



Le tecniche di sismica passiva sono basate sulla misura e l'analisi delle vibrazioni del terreno indotte da sorgenti non controllate

In particolare, l'*ambient vibration seismology* è basata sullo studio del cosiddetto “rumore sismico ambientale” (ambient vibrations)

Il termine “rumore” è mutuato dalla sismologia nella quale costituiva un elemento di disturbo rispetto al “segnale” costituito dai cosiddetti “eventi sismici” o terremoti di origine tettonica



Ci si aspetta che le vibrazioni ambientali dipendano:

1. Dalla forma e dalla distribuzione delle sorgenti
2. Dal rapporto esistente fra le sorgenti
3. Dalle modalità di propagazione dell'energia dalle sorgenti e quindi dalle caratteristiche del sottosuolo

Quest'ultimo punto è del **massimo interesse**. Infatti se è possibile stabilire delle relazioni fra la forma dello spettro medio e la struttura del sottosuolo, allora è possibile utilizzare il campo di rumore ambientale per la **caratterizzazione dinamica dei terreni in posto**



Le vibrazioni ambientali sono costituite da piccole vibrazioni del terreno (spostamenti dell'ordine di 10^{-4} - 10^{-3} cm, in un intervallo di frequenze molto al di sotto della soglia di percezione umana) che è possibile osservare sperimentalmente in qualunque punto della Terra

Viene di volta in volta anche designato con i termini di rumore sismico (*seismic noise*), microtremore (*microtremor*), microsismi (*microseisms*), rumore ambientale (*ambient vibrations*)

Questo tipo di fenomeno è stato indagato sin dai primordi della sismologia strumentale ma negli ultimi anni c'è stata una progressiva crescita interesse dei sismologi e degli ingegneri in vista delle sue potenziali applicazioni per la caratterizzazione dinamica del sottosuolo e delle strutture edilizie



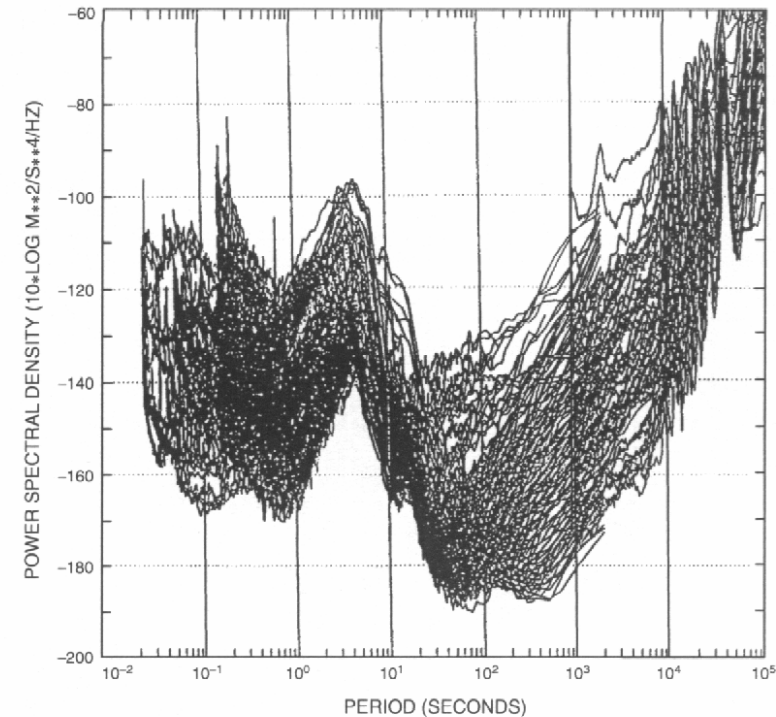
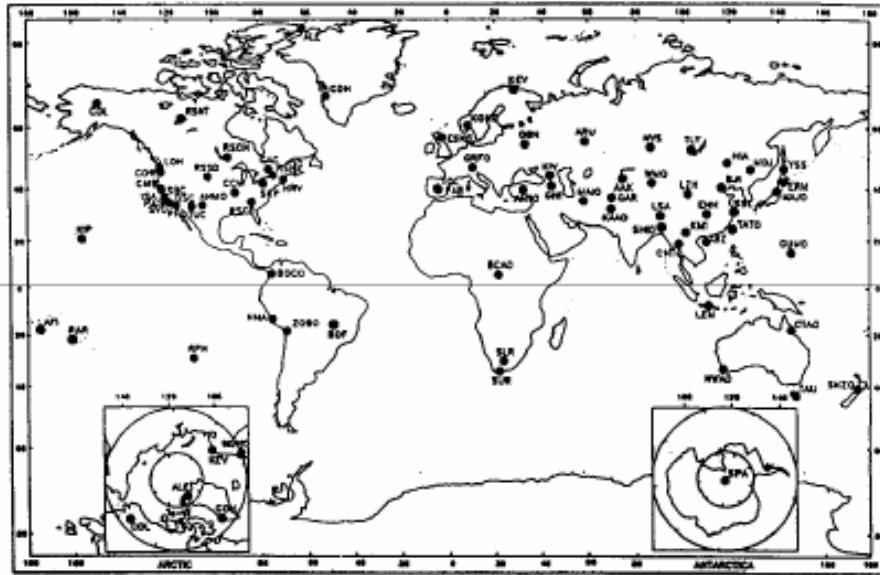
Quando sono misurate, le vibrazioni ambientali mostrano un andamento **molto irregolare** ed esibiscono quindi una natura *essenzialmente stocastica*



Questo implica che lo studio di questo tipo di fenomeno richiede un approccio sostanzialmente diverso da quello tipico della sismica, molto legato ad una visione “*deterministica*” del fenomeno: l’attenzione si sposta dallo studio delle singole fasi sismiche a quello delle *proprietà medie* del segnale



E dal punto di vista spettrale?



Le vibrazioni ambientali sono ubiquie

Se si considerano solo siti posti su roccia e lontano da centri urbani o siti industriali, **le proprietà spettrali medie** delle vibrazioni ambientali mostrano una forma spettrale largamente indipendente dalla posizione.

Quando ci si sposta però vicino ad aree urbane e su sedimenti la situazione cambia



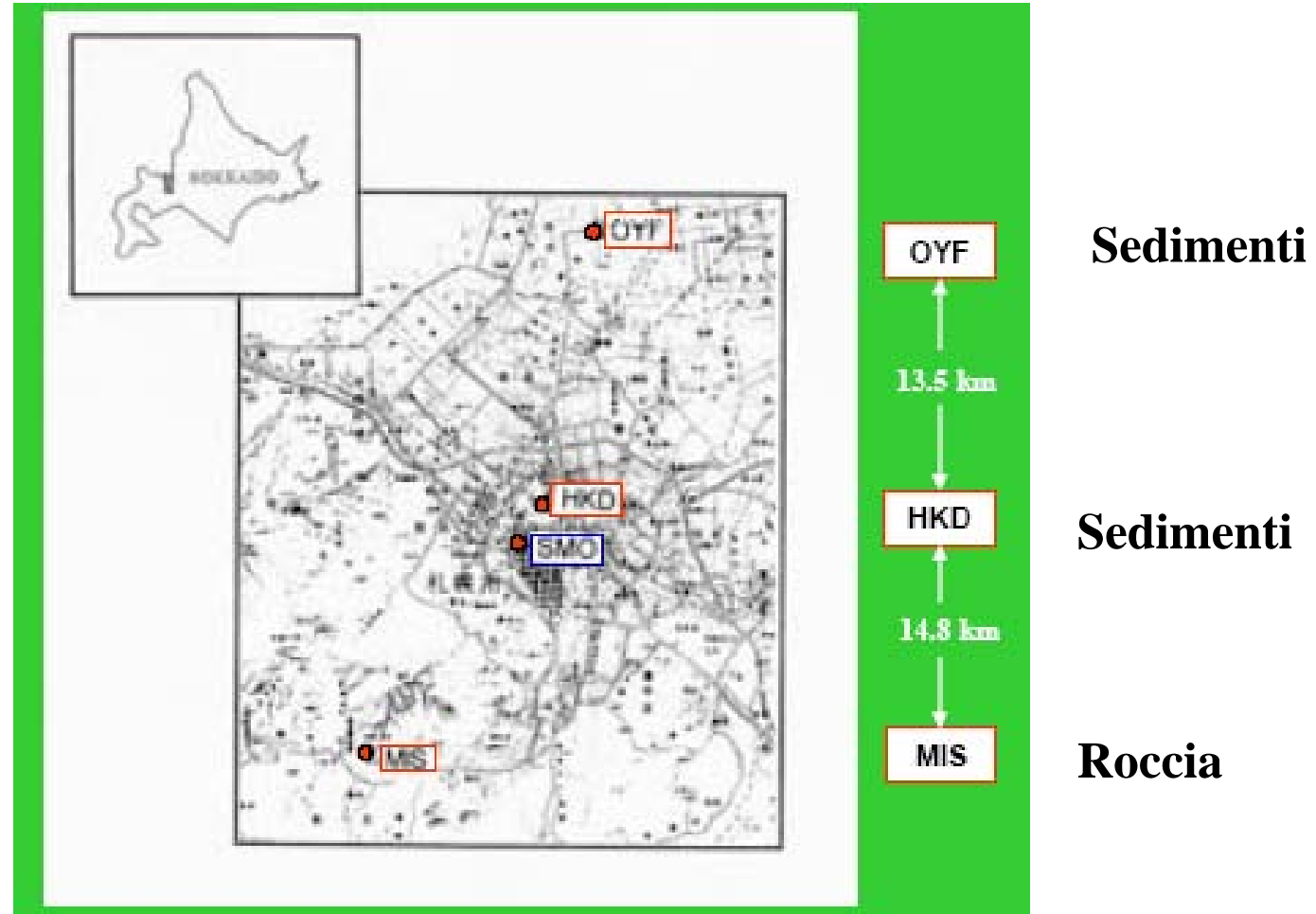
E' importante farsi un'idea delle dimensioni delle onde alle diverse frequenze (o periodi) nel campo delle vibrazioni ambientali

Se immaginiamo velocità delle onde sismiche (onde S per esempio) dell'ordine di 500 e 1000 m/sec si avrà che

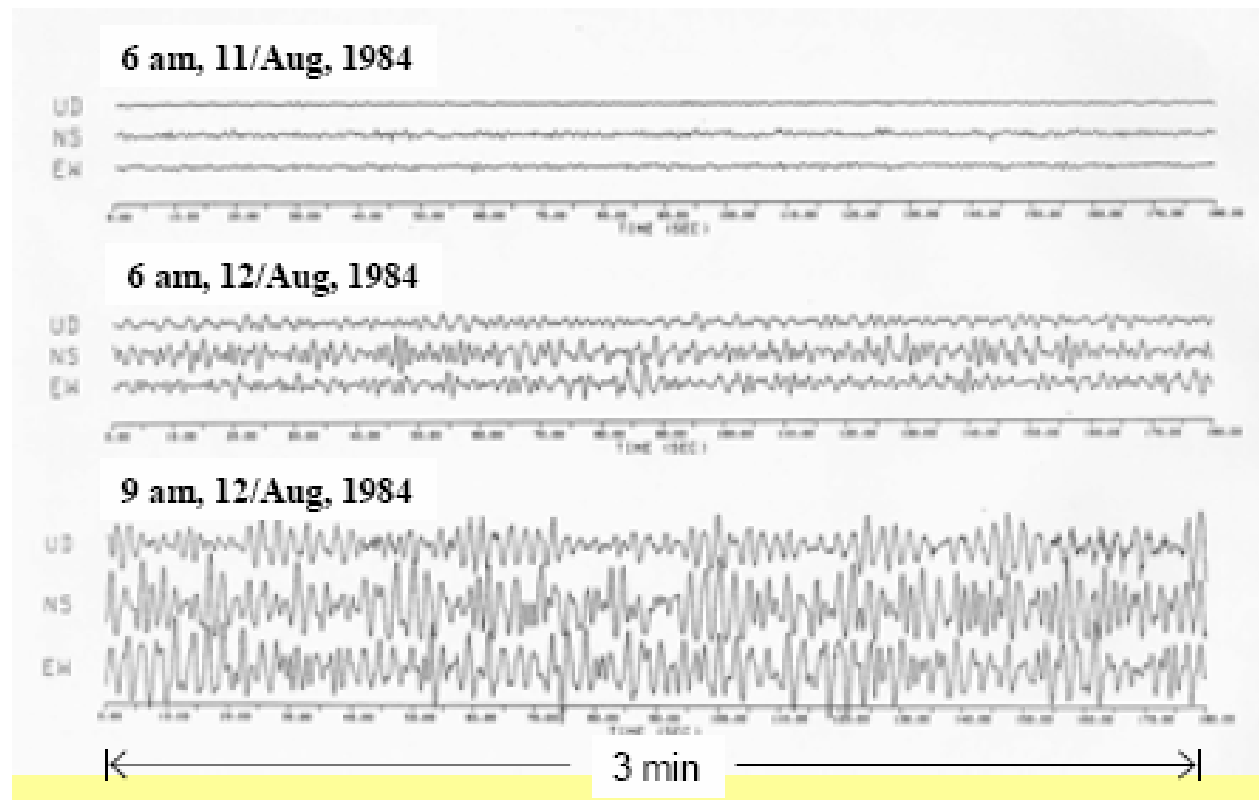
		Vs (m/sec)	Vs (m/sec)
Frequenza (Hz)	Periodo (sec)	500	1000
10	0.1	50	100
5	0.2	100	200
1	1	500	1000
0.5	2	1000	2000
0.1	10	5000	10000
0.05	20	10000	20000
0.01	100	50000	100000

Sotto 1 Hz, le lunghezze d'onda diventano rapidamente assai grandi

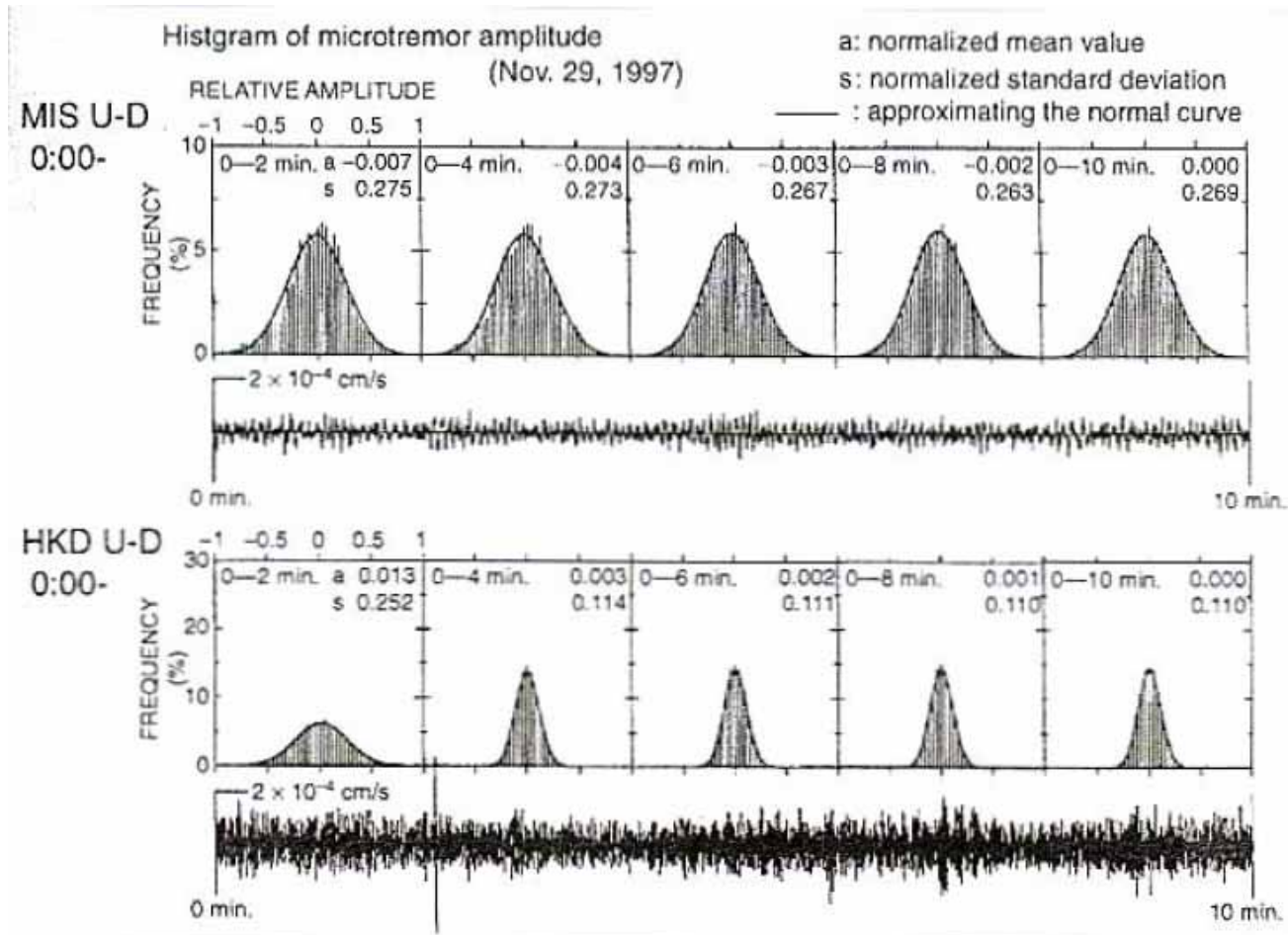
Ci si può aspettare che la scala dei fenomeni responsabili di queste perturbazioni cresca con la lunghezza d'onda



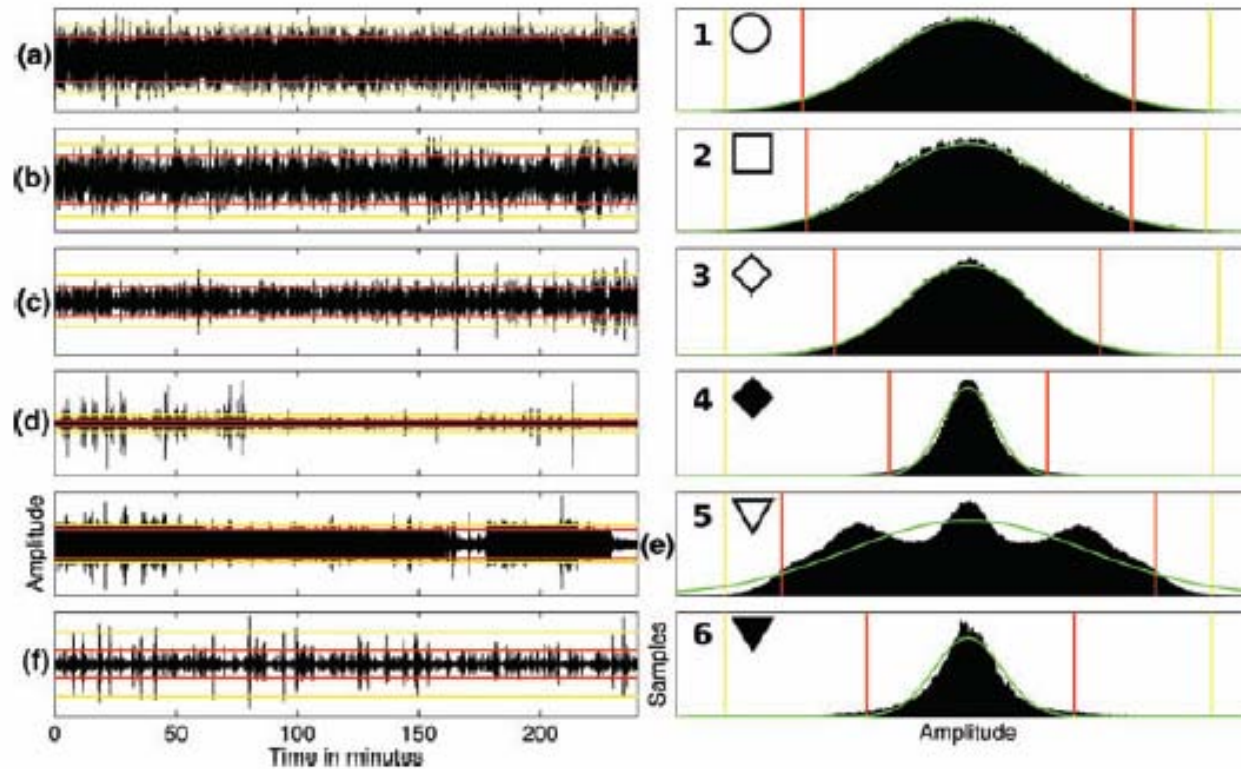
Tre stazioni nella stessa area urbana (Sapporo) misurano rumore di giorno e di notte



Si vede che alla scala considerata (3 min.) le ampiezze rimangono circa costanti (in media) ma cambiano a distanza di ore o giorni (stazione OYF)

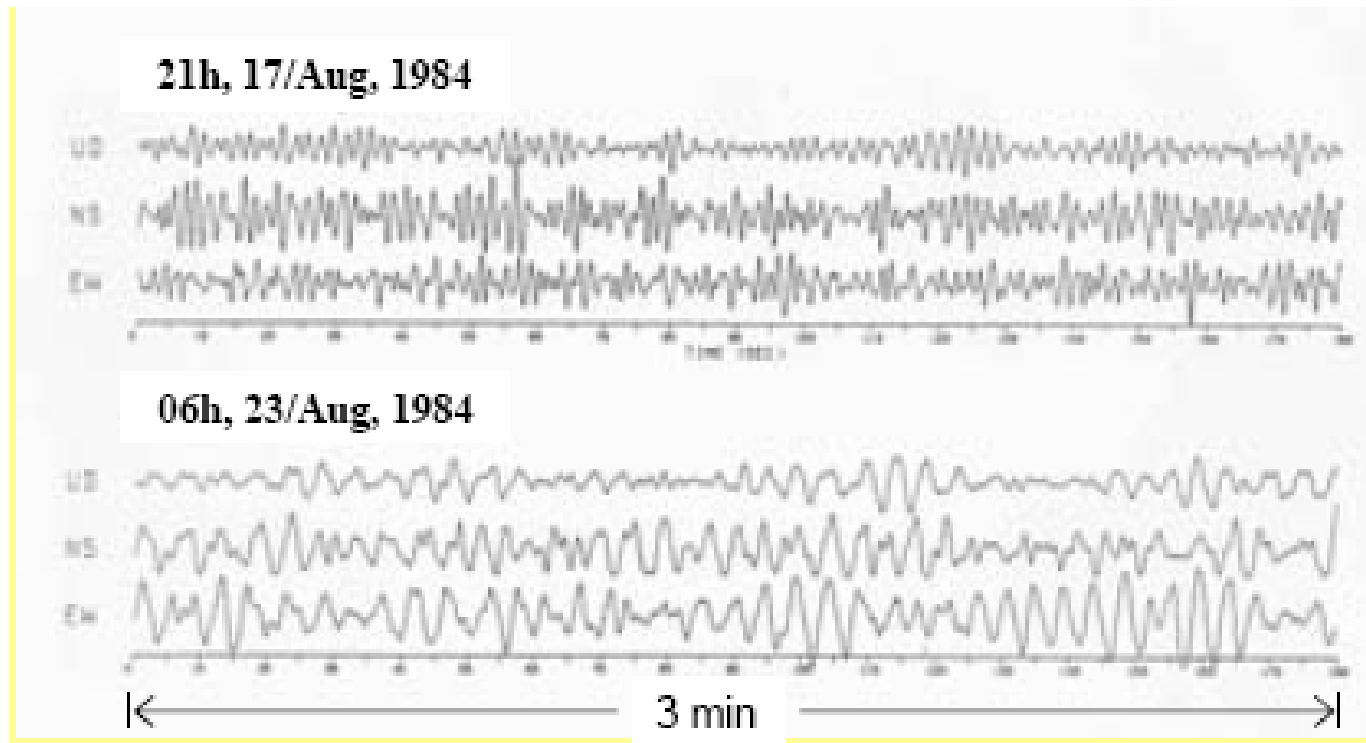


L'ampiezza delle vibrazioni ha un carattere casuale e segue una distribuzione Normale con proprietà persistenti nel tempo almeno alla scala della decina di minuti



Varie tipologie di vibrazione misurate in tempi e posizioni differenti nella città di Bucarest

Salvo nel caso 5, tutte mostrano un carattere con buona approssimazione gaussiano

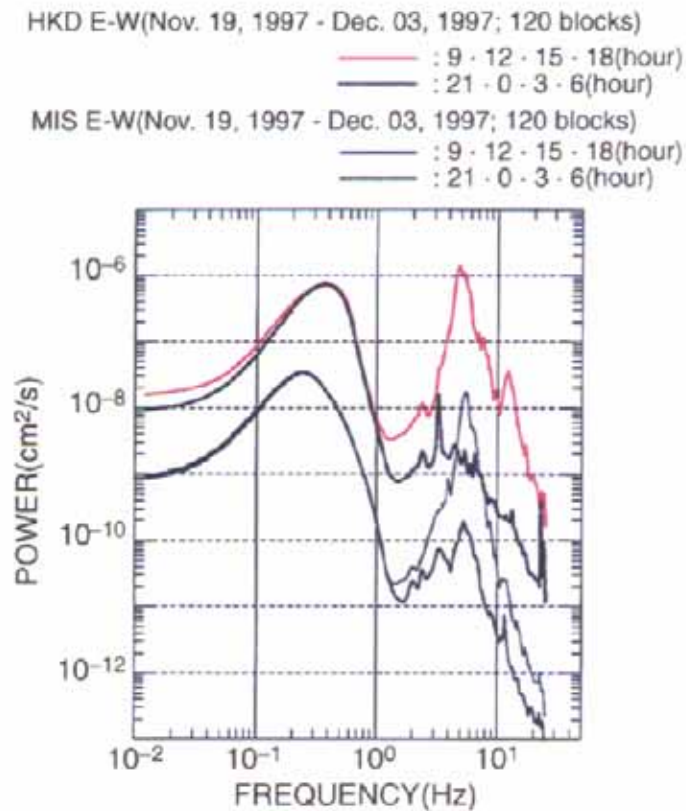
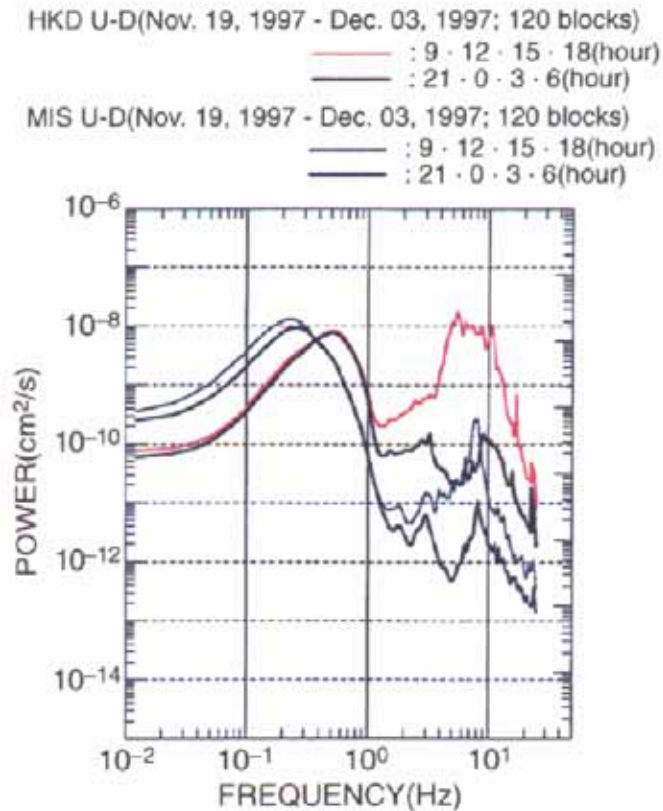


A distanza di mesi, le ampiezze sono circa le stesse la forma (il contenuto spettrale) cambia



(Componente Verticale)

(Componente orizzontale)



Si evidenziano comportamenti differenti fra le basse (<1 Hz) e le altre frequenze (>1 Hz), fra le componenti orizzontali e verticali del moto e fra i due siti



(Componente Verticale)

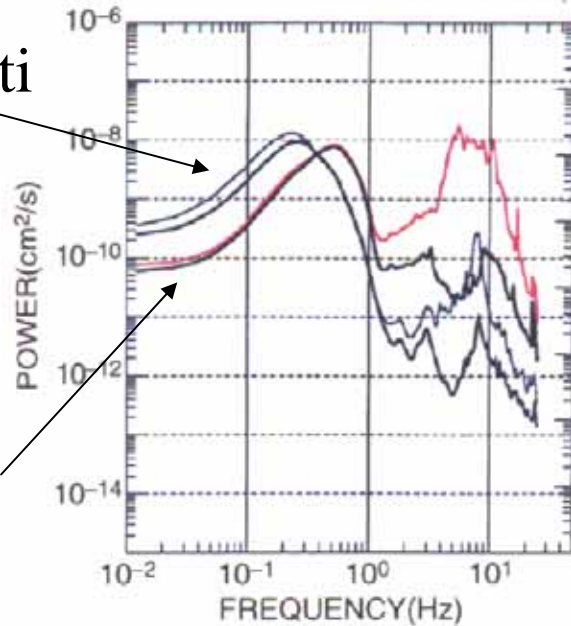
(Componente orizzontale)

HKD U-D(Nov. 19, 1997 - Dec. 03, 1997; 120 blocks)
— : 9 · 12 · 15 · 18(hour)
— : 21 · 0 · 3 · 6(hour)
MIS U-D(Nov. 19, 1997 - Dec. 03, 1997; 120 blocks)
— : 9 · 12 · 15 · 18(hour)
— : 21 · 0 · 3 · 6(hour)

HKD E-W(Nov. 19, 1997 - Dec. 03, 1997; 120 blocks)
— : 9 · 12 · 15 · 18(hour)
— : 21 · 0 · 3 · 6(hour)
MIS E-W(Nov. 19, 1997 - Dec. 03, 1997; 120 blocks)
— : 9 · 12 · 15 · 18(hour)
— : 21 · 0 · 3 · 6(hour)

Sedimenti

Roccia

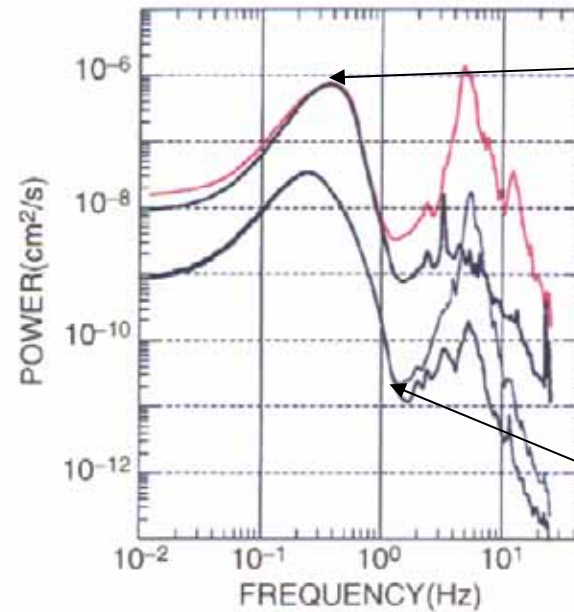


Giorno

Notte

Sedimenti

Roccia

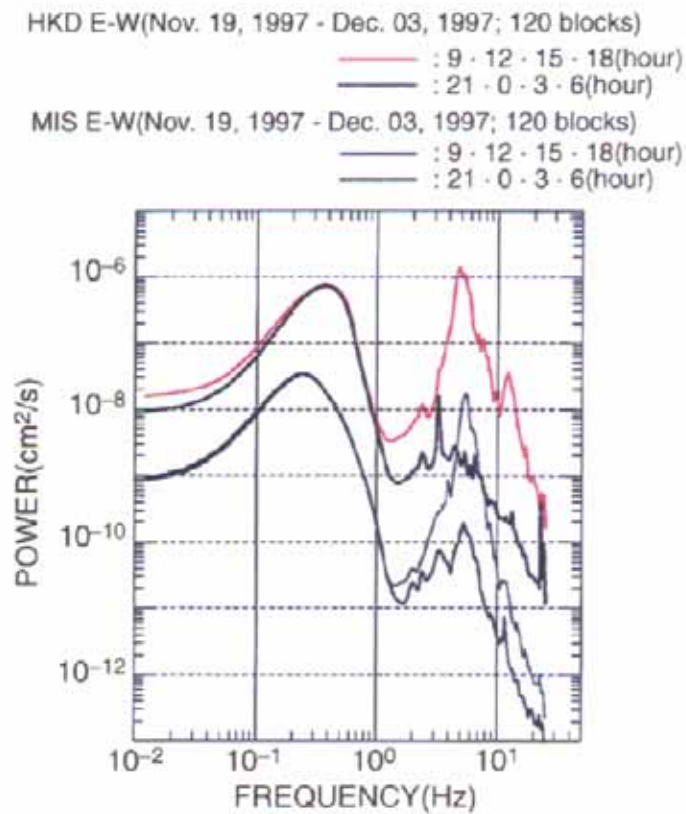
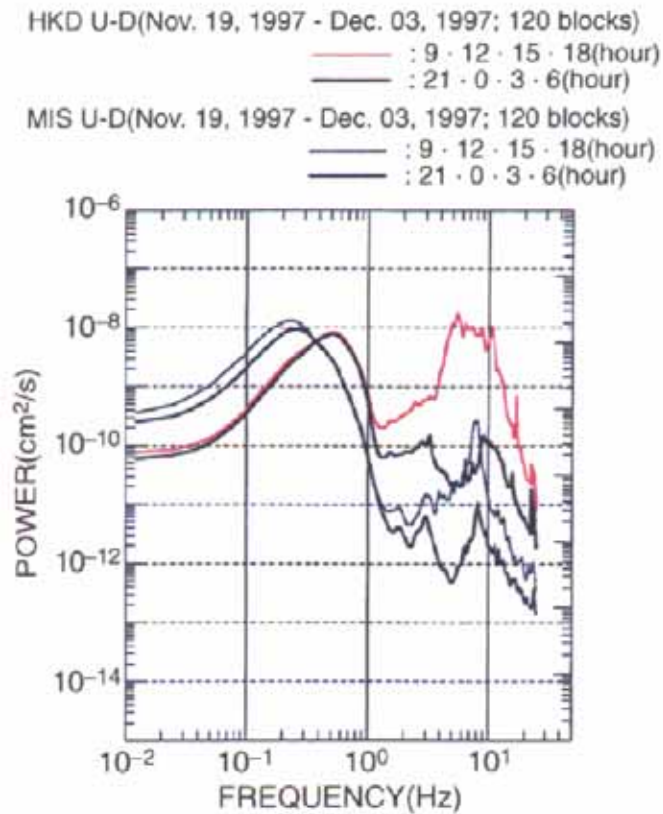


Due stazioni nella stessa area urbana (una su roccia MIS e una su sedimenti UKD) misurano rumore di giorno e di notte



(Componente Verticale)

(Componente orizzontale)



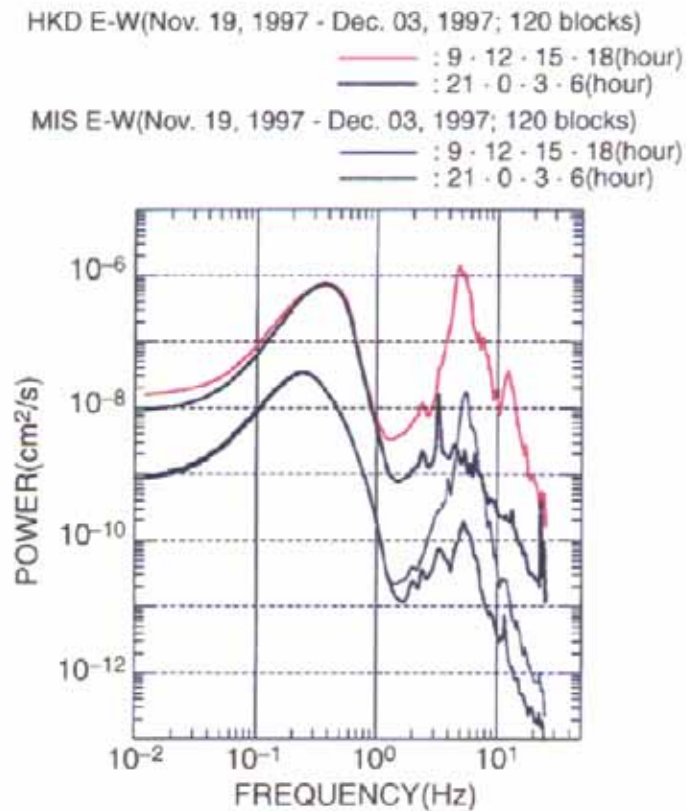
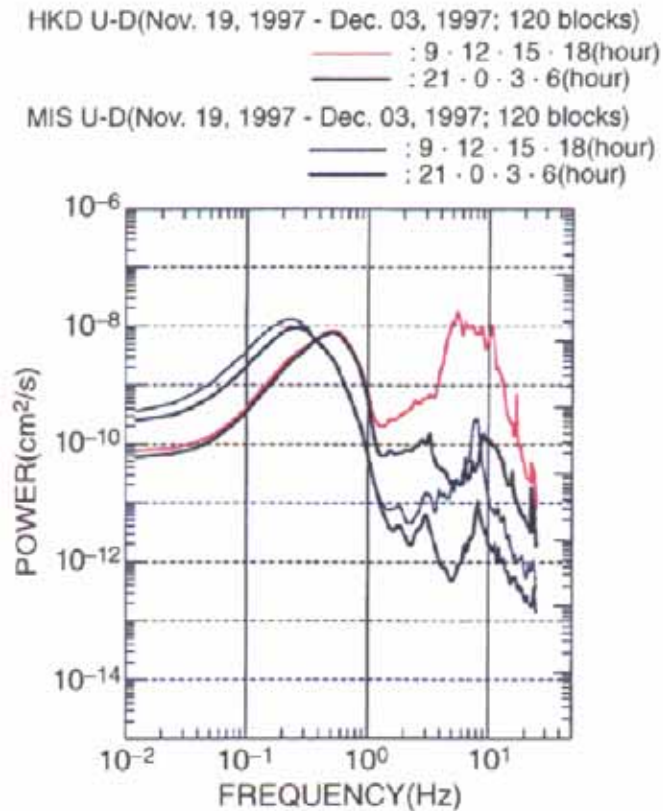
Si osservano variazioni giorno/notte solo per frequenze superiori a 1 Hz) in entrambe le stazioni: **sono quindi frutto di attività antropica**

Le frequenze più basse rimangono costanti nel corso della giornata alle due stazioni: **sono frutto di fenomeni naturali di lunga durata**



(Componente Verticale)

(Componente orizzontale)



Le due stazioni mostrano forme spettrali differenti

In particolare, le componenti orizzontali e verticali mostrano ampiezze differenti fra le due stazioni

Esistono quindi differenze che dipendono dalla stratigrafia



In generale, studi di questo genere nel corso degli anni hanno messo in evidenza che il rumore ambientale può essere differenziato in tre domini di frequenza

- **Bassa frequenza** (<0.5 Hz) - *Microsismi*

E' di origine **essenzialmente naturale** con sorgenti di grandi dimensioni spaziali (*onde oceaniche, grandi perturbazioni atmosferiche, ecc.*); ha un carattere stazionario (*ovvero le sue proprietà statistiche non cambiano nel tempo*) alla scala delle **ore** e dei **giorni**.

Alta frequenza (>1 Hz) – *Microtremore*

E' di origine **essenzialmente antropica** (*traffico veicolare e pedonale, attività industriale, ecc.*) e **talvolta naturale ma a scala locale** (*vento sugli edifici e le piante, ecc.*); mostra carattere significative variazioni alla scala delle attività antropiche (*giorno/notte, festivi/feriali, ecc.*).

- **Frequenza** intermedia (<1 Hz e >0.5 Hz)

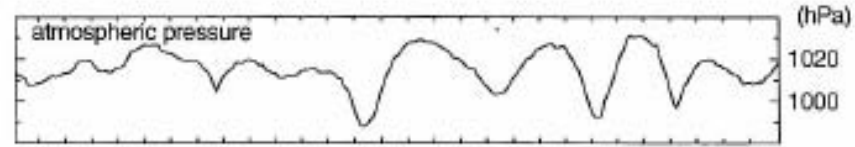
A seconda delle caratteristiche del sottosuolo, **sia sorgenti naturali che antropiche** possono condizionare le vibrazioni ambientali, con un livello di stazionarietà variabile da caso a caso



Fra le cause principali del rumore in bassa frequenza ci sono le perturbazioni atmosferiche e le onde marine

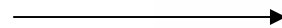
	Gutenberg (1958)	Asten (1978-1984)
Waves striking the coast	0.05-0.1 Hz	0.5-1.2 Hz
Monsoon / large scale meteorological perturbations	0.1-0.25 Hz	0.16-0.5 Hz
Cyclones over the ocean	0.3-1 Hz	0.5-3 Hz
Local meteorological conditions	1.4-5 Hz	
Volcanic tremor	2-10 Hz	
Urban	1-100 Hz	1.4-30hz

Si noti che in bassa frequenza le vibrazioni hanno grandi lunghezze d'onda (centinaia o migliaia di metri) e quindi devono essere generati da fenomeni a larga scala

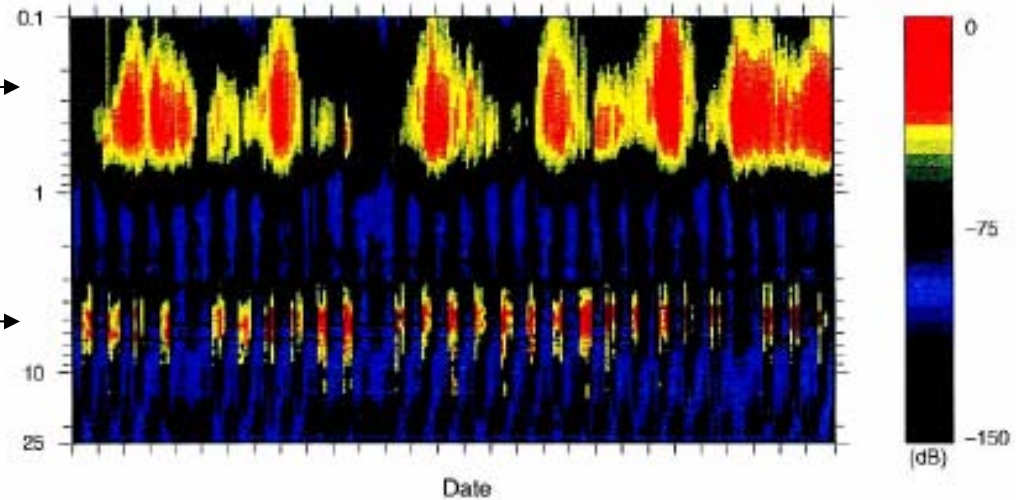
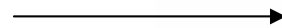


HKD(EW) : Nov. 5, 1997 – Dec. 3, 1997

Bassa Frequenza



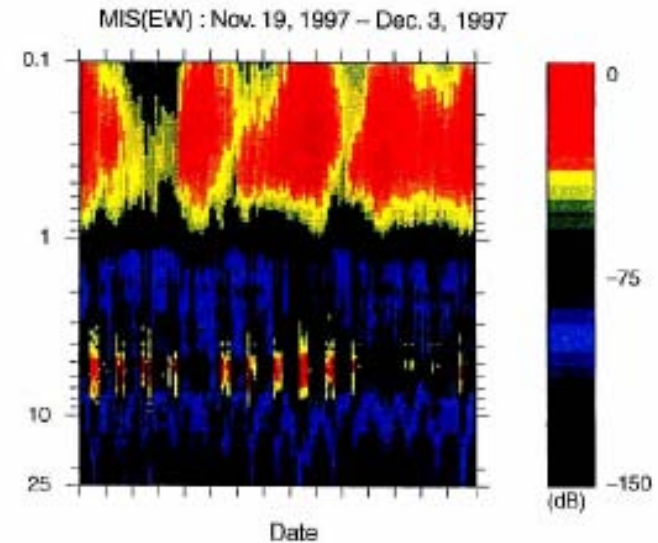
Alta Frequenza



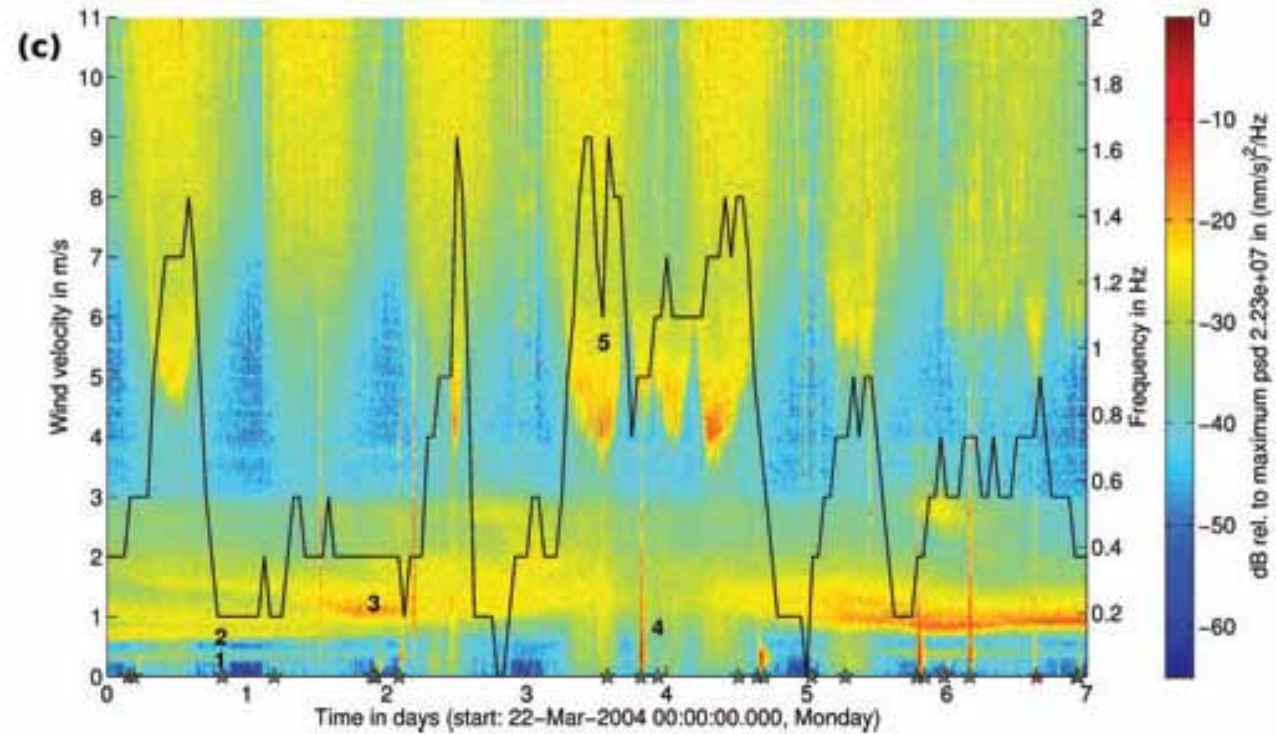
Date

**Variazione delle forme spettrali
nel tempo alle diverse frequenze
alle stazioni HKD e MIS**

**Si noti il diverso comportamento
alle basse ed alle alte frequenze**



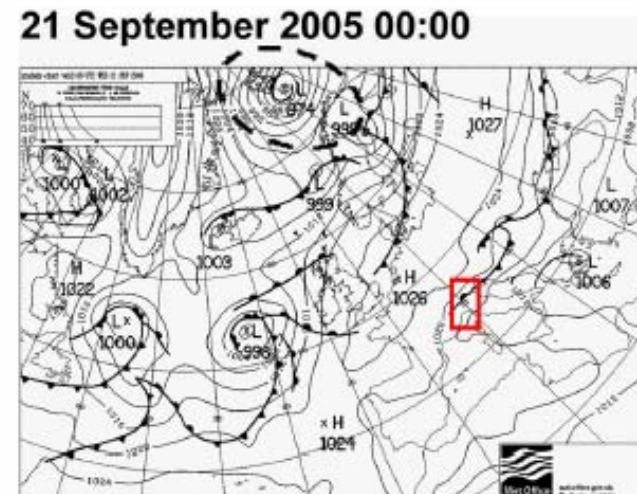
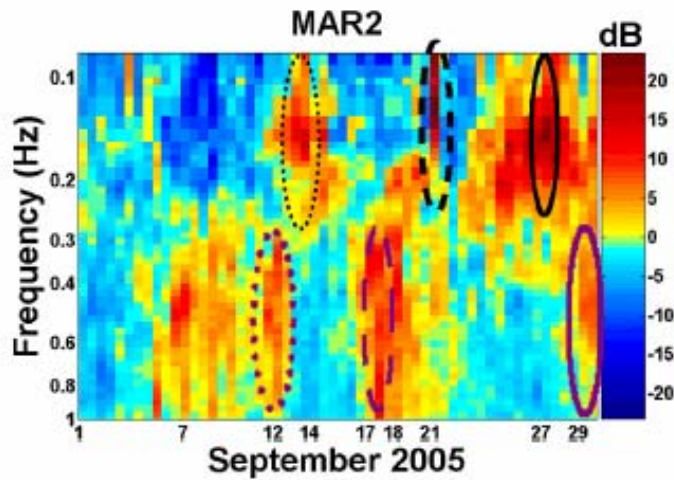
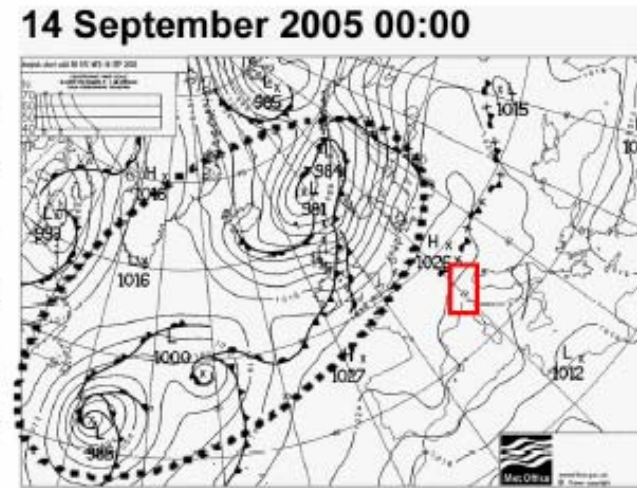
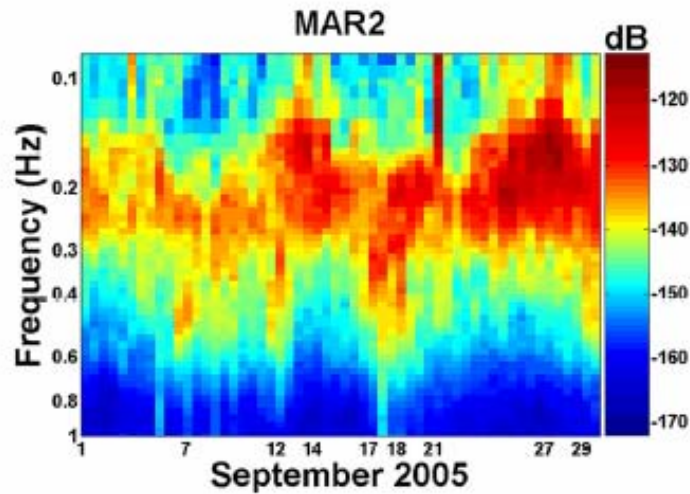
Date



L'effetto del vento

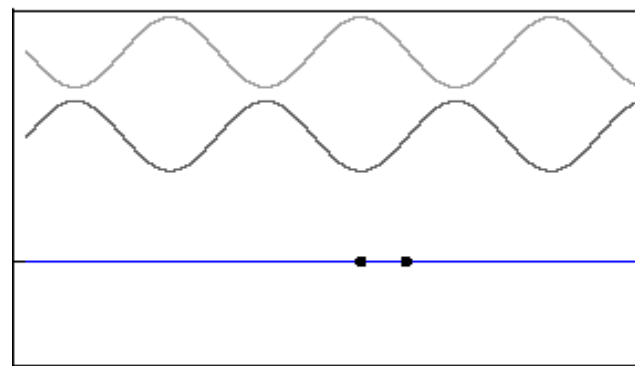


L'effetto di queste grandi perturbazioni si osserva anche a centinaia di km di distanza





Mare aperto



Onda incidente

Onda Riflessa

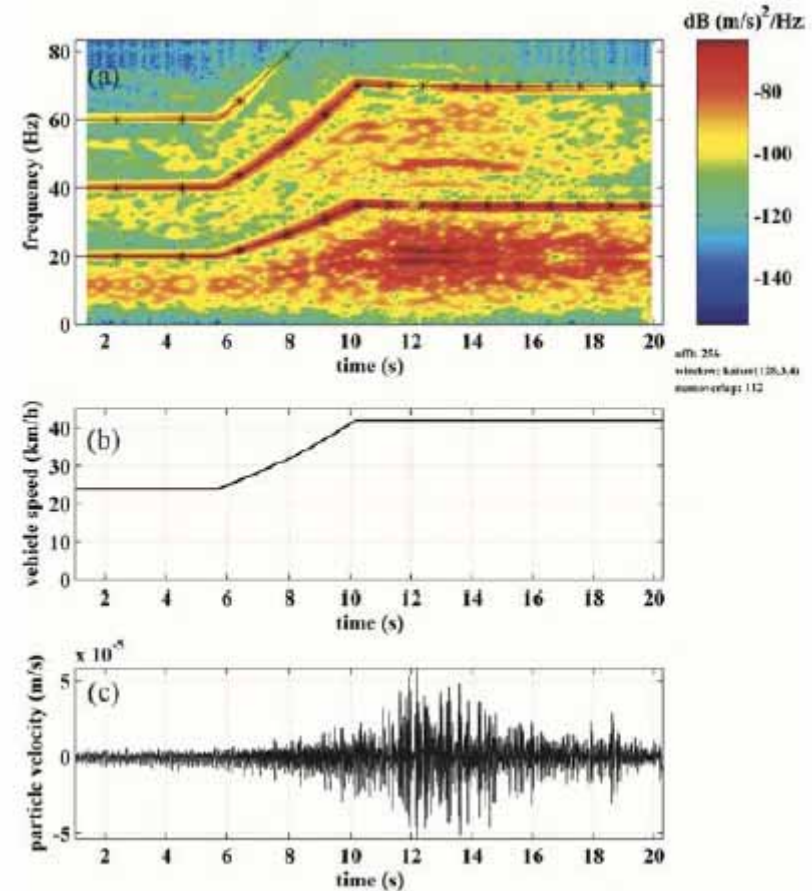
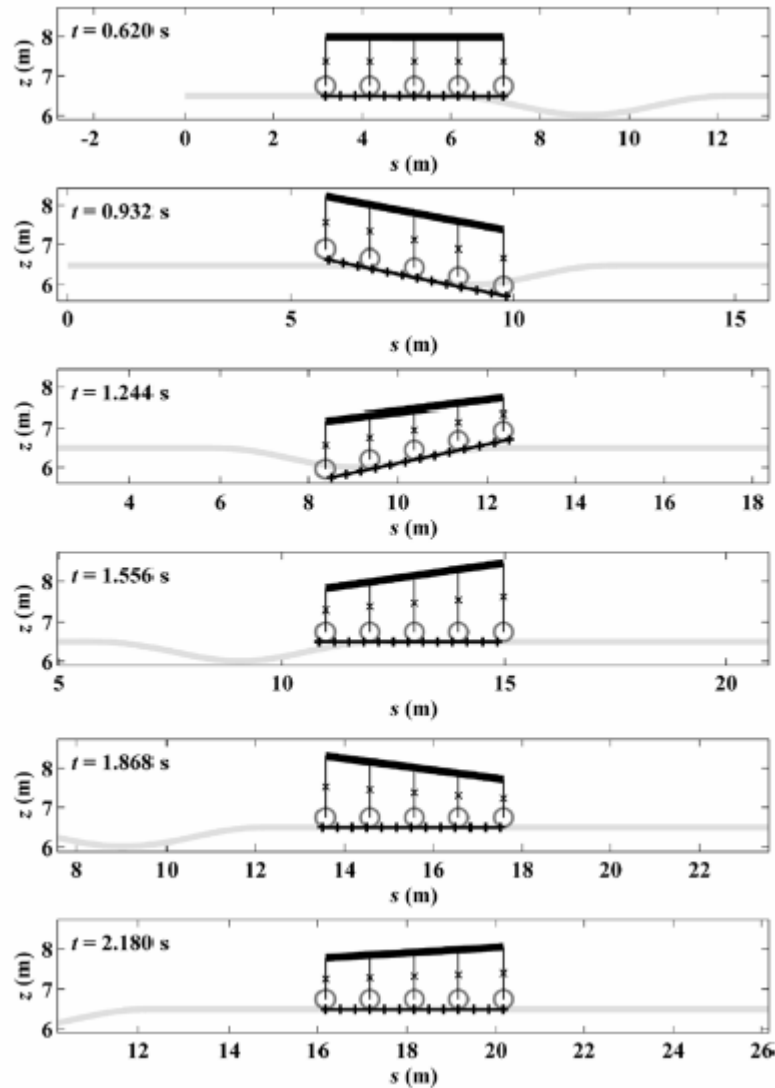
Onda stazionaria

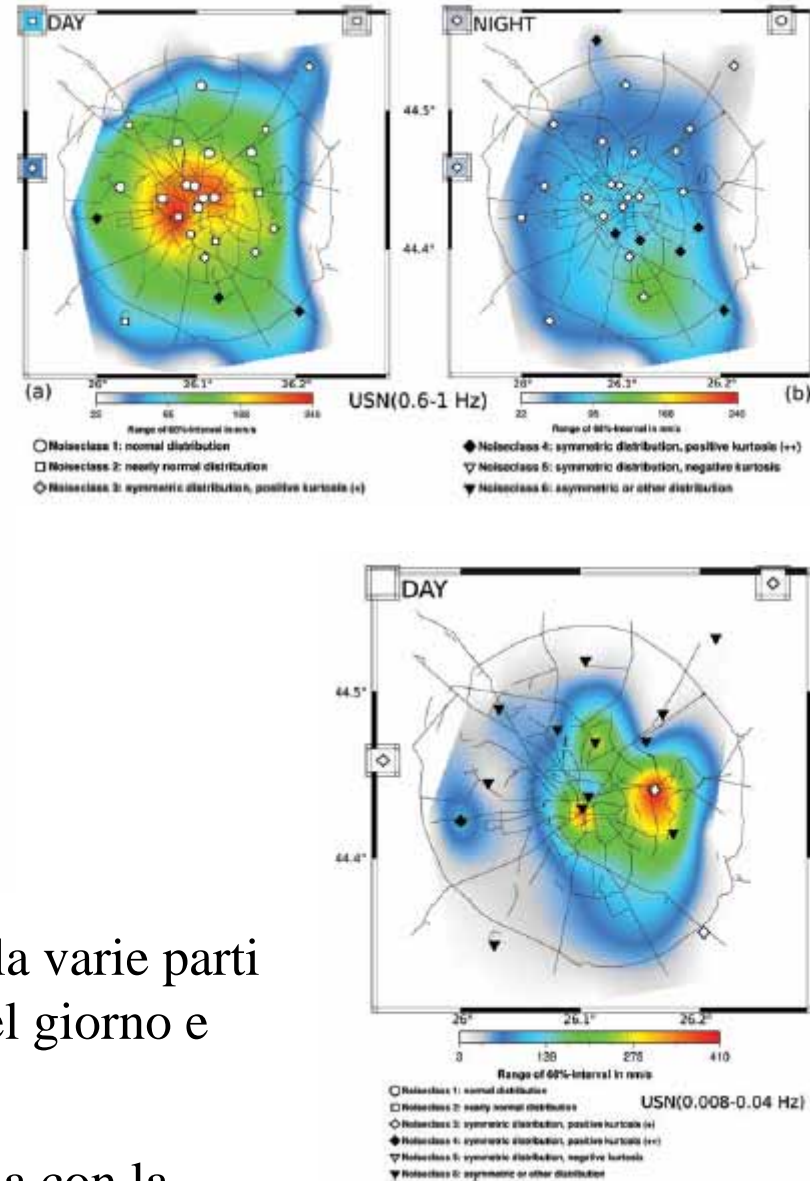
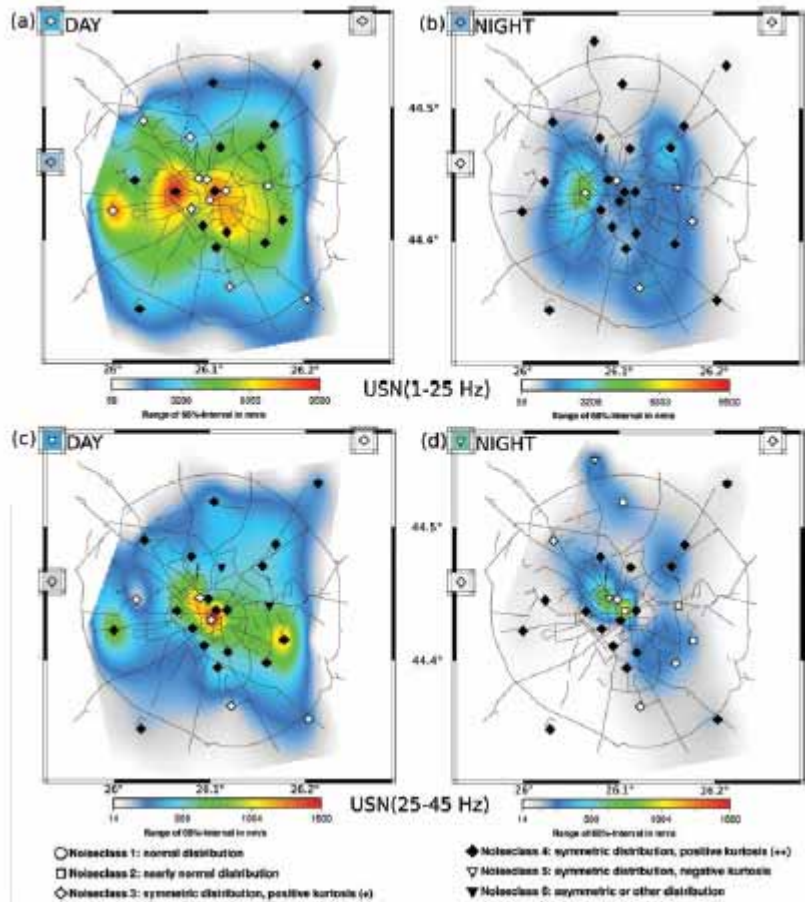
Secondo una teoria largamente condivisa, le onde marine di grande lunghezza d'onda generano vibrazioni ambientali a causa dei battimenti generati dall'interferenza di onde oceaniche riflesse dalla linea di costa

Questa onda stazionaria funge da percussore sul fondo marino generando treni di onde che si propagano all'interno della crosta



Cosa avviene per le alte frequenze? Per esempio ecco l'effetto di un veicolo in moto su una pavimentazione irregolare a velocità diverse





Ampiezza delle vibrazioni ambientali nella varie parti della città di Bucarest nelle diverse ore del giorno e nelle diverse frequenze

Notare che la scala delle variazioni cambia con la frequenza



Finora abbiamo quindi appreso che:

1. Il campo delle vibrazioni ambientali ha un carattere essenzialmente stocastico; pertanto, la sua analisi deve avere luogo con metodi di tipo statistico/probabilistico
2. Le vibrazioni ambientali sono presenti ovunque sulla superficie della Terra anche se con ampiezze e caratteristiche diverse
3. Nel campo delle basse frequenze (<0.5 Hz), le vibrazioni sono indotte da cause essenzialmente naturali (onde marine perturbazioni atmosferiche, ecc.); pertanto, in questo intervallo di frequenza, la forma dello spettro risulta con buona approssimazione stazionaria alla scale delle ore fino i giorni o mesi



4. Nel campo delle alte frequenze ($>1\text{Hz}$), il campo è controllato da sorgenti antropiche (p.es. il traffico veicolare); quindi anche alla scala delle ore o delle decine di minuti, la variabilità è assai maggiore e maggiori sono le irregolarità presenti
5. La variabilità spaziale del campo di rumore dipende dalla frequenza (o dalla lunghezza d'onda): maggiore è la frequenza più piccola è la scala di delle variazioni laterali
6. Si mettono comunque in evidenza variazioni nella forma spettrale indotte dalle caratteristiche del sottosuolo

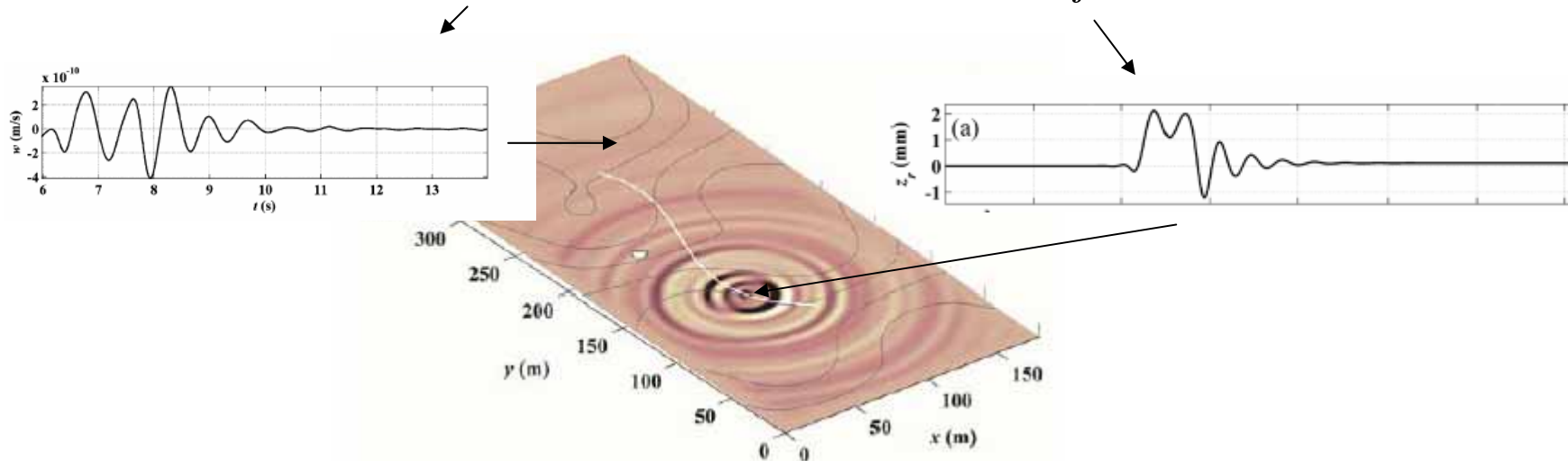
Come sfruttare questo ultimo aspetto per la caratterizzazione del sottosuolo? Bisogna innanzitutto capire quali sono le fasi sismiche presenti nel campo di vibrazioni ambientali



Per tentare di trovare una soluzione, ritorniamo alle caratteristiche delle perturbazioni generate alla superficie o all'interno di un mezzo elastico

Si ricorderà che in questi casi, esiste una semplice relazione lineare fra lo spettro della sollecitazione j -ma responsabile della perturbazione $F(\omega)$ e lo spettro di quest'ultima $H(\omega)$ in un dato punto i -mo

$$H_i(\omega) = G(\omega, r)F_j(\omega)$$





$$H_i(\omega) = G(\omega, r)F_j(\omega)$$

**Dipende dalla sorgente
F(ω) e dalle caratteristiche
del mezzo**

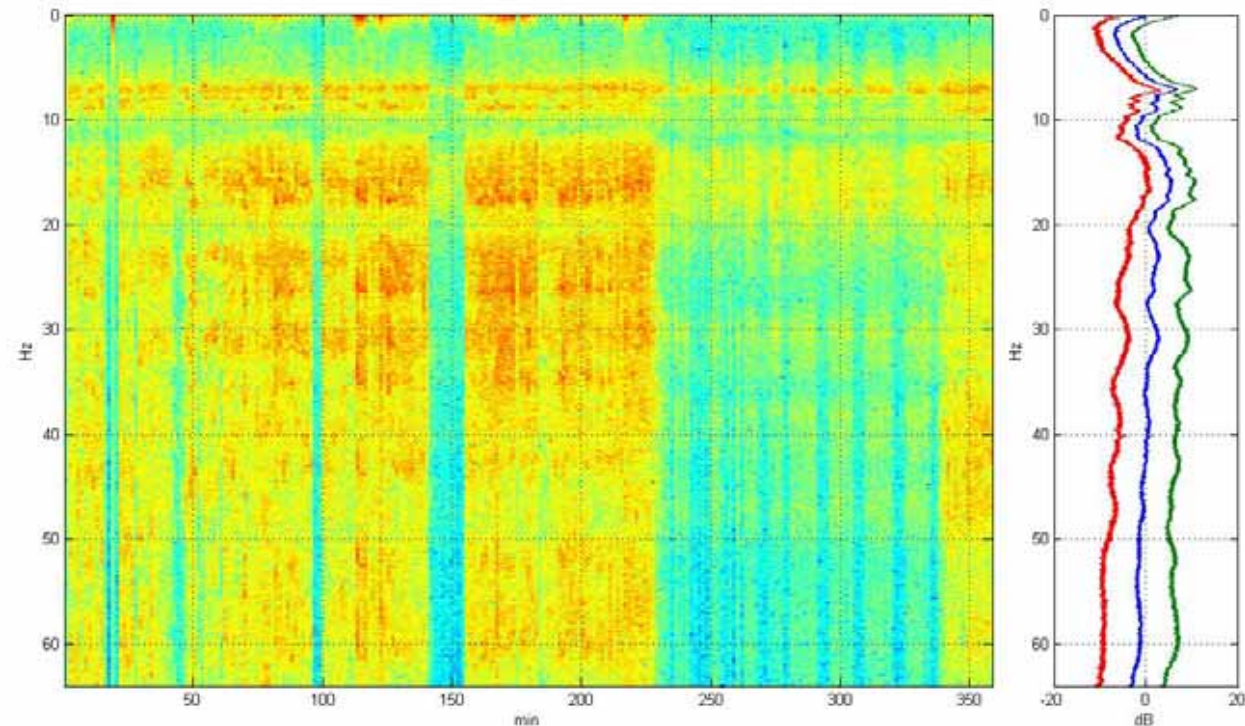
Sorgente

La “risposta” del sottosuolo alla sollecitazione e rappresenta la modalità di propagazione della perturbazione dallo sorgente al sito

Include fattori geometrici (percorso delle onde) e fisici (quali fasi sismiche si propagano e come)



La forma dello spettro in un dato punto (ma non la sua ampiezza) sembra piuttosto costante almeno alla scala delle ore



Ampiezze spettrali del rumore sismico misurato in un intervallo di 6 ore (dalle 7 alle 13 locali). Sulla sinistra il periodogramma calcolato su finestre temporali di 2 minuti sovrapposte di 30 sec ognuna. In ascissa è riportato il tempo in minuti, mentre in ordinata sono le frequenze in Hz. I colori sono proporzionali all'ampiezza del segnale in dB. Sulla destra è riportato il periodogramma medio (linea centrale) e relativa deviazione standard (le due linee a destra e sinistra).



In questo intervallo si sono presumibilmente attivate molte e diverse sorgenti

Lo spettro medio non riflette quindi le singole sorgenti (almeno in questo caso) ma qualcosa di persistente come la struttura del sottosuolo

Questo suggerisce che se si considera uno spettro medio calcolato su un intervallo **abbastanza esteso** da includere l'attivazione di **molte sorgenti diverse** poste in **posizioni differenti**, si possa scrivere

$$[H_i^2(\omega)] \approx K_H^2(\omega) [G_i^2(\omega)]$$

Spettro di potenza medio delle vibrazioni osservate in i

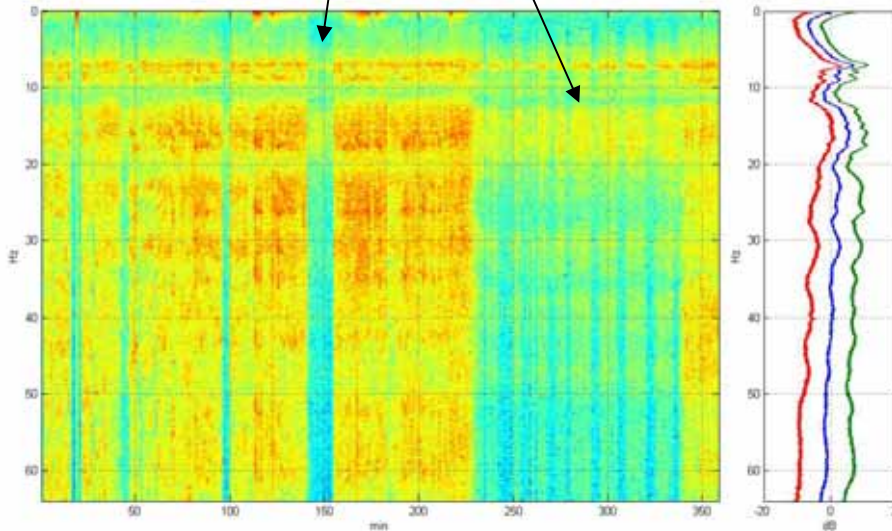
Contributo “medio” in i delle diverse sorgenti

Effetto “medio” di propagazione in i *che dipende dalle caratteristiche del sottosuolo!*



Quindi lo spettro medio sull'intervallo considerato non dipenderà dalla singola sorgente (se l'intervallo è abbastanza lungo) ma varierà comunque nel tempo

$$[H_i^2(\omega, t)] \approx K_H^2(\omega, t) [G_i^2(\omega)]$$



Come faccio ad eliminare la dipendenza dal tempo?

Se potessi eliminarla potrei dedurre G da H ovvero caratterizzare la “risposta” del sottosuolo nel sito i!!



$$\left[H_i^2(\omega, t) \right] \approx K_H^2(\omega, t) \left[G_i^2(\omega) \right]$$

Spettro medio orizzontale

$$\left[V_i^2(\omega, t) \right] \approx K_V^2(\omega, t) \left[B_i^2(\omega) \right]$$

Spettro medio verticale

$$\frac{\left[H_i^2(\omega, t) \right]}{\left[V_i^2(\omega, t) \right]} \approx \frac{K_H^2(\omega, t) \left[G_i^2(\omega) \right]}{K_V^2(\omega, t) \left[B_i^2(\omega) \right]}$$

Rapporto spettrale medio

Se le sorgenti mediamente sollecitano in uguale misura le componenti verticali e orizzontali

$$K_H^2(\omega, t) \approx K_V^2(\omega, t)$$

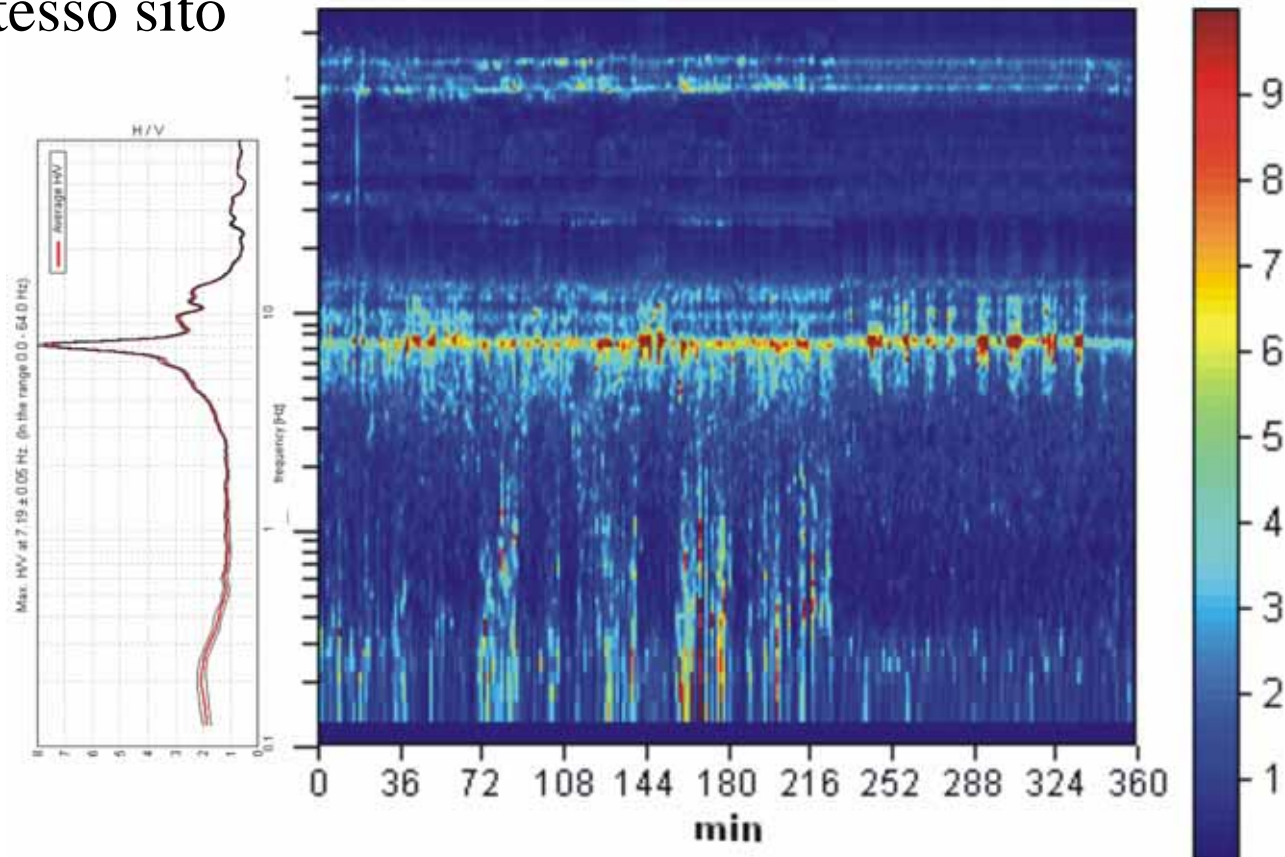
Allora

$$\frac{\left[H_i^2(\omega, t) \right]}{\left[V_i^2(\omega, t) \right]} \approx \frac{\left[H_i^2(\omega) \right]}{\left[V_i^2(\omega) \right]} \approx \frac{\left[G_i^2(\omega) \right]}{\left[B_i^2(\omega) \right]}$$

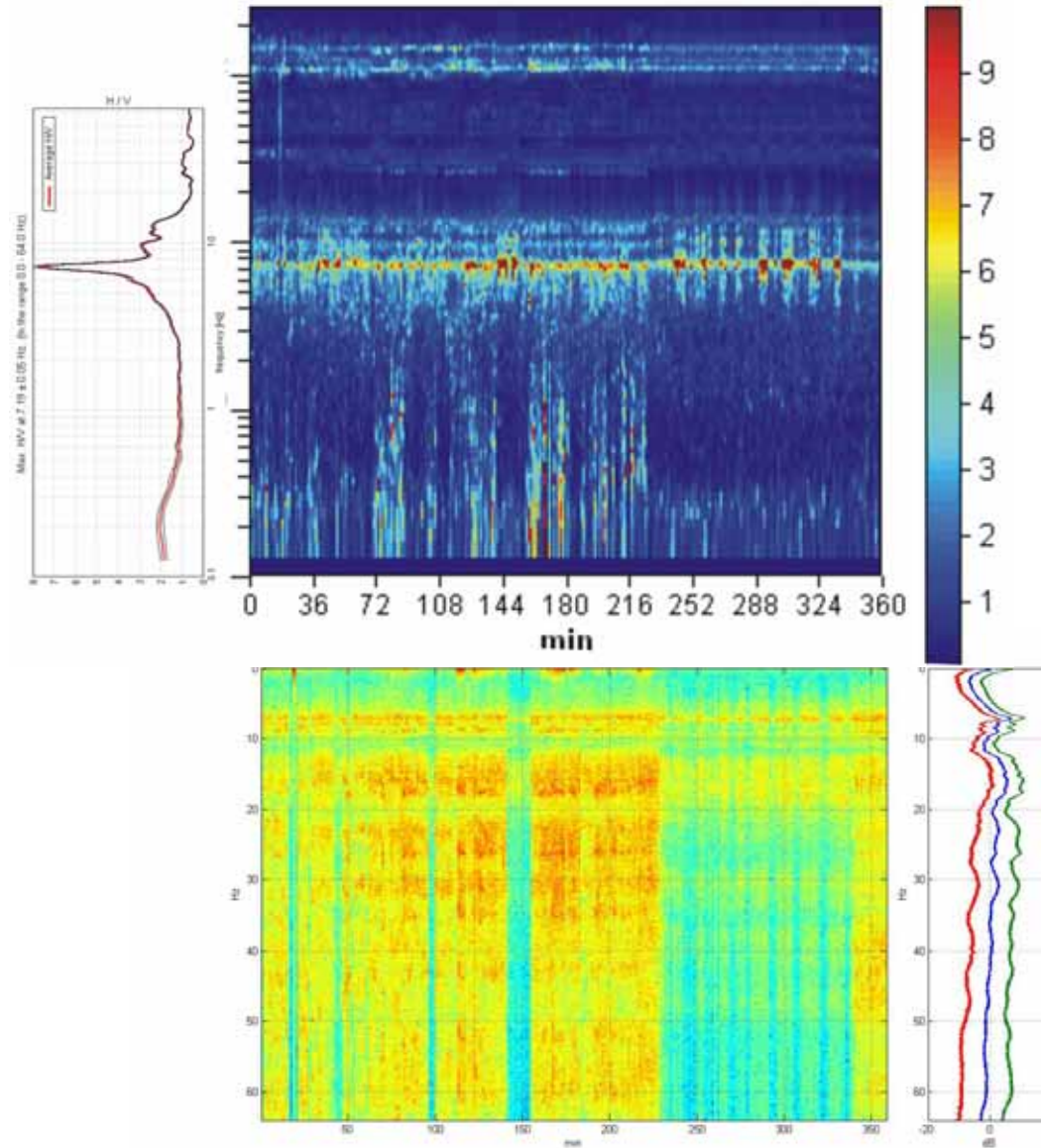
Che dipende solo dalle caratteristiche del mezzo e dalla modalità di propagazione



Un aspetto interessante emerge se esaminiamo il rapporto fra gli spettri di ampiezza nelle direzioni orizzontali e verticali delle vibrazioni ambientali nello stesso sito



Andamento dei rapporti fra le ampiezze spettrali del rumore misurato sul piano orizzontale e quelle relative al moto verticale (rapporti H/V o HVSR) per le misure in figura 6. A sinistra i valori medi del rapporto spettrale per tutta la durata della misura mentre a destra le sue variazioni nel tempo



Si manifesta una forma assai più persistente nel tempo!

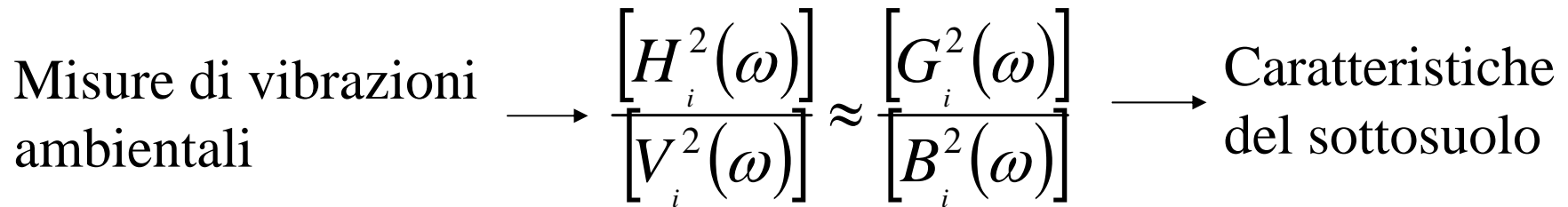


Quindi se sono soddisfatte le assunzioni:

1. Gli spettri medi delle vibrazioni ambientali sono calcolati per un intervallo di tempo sufficientemente lungo da includere una molteplicità di sorgenti distribuite uniformemente attorno al sito
2. Se queste sollecitano in modo statisticamente uguale le componenti orizzontali e verticali del moto

Allora i rapporti spettrali medi H/V sono funzione solo delle caratteristiche medie (nelle diverse direzioni) del sottosuolo

Quindi da misure di rumore risulta possibile risalire alle proprietà del mezzo al netto del contributo delle diverse sorgenti



A questo punto, il problema è stabilire una relazione fra i parametri meccanici del sottosuolo (V_s , V_p , densità, ecc.) e la funzione

$$\frac{[G_i^2(\omega)]}{[B_i^2(\omega)]}$$

Questa relazione deve essere stabilita per via teorica a partire da

- 1. Un modello di sottosuolo*
- 2. L'identificazione delle fasi sismiche presenti nel campo di vibrazioni*



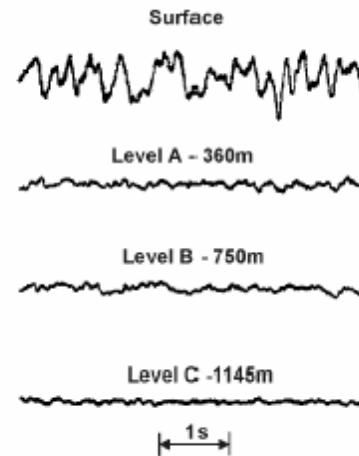
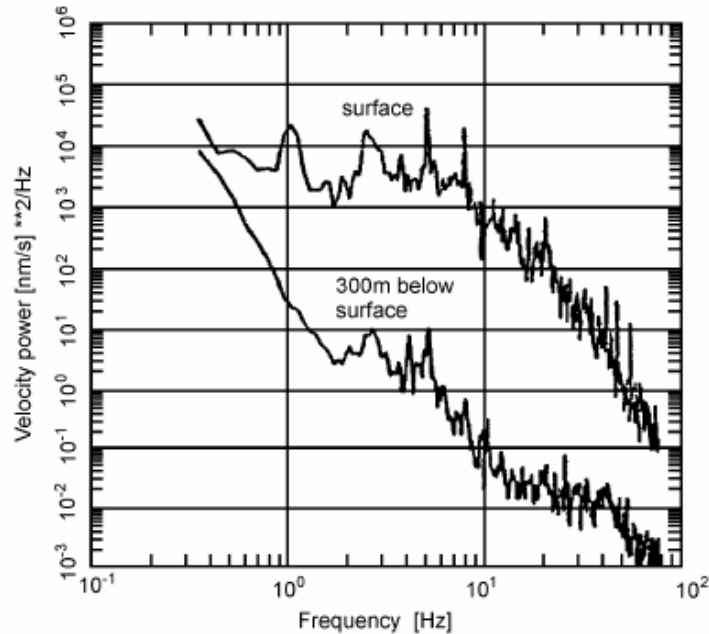
In linea di principio, ci si può aspettare che nel campo di vibrazioni siano presenti tutte le diverse fasi sismiche (onde P, onde S, onde di Rayleigh, Love e relativi modi superiori).

Il problema è quello di valutare il peso relativo delle diverse fasi nei diversi casi, ovvero in funzione della tipologia (media) delle sorgenti e delle caratteristiche meccaniche del mezzo attraverso cui si propagano le perturbazioni elastiche

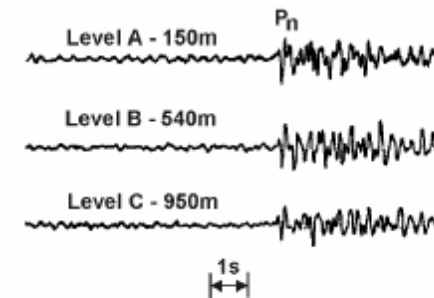
Dato che, in generale, le onde di volume si attenuano più rapidamente e che la maggior parte delle possibili sorgenti si trovano alla superficie, ci si può aspettare che un ruolo dominante sia giocato dalle onde superficiali



In molti casi, quest'ultima congettura sembra confermata dalle osservazioni soprattutto per quanto riguarda le frequenze più basse



Vibrazioni
ambientali



Terremoto

Per esempio, confrontando le ampiezze dei segnali misurati in superficie ed in profondità



Julian Day	Hour (TU)	Proportion of Rayleigh waves (%)
076	01-02	63 +/- 7
	15-16	59 +/- 10
085	01-02	61 +/- 12
	15-16	63 +/- 9
090	01-02	65 +/- 12
	05-06	63 +/- 15
	15-16	65 +/- 10
105	01-02	63 +/- 8
	05-06	65 +/- 7
	15-16	65 +/- 7

Altri studi sembrano confermare la forte e persistente presenza di onde superficiali nelle vibrazioni ambientali

	Frequenze	Onde R (%)	Onde L (%)
Chouet et al. [1998]	> 2 Hz	30 %	> 50 %
Arai et al. [1998]	1 - 12 Hz	30 %	70 %
Yamamoto [2000]	3 - 10 Hz	< 50%	> 50 %
Cornou [2002]	< 1 Hz	60%	40%

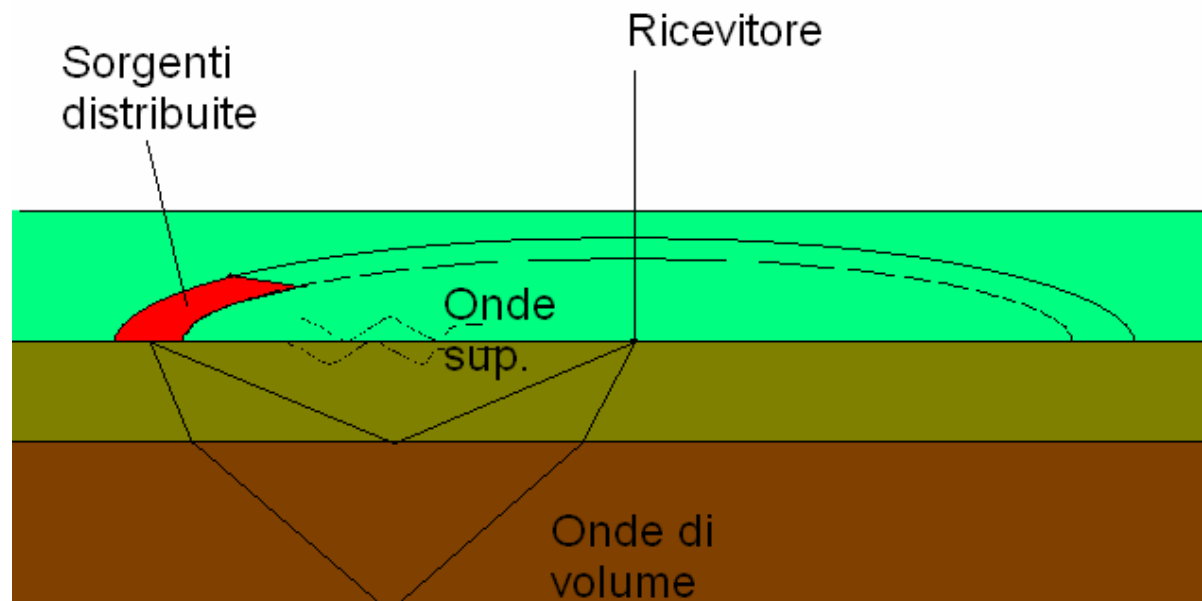
Tabella 1.3. Sintesi delle conclusioni di alcuni autori [Chouet et al., 1998; Yamamoto, 2000; Arai e Tokimatsu, 1998; Cornou, 2002] riguardo la proporzione tra onde di Rayleigh e di Love nei microtremori [da Sesame WP08, 2004].



Informazioni in questo senso possono venire dalla modellazione numerica

Assumendo che

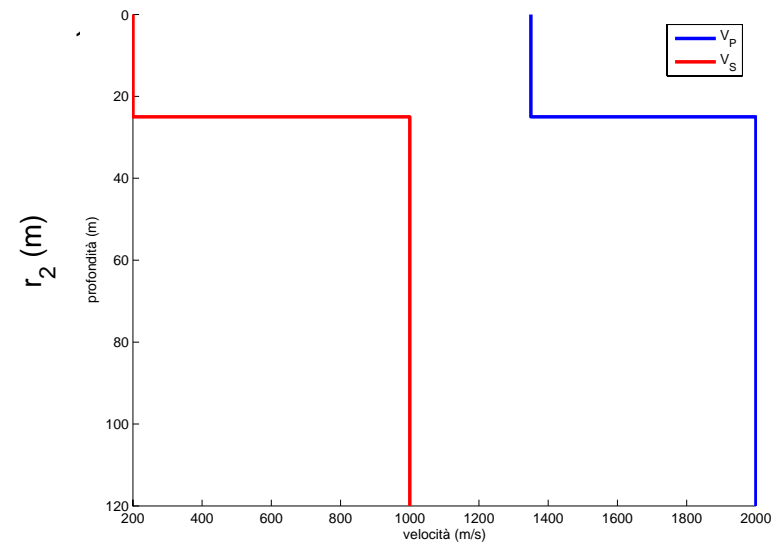
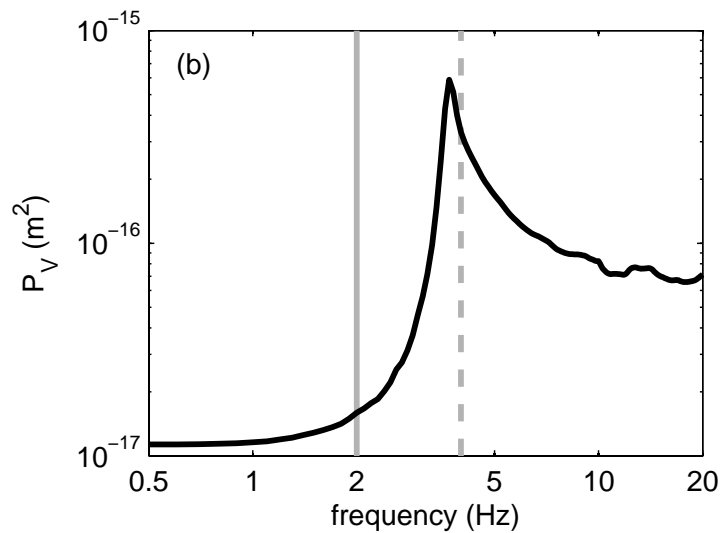
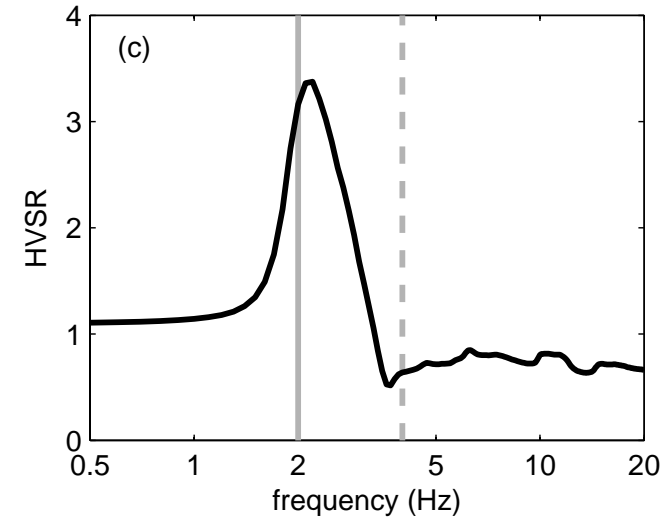
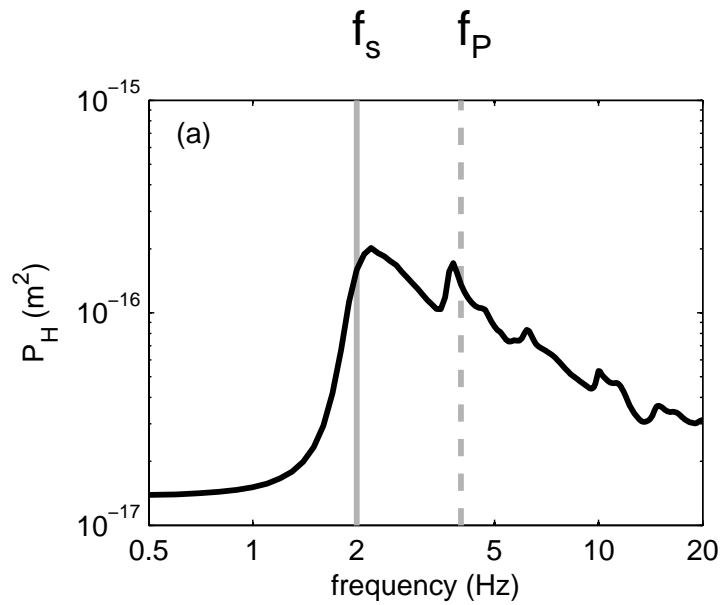
- 1. attorno al sito esista una distribuzione uniforme di sorgenti puntuali con ampiezza casuale e indipendenti fra loro orientate con probabilità uniforme nello spazio*
- 2. che il mezzo sia caratterizzato da eterogeneità di tipo 1D (almeno nelle vicinanze del sito per le lunghezze d'onda relative a ciascuna frequenza)*





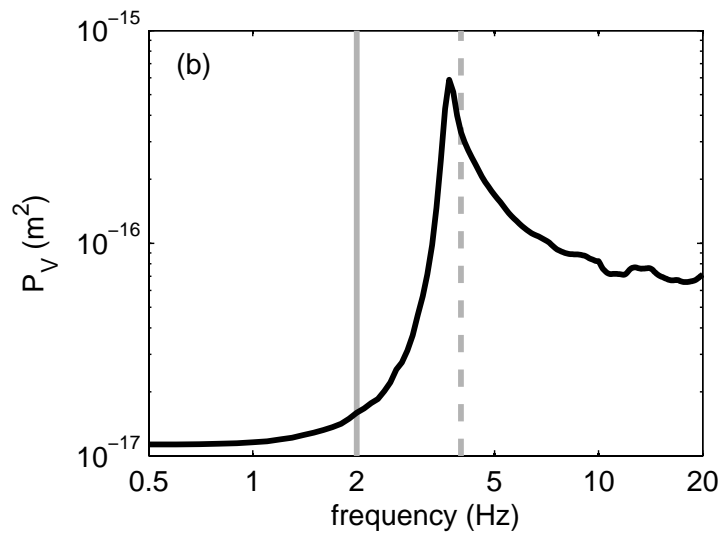
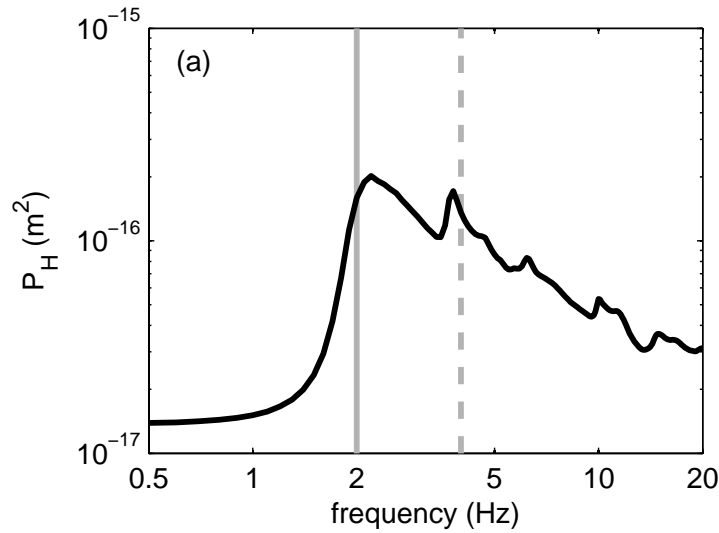
Simulazioni numeriche

La posizione dei massimi dei rapporti spettrali mostra una buona correlazione con le **frequenze di risonanza delle onde S** ($f_s = V_s/4H$, $f_p = V_p/4H$)

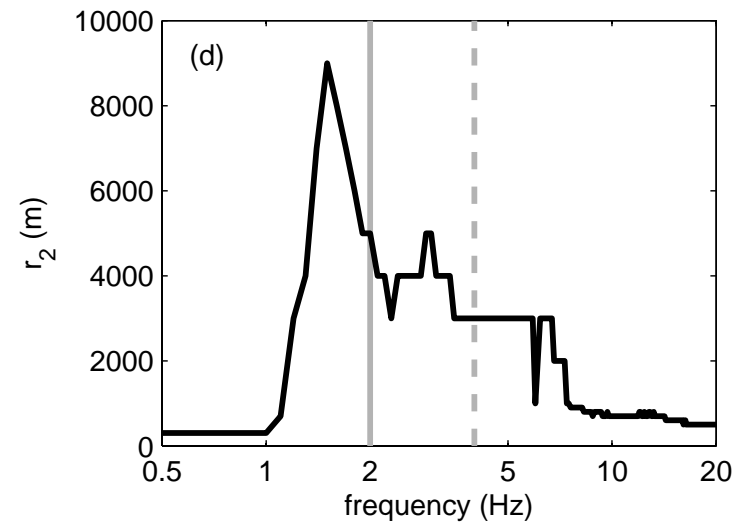
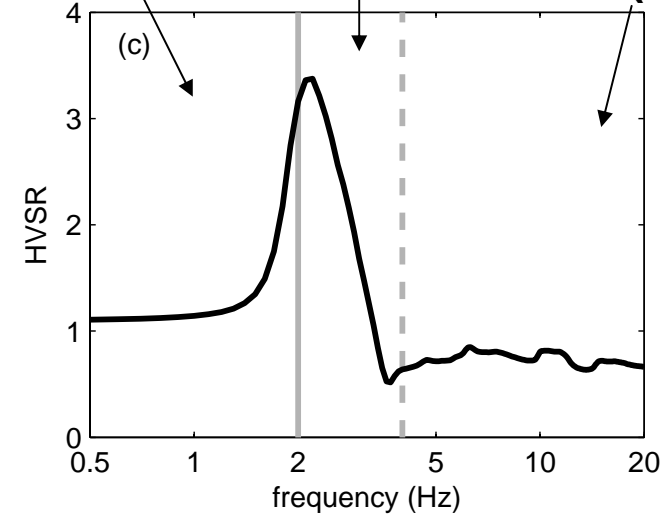




Campo completo

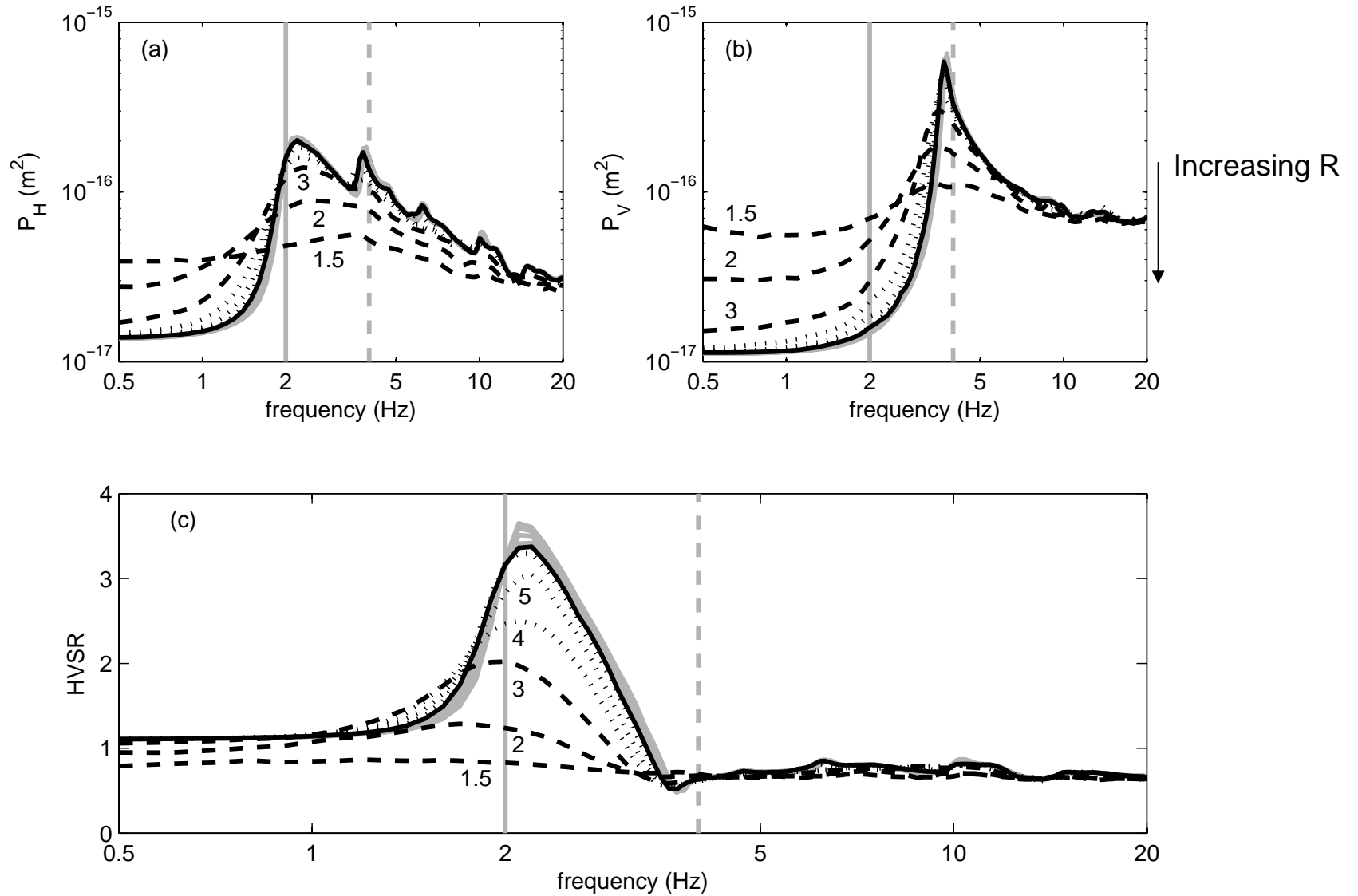


Low frequency range (LFR) Intermediate frequency range (IFR) High frequency range (HFR)



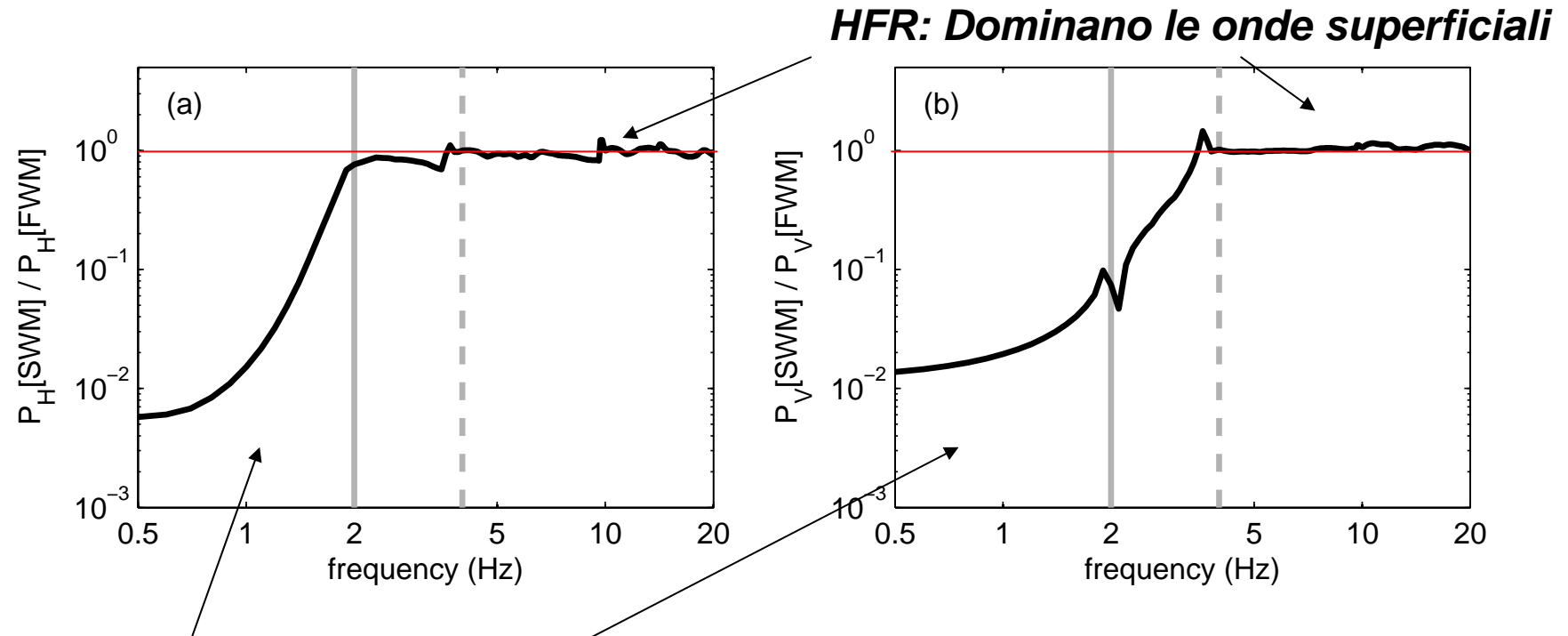


Effetto del contrasto di impedenza sismica





Relativa importanza delle onde superficiali



LFR: Altre fasi sono dominanti

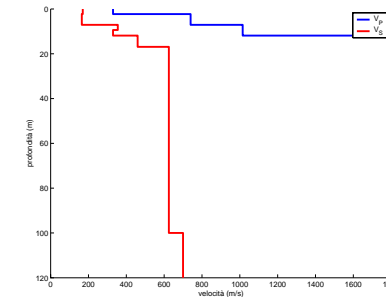
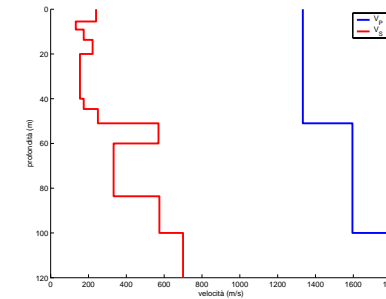
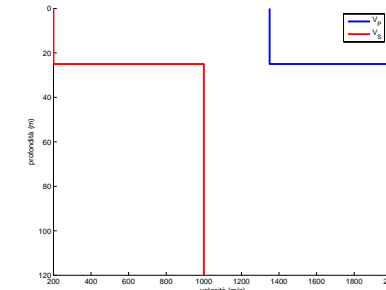
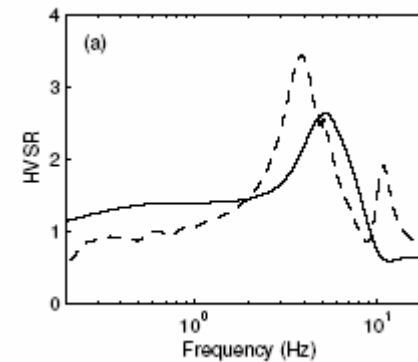
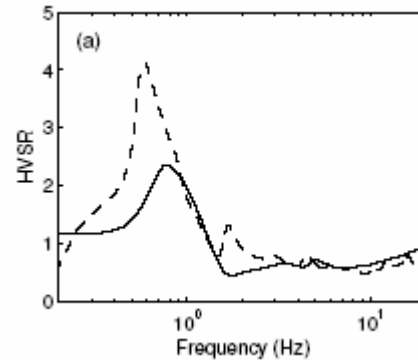
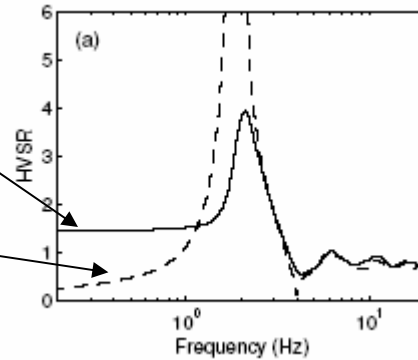
Al di sopra della frequenza di risonanza delle onde P, le onde superficiali dominano il campo d'onde (le onde di Rayleigh dominano le componenti verticali e quelle di Love le componenti orizzontali)



Campo completo

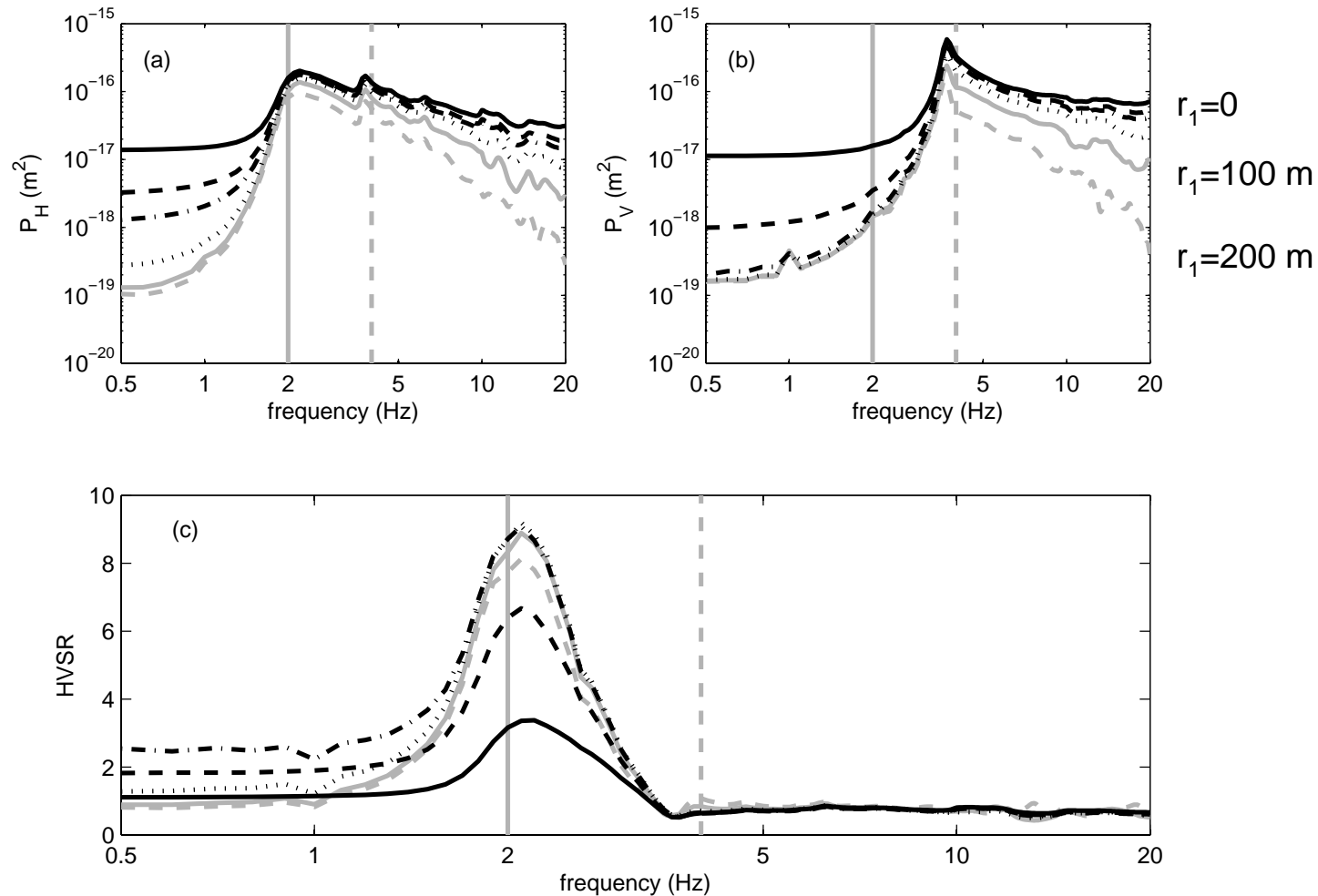
Approssimazione
onde superficiali

**In generale,
considerare il campo
come composto dalle
sole onde superficiali
rappresenta
comunque una
buona
approssimazione del
campo completo
almeno al di sopra
della sequenza di
risonanza delle
coperture**





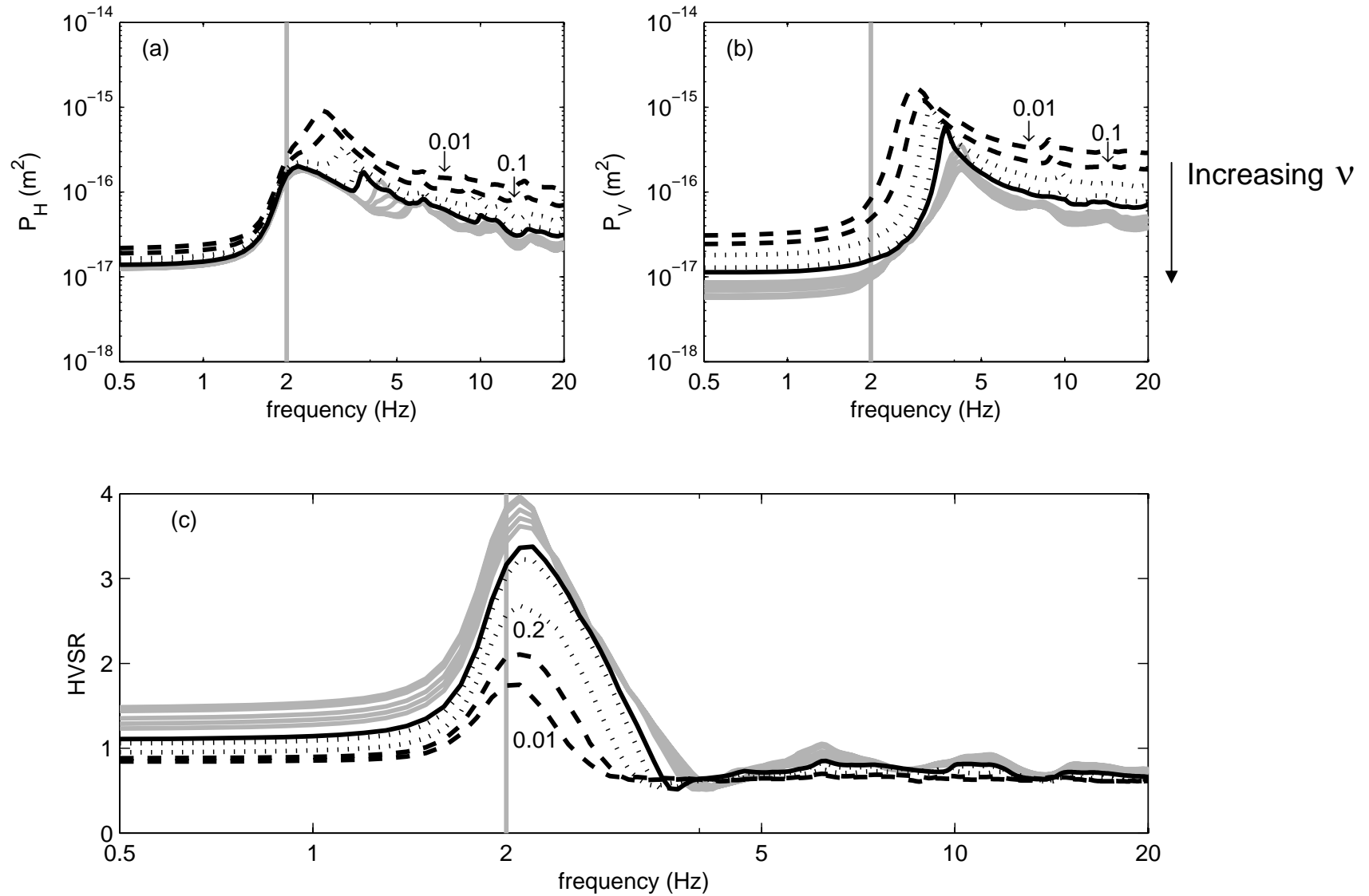
Effetto delle dimensioni dell'area libera da sorgenti



Le sorgenti vicine (<100 m) dominano le basse frequenze e influenzano la zona a frequenze intermedie (Vert.): La forma della curva HVSR dipende dalle dimensioni dell'area libera

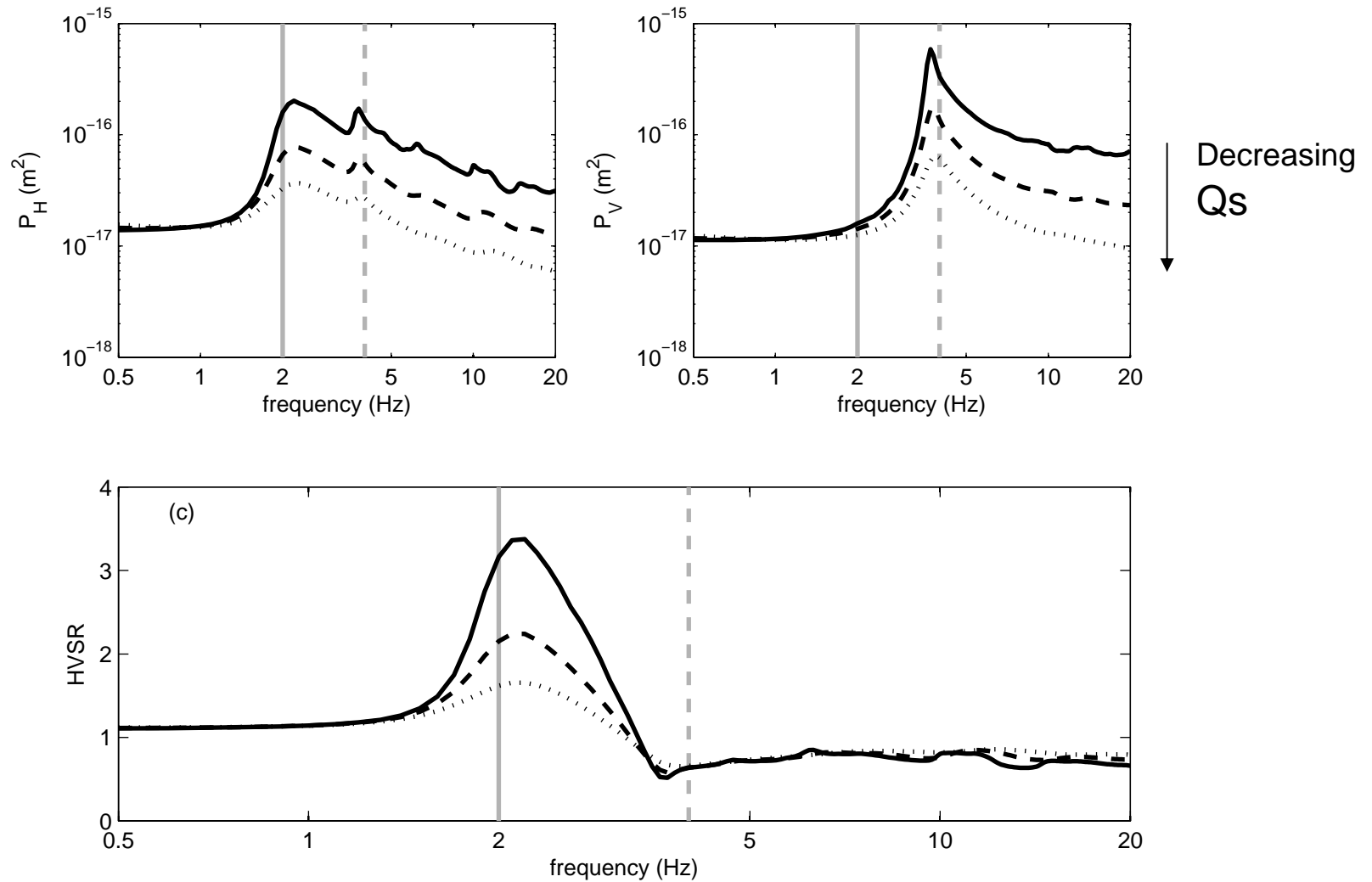


Effetto del rapporto di Poisson nello strato soffice





Effetto dello smorzamento ($Q_p = 1/2\xi_s$ and $Q_s = 1/2\xi_p$ factors)





In sintesi:

1. Le vibrazioni ambientali hanno ampiezze generalmente piccole e un carattere casuale
2. Le vibrazioni ambientali sono l'effetto combinato di sorgenti naturali e artificiali: le prime dominano le basse frequenze ($<0.5/1$ Hz) mentre le seconde dominano quelle alte (>1 Hz)
3. In bassa frequenza, l'ampiezza delle vibrazioni ambientali risulta stabile alla scala delle ore o dei giorni, mentre in alta frequenza questa stabilità è ristretta alla scala delle decine di minuti
4. Assai più stabili risultano i rapporti di ampiezza spettrale fra le componenti orizzontali e verticali del moto



5. Nella misura in cui, gli spettri medi sono espressione di una molteplicità di sorgenti distribuite all'intorno del punto di misura, i rapporti di ampiezza spettrale H/V delle vibrazioni misurate dipendono essenzialmente dalle caratteristiche meccaniche del mezzo all'interno del quale le vibrazioni si propagano
6. Le vibrazioni risultano composte in misura variabile sia da onde di volume (P ed S) che da onde superficiali (Rayleigh nella componente verticale, Love e Rayleigh in quella orizzontale) anche se queste ultime giocano un ruolo spesso prevalente soprattutto per le frequenze superiori alla frequenza di risonanza delle onde P



7. Per questo motivo, le curve H/V mostrano massimi in corrispondenza della frequenza di risonanza delle onde S, ovvero del massimo della funzione di ellitticità. In assenza di contrasti di impedenza, la curva attesa è piatta
8. L'ampiezza del massimo è proporzionale al contrasto di impedenza ma non in modo lineare
9. Comunque l'ampiezza non corrisponde all'entità dell'amplificazione attesa
10. L'ampiezza del massimo (e più in generale della curve HVSR attorno al massimo) è influenzata da numerosi fattori (smorzamento, distribuzione delle sorgenti, coefficiente di Poisson ovvero la rapporto V_P/V_S) il che lo rende un osservabile piuttosto ambiguo anche se potenzialmente molto informativo