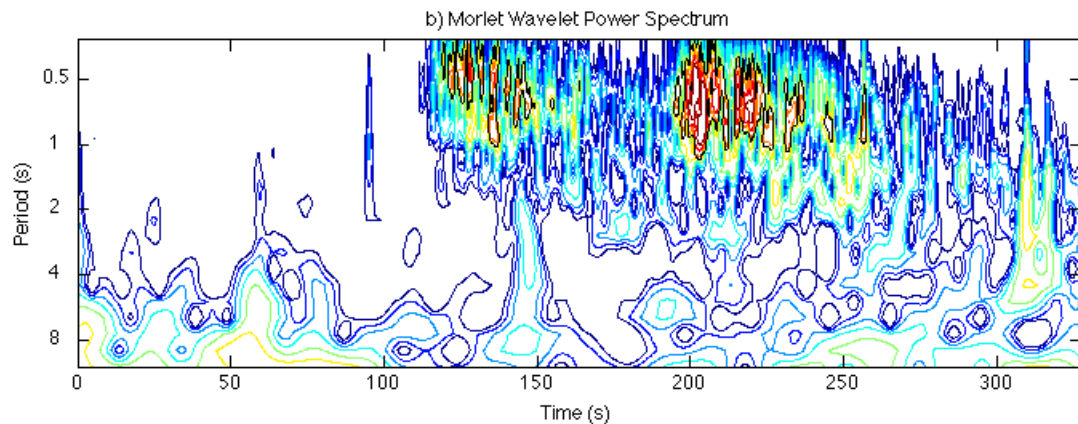
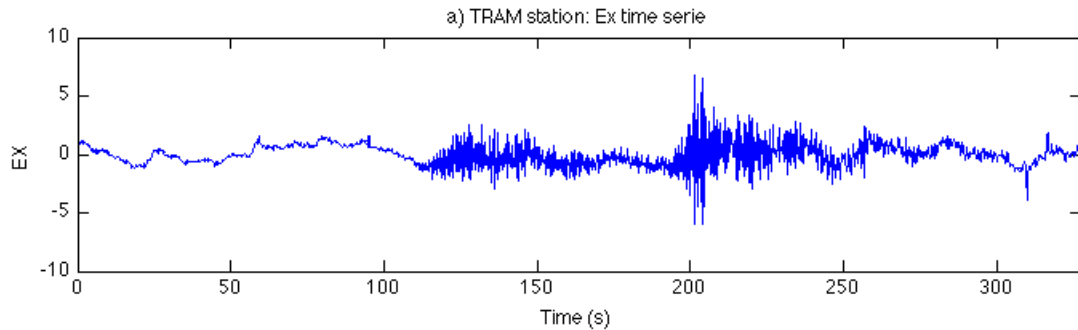
Soglie di rilevabilità del segnale in ciascuna componente del campo em

# Confronto diretto tra velocità e segnali em

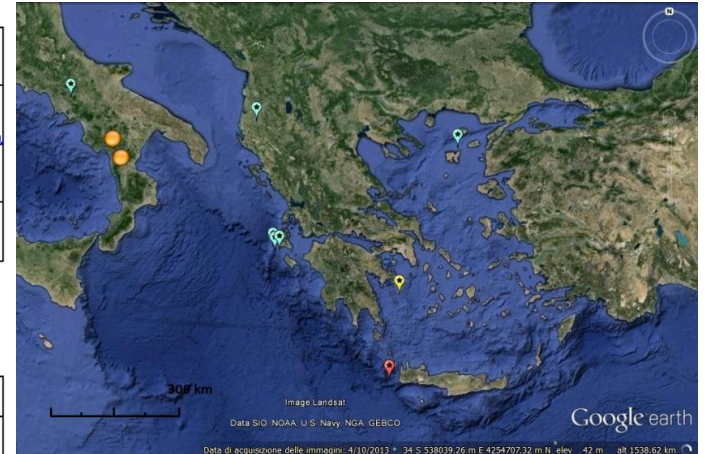




# Rilevabilità di terremoti anche a grande distanza



Onde di superficie



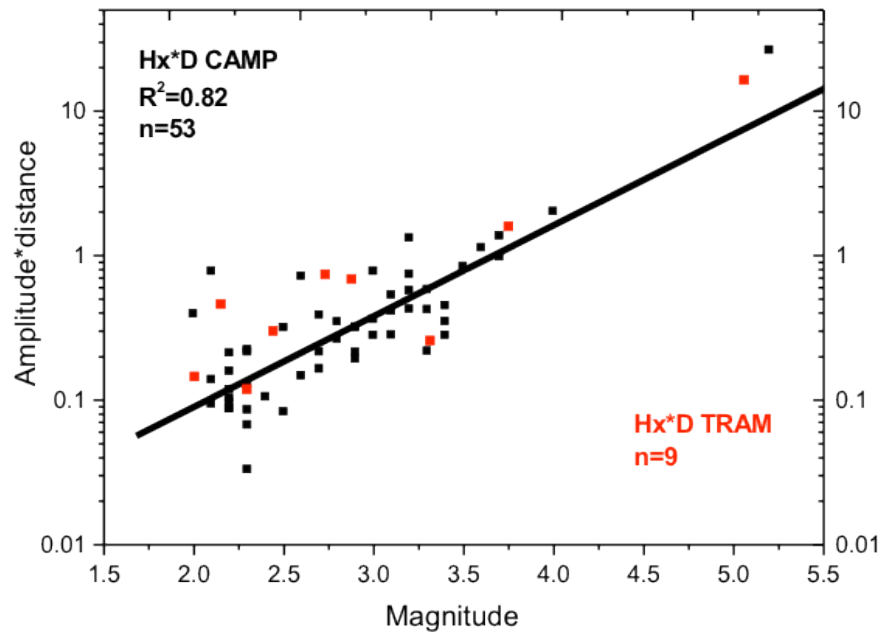
Creta

M=6.4;profondità=52km

Distanza ipocentrale=844 km

I Segnali SismoElettromagnetici registrati sono :

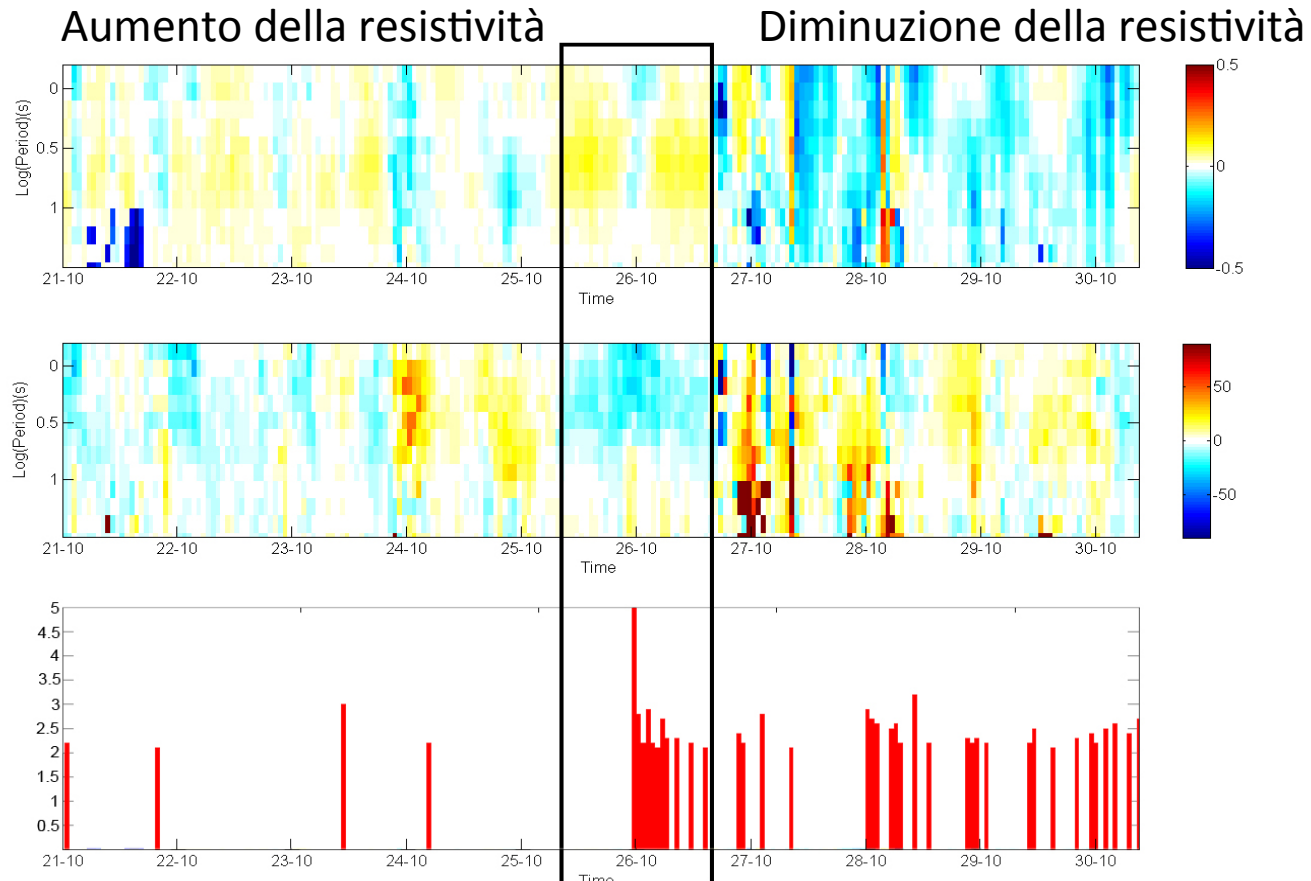
- Generalmente confinati a 2 s come massimo periodo
- Con ampiezza maggiore del campo MT naturale nella stessa banda di frequenza
- Le condizioni per la loro 'rilevabilità' possono essere predette



Ampiezza predetta della componente Ex amplitude per un sottoinsieme di terremoti lontani, fino a 900 km di distanza: in giallo quelli registrati in modo chiaro (al di sopra della soglia di rilevabilità)

Origin time (UTC)	Lat	Long	Prof (km)	M	Dist TRAM (km)	A TRAM ( $\mu\text{V}/\text{m}$ )
12/10/2013 13:11:53.000	35.52	23.28	52.0	6.4	844.3	2.893044
29/12/2013 17:08:43.640	41.369	14.44	12.2	5.0	165.7	2.568061
24/05/2014 09:25:01.400	40.29	25.4	27.0	6.9	813.2	1.579976
03/02/2014 03:08:46.000	38.29	20.31	10.0	5.8	447	1.443394
26/01/2014 13:55:44.000	38.23	20.48	10.0	5.9	463.1	1.064159
01/02/2014 16:33:40.000	38.21	20.36	2.0	5.0	455.2	0.480116
21/07/2013 01:32:24.640	43.501	13.67	8.4	4.9	397.6	0.449804
15/02/2014 07:31:17.800	38.34	20.28	2.0	4.9	441.7	0.427668
19/05/2014 00:59:20.000	40.95	19.82	2.0	4.8	346.2	0.416032
05/03/2014 12:49:21.600	38.159	20.27	10.0	4.8	451.9	0.389839
08/01/2013 14:16:09.000	39.64	25.55	11.0	5.8	832.6	0.38335
26/01/2014 18:45:07.620	38.205	20.36	10.0	5.1	455.5	0.354039
04/04/2014 20:08:06.520	37.265	23.61	142.9	5.6	768.2	0.346533
07/08/2013 09:06:51.000	38.7	22.68	10.0	5.1	615.4	0.33386
18/11/2013 07:58:41.590	43.638	17	9.2	4.8	384.2	0.331381
20/01/2014 06:00:15.000	41.27	19.46	10.0	4.5	326	0.281783

Durante l'evento Mw=5.2 sono state osservate anche modificazioni della resistività apparente e fase nel sito MT ubicato nell'area epicentrale



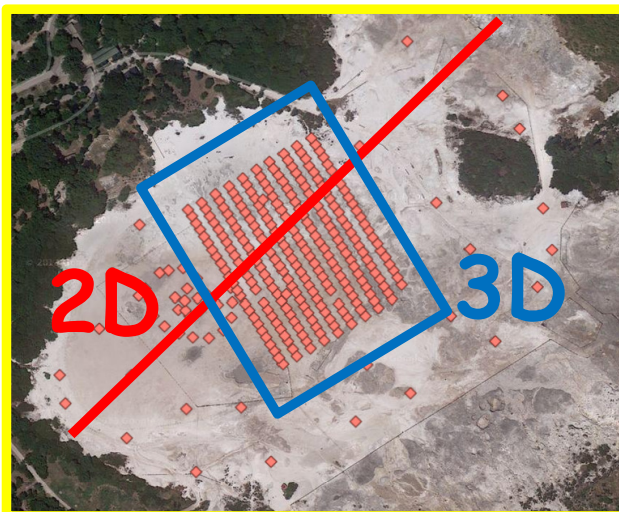
Ma nell'esperienza di oltre 7 anni di monitoraggio (Romano et al., 2014) ... abbiamo riscontrato variazioni paragonabili anche in altri segmenti non interessati da fenomeni sismici

RICEN è un esperimento di sismica attiva realizzato all'interno della Solfatara, Campi Flegrei, Napoli (Festa et al., 2014)

MEDiterranean SuperSite Volcanoes  
**MED-SUV**

**RICEN (I act)**  
Repeated and Induced Earthquakes and Noise

**RISSC**



May 19-23, 2014

Vibroseis



Changes in the structure at  
**Solfatara**

**RICEN 2D** (Seismic, electric and magnetotelluric survey).  
350 m profile

**RICEN 3D**  
Central grid di 110 x  
90 m<sup>2</sup>

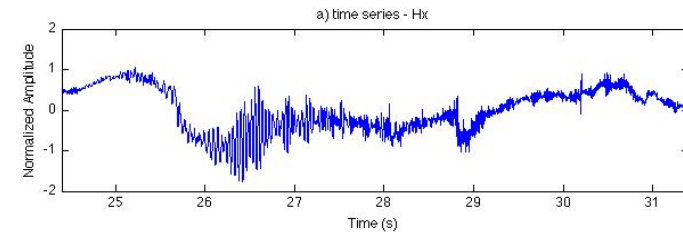
3 stazioni MT in  
registrazione  
continua durante  
l'esperimento  
per analizzare  
eventuali SES

Frequenza di  
campionamento  
=500 Hz

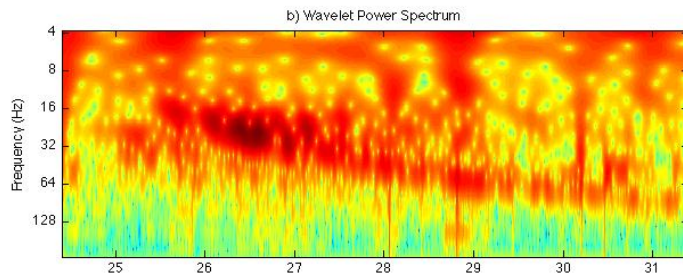


Sorgente Vibroseis: oltre 200 shots,  
ciascuno ripetuto 3 volte.

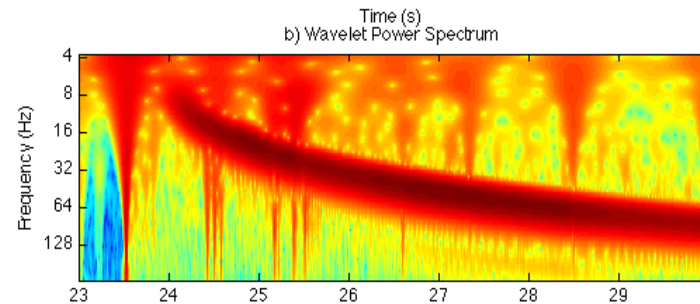
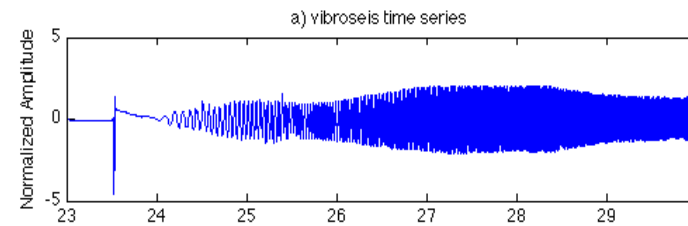
# Comfronto tra i SES e la sorgente sismica



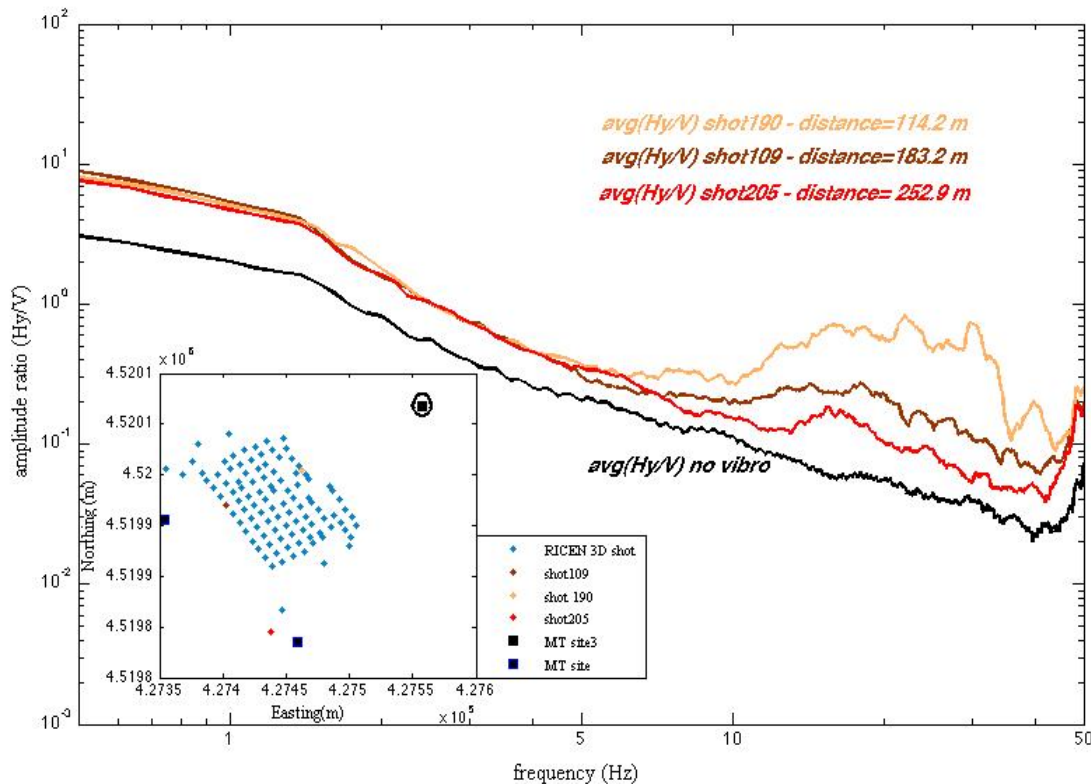
Hx filtrato (rimozione 50 Hz)



Sorgente Vibroseis



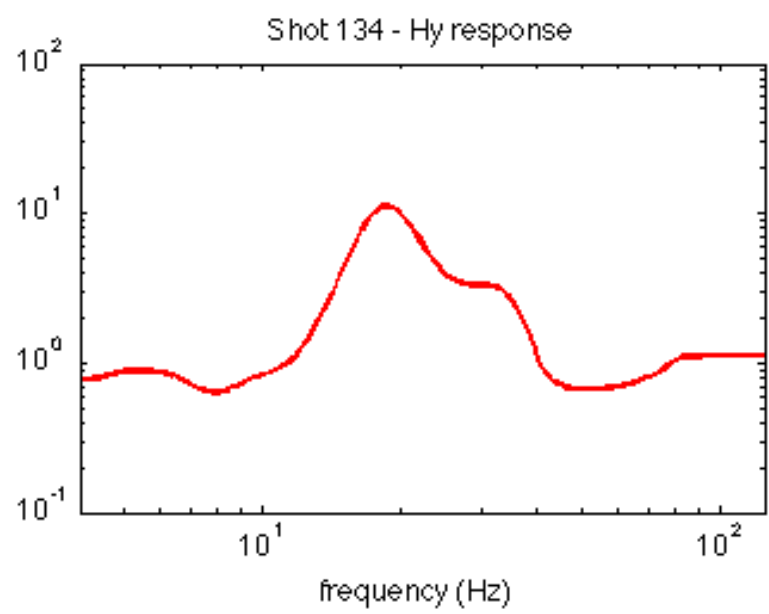
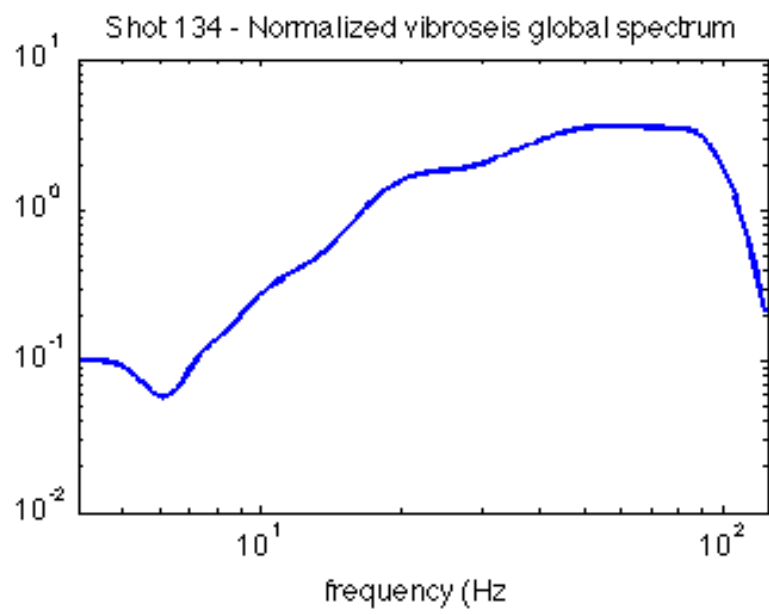
# Deconvoluzione in frequenza tra i SEMS e la sorgente Vibroseis



L'attenuazione dipende da:

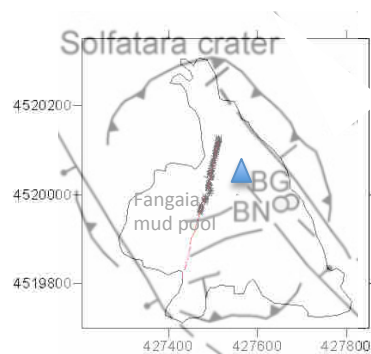
- Sito
- Distanza
- Frequenza

Per ottenere la risposta dovuta solo ai segnali SEMS bisogna rimuovere il campo MT naturale

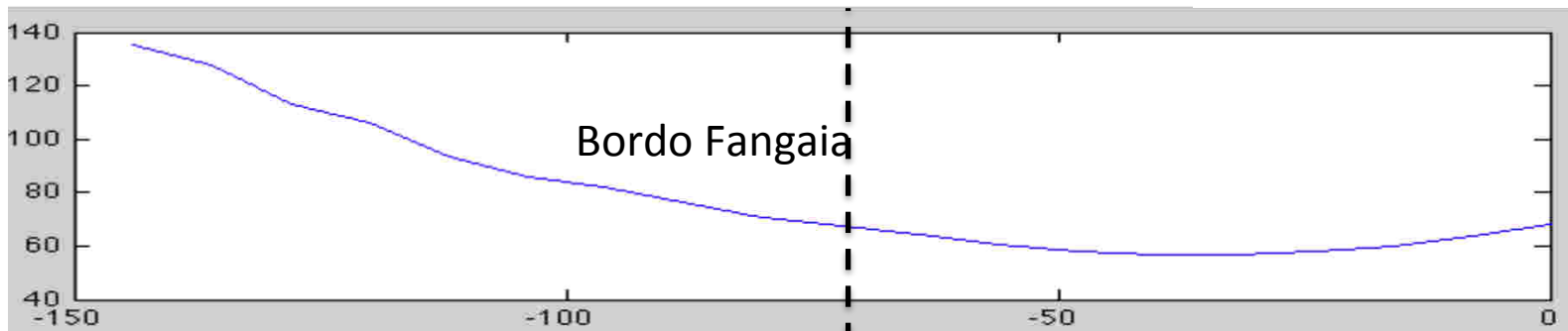




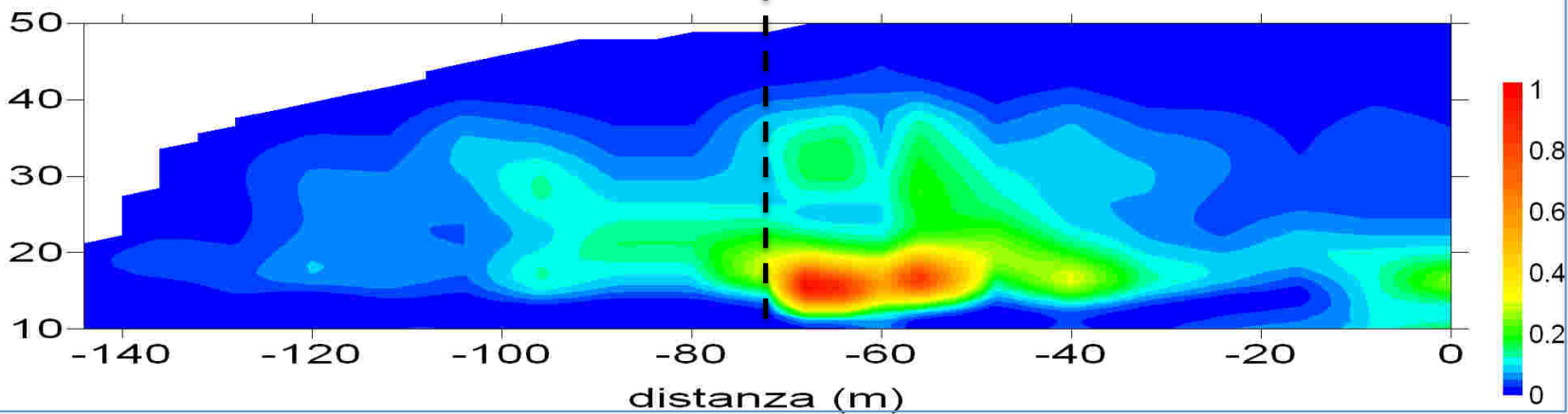
# Risultati preliminari 2D Seismoelectromagnetics:



Distanza sorgente (m)



frequenza (Hz)



# *Segnali sismoelettromagnetici*

- Risultati:** E' stata verificata la rilevabilità e la ripetibilità dei segnali SEMS durante:
- Terremoti
  - Esperimento di sismica attiva

Sono soggetti a leggi di attenuazione che permettono di predirne con buona approssimazione la rilevabilità, nota l'energia e la distanza dalla sorgente.

# *Conclusioni*

**La presenza di fluidi all'interno della roccia determina un legame stretto tra i fenomeni meccanici e quelli elettromagnetici.**

**1.** Indagini MT ripetute nel tempo possono identificare il volume di roccia che effettivamente è soggetto ad un aumento del grado di saturazione durante operazioni di fracking. Ciò rende essenziale tale tipo di indagini nel monitoraggio delle aree interessate da tali operazioni.

**2.** I segnali sismoelettromagnetici sono stati rilevati sia per eventi sismici naturali che in esperimenti attivi.

Ulteriori sforzi sono necessari per rimuovere il segnale em di origini diverse da quello sismoelettromagnetico.

**3.** Dato il ruolo importante dei fluidi sia nella generazione di eventi sismici che nello sfruttamento delle risorse si giustifica il crescente interesse dell'industria di esplorazione come nella ricerca scientifica s.s.

