



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

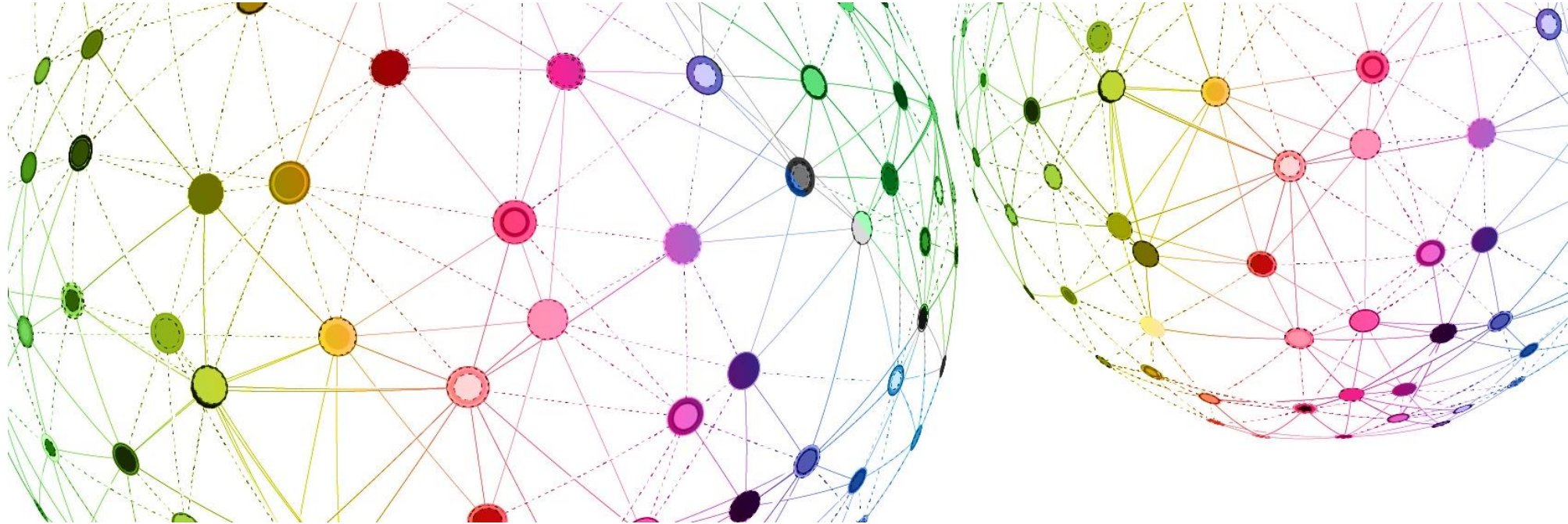
Bundesamt für Energie BFE  
Office fédéral de l'énergie OFEN  
Ufficio federale dell'energia UFE  
Uffizi federal d'energia UFE



Schweizerischer Erdbebendienst  
Service Sismologique Suisse  
Servizio Sismico Svizzero  
Swiss Seismological Service



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



© shutterstock 19778194

# DIRECTIVE C3

## RÉPONSE SISMIQUE DU SITE: IMPORTANCE ET MÉTHODES D'ANALYSE. APERÇU DE L'ÉTUDE «DÉSAMPLIFICATION AUX SITES DE BARRAGE AVEC $V_{s30} > 1105$ M/S »

Paolo Bergamo<sup>1</sup>, Amin Askarinejad<sup>2</sup>, Federico Galster<sup>2</sup>, Donat Fäh<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Service Sismologique Suisse EPFZ, [paolo.bergamo@sed.ethz.ch](mailto:paolo.bergamo@sed.ethz.ch) ; <sup>2</sup> Office fédéral de l'énergie OFEN



# THÈMES DE DISCUSSION

---

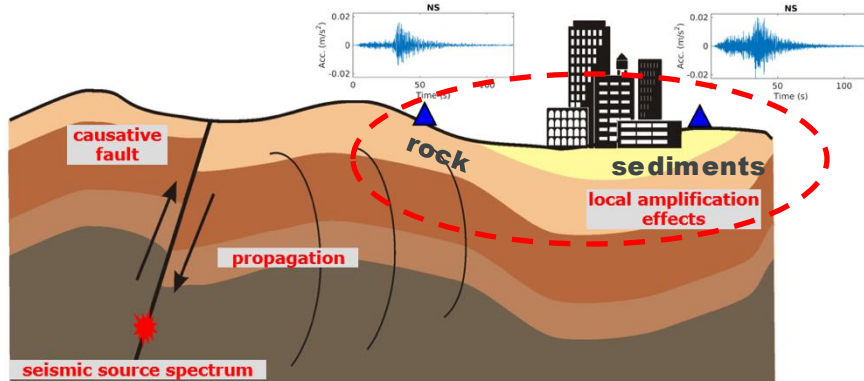
- Introduction – Amplification sismique du site
  - *Qu'est-ce que c'est?*
  - *Pourquoi est-ce important ?*
  - *Comment l'estimer ?*
- l'étude « Potentiel de désamplification par rapport au spectre de réponse élastique pour les fondations des barrages avec  $V_{s30} > 1105 \text{ m/s}$  »
  - *Ensembles de données d'entrée*
  - *Résultats obtenus*
  - *Recommandations pour les études géophysiques pour la caractérisation de site*
- Conclusions



# 1/3) INTRODUCTION

## RÉPONSE SISMIQUE DU SITE

Réponse sismique du site– qu'est-ce que c'est ?



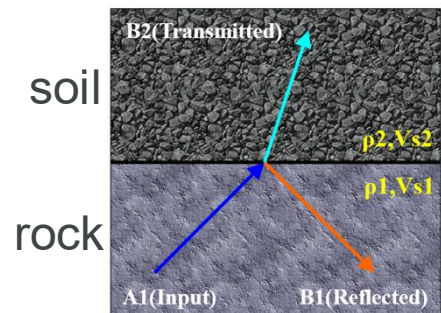
d'après Ciaccio  
& Cultrera  
(2014)

Le terme « amplification du site » ou « réponse du site » désigne l'effet des couches superficielles du sous-sol sur les ondes sismiques se propageant à partir de la croûte terrestre

Deux mécanismes principaux :

- 1) Effet du contraste d'impédance sismique
- 2) Effet de la résonance 1D

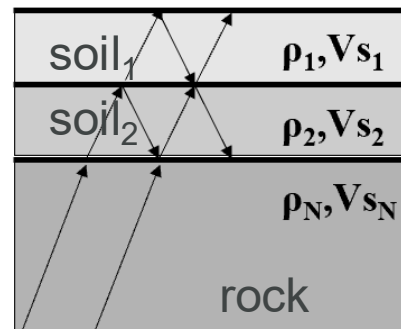
Contraste d'impédance



$$B_2 = \frac{2\rho_1 V_{s1}}{\rho_1 V_{s1} + \rho_2 V_{s2}} \times A_1$$
$$\rho_1 > \rho_2, V_{s1} > V_{s2}$$

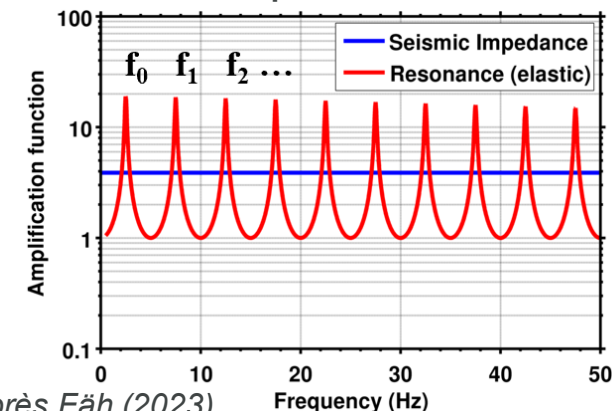
d'après Fäh (2023)

Résonance



Dans les sédiments, les ondes sont « piégées » et peuvent interférer, provoquant une amplification

Fonction d'amplification du sol



d'après Fäh (2023)



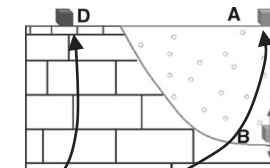
# 1/3) INTRODUCTION

## RÉPONSE SISMIQUE DU SITE

### Réponse sismique du site – Pourquoi est-ce important ?

L'amplification du site présente une large gamme de variabilité

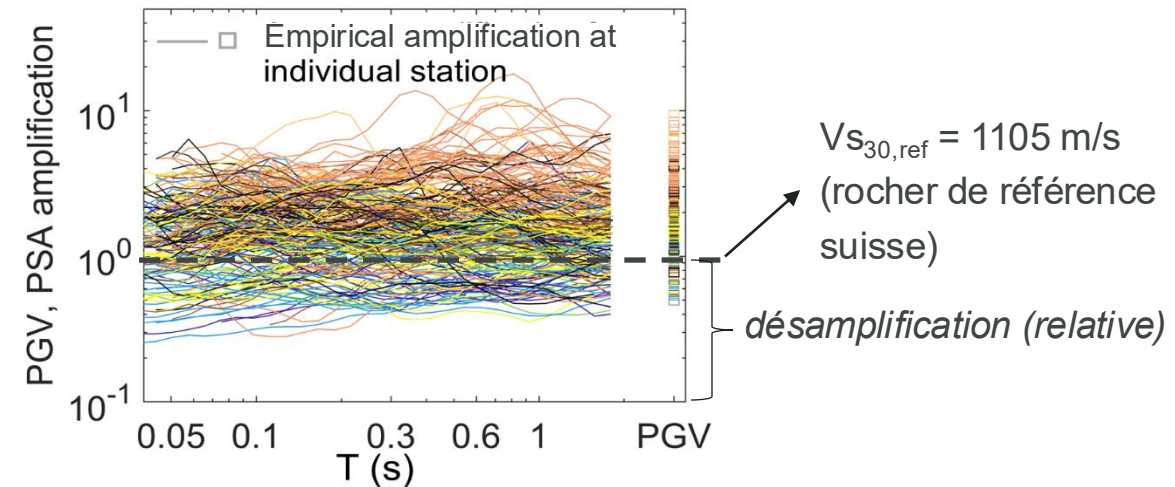
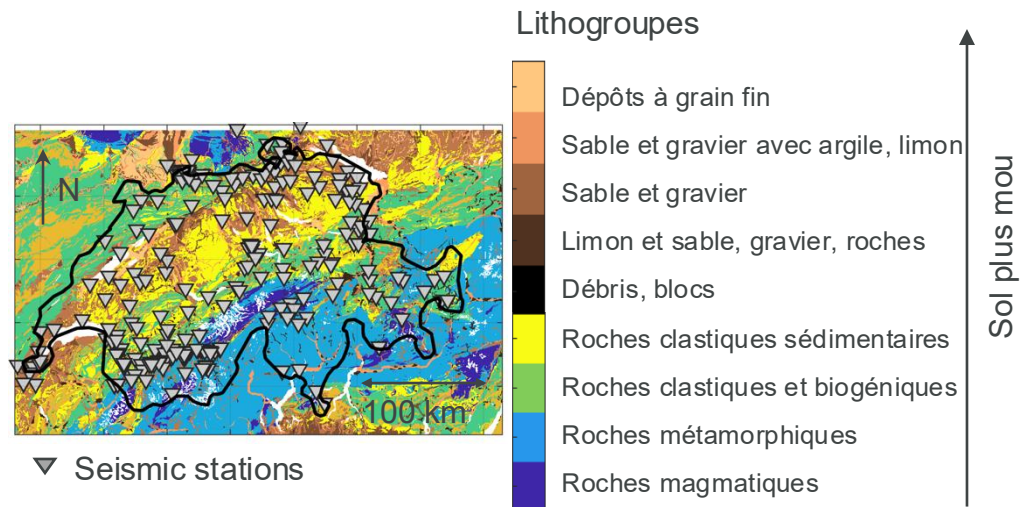
D = rocher de référence suisse  
( $V_{s30} = 1105$  m/s)



A = site d'étude

Amplification du site à  $A = SA_A / SA_D$

*Cadet et al. (2012)*





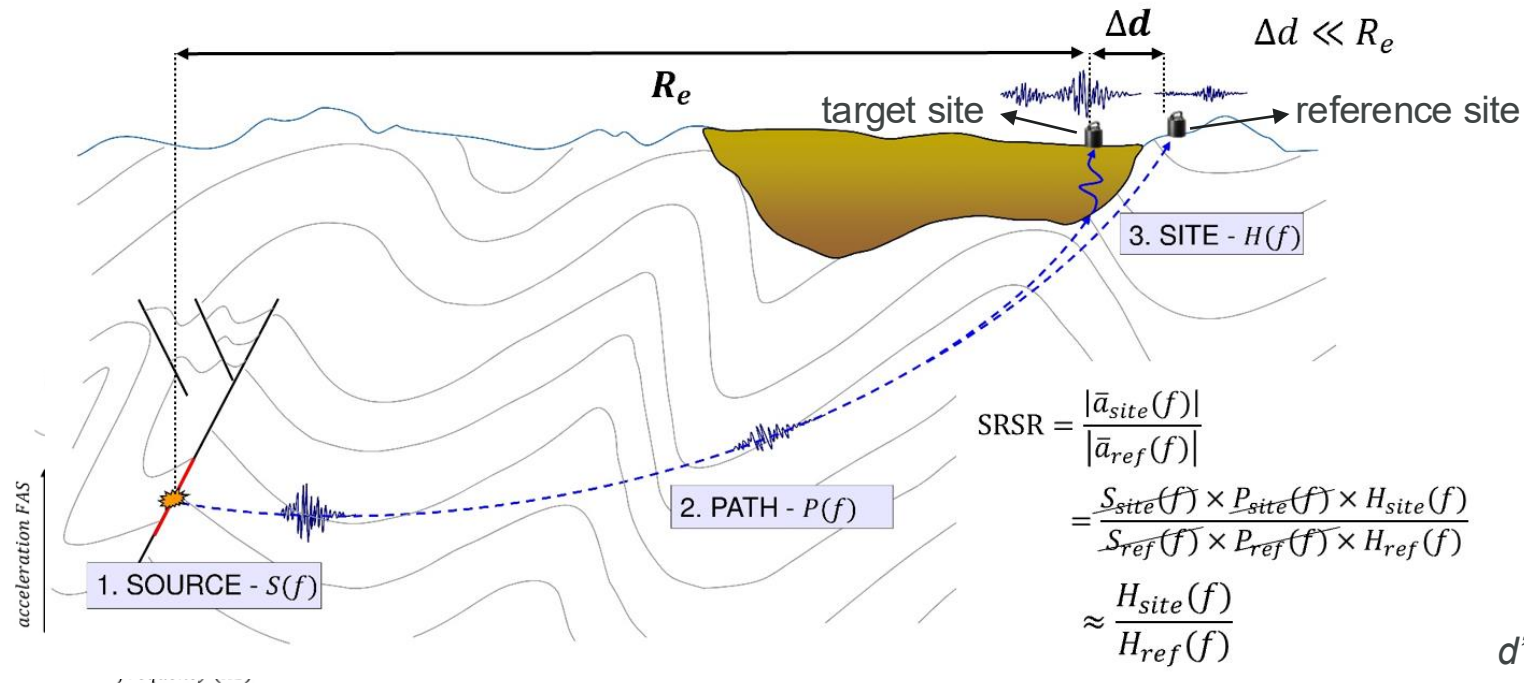


# 1/3) INTRODUCTION

## RÉPONSE SISMIQUE DU SITE

Réponse sismique du site – Comment l'estimer ? (Voie 1b, 2, Dir. C3)

A) Mesure directe de l'amplification du site à partir d'enregistrements sismiques -> rapport spectral site/référence (SRSR)



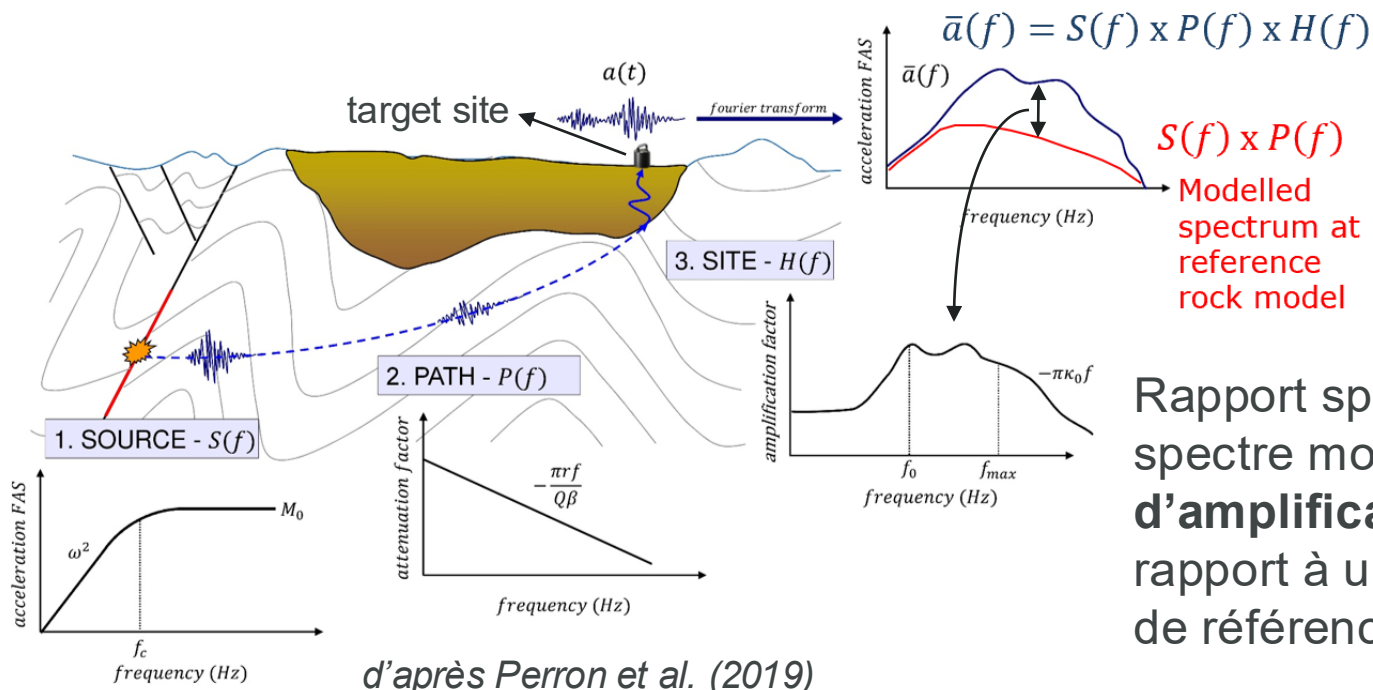


# 1/3) INTRODUCTION

## RÉPONSE SISMIQUE DU SITE

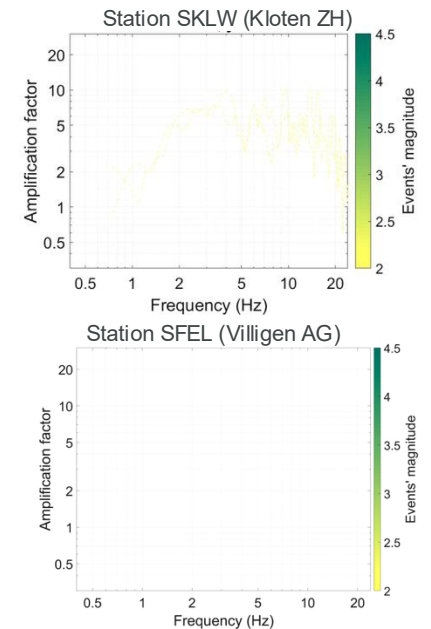
Réponse sismique du site – Comment l'estimer ? (Voie 1b, 2, Dir. C3)

A) Mesure directe de l'amplification du site à partir d'enregistrements sismiques -> «Empirical Spectral Modeling» (ESM)



Rapport spectre mesuré /  
spectre modélisé = **fonction  
d'amplification du site** par  
rapport à un modèle de roche  
de référence standard

### Exemples



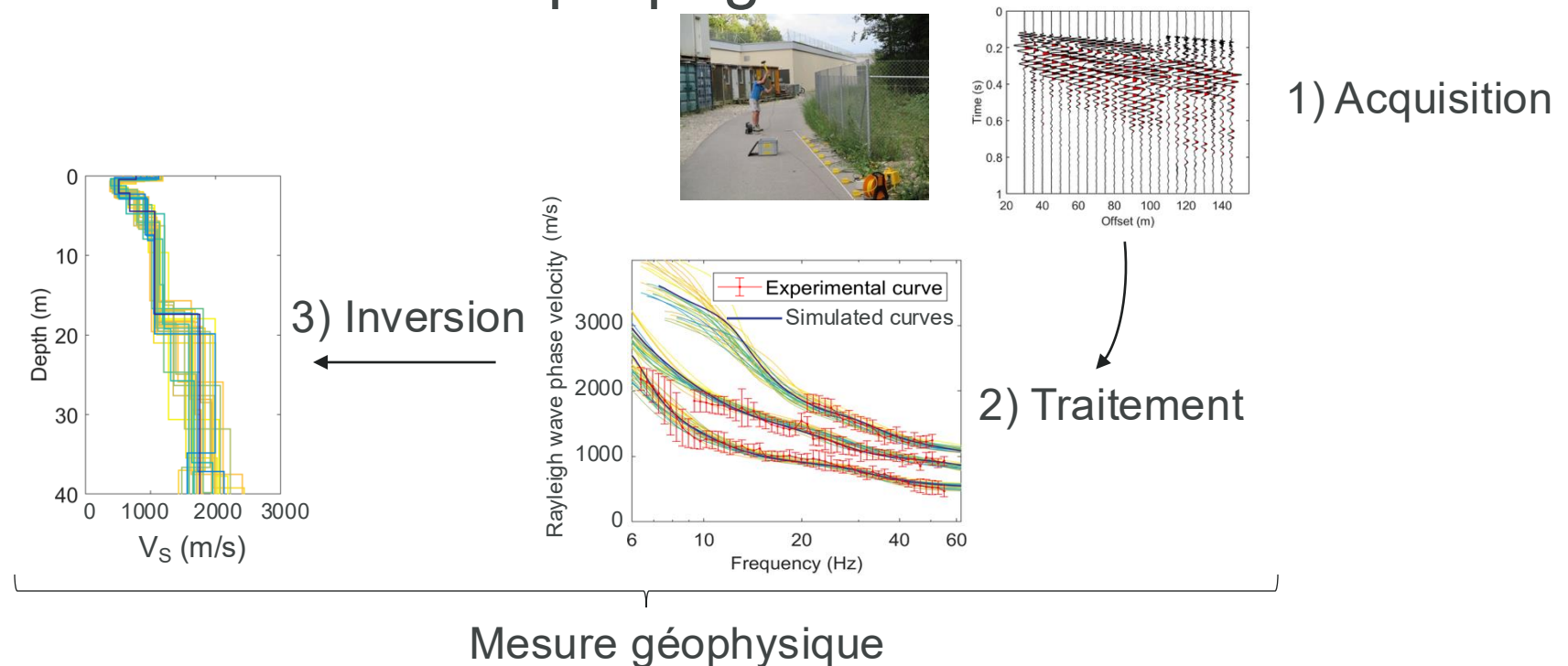


# 1/3) INTRODUCTION

## RÉPONSE SISMIQUE DU SITE

Réponse sismique du site – Comment l'estimer ? (Voie 1b, 2, Dir. C3)

B) Mesures géophysiques du profil de vitesse local des ondes de cisaillement ( $V_s$ ) + simulation de la propagation des ondes



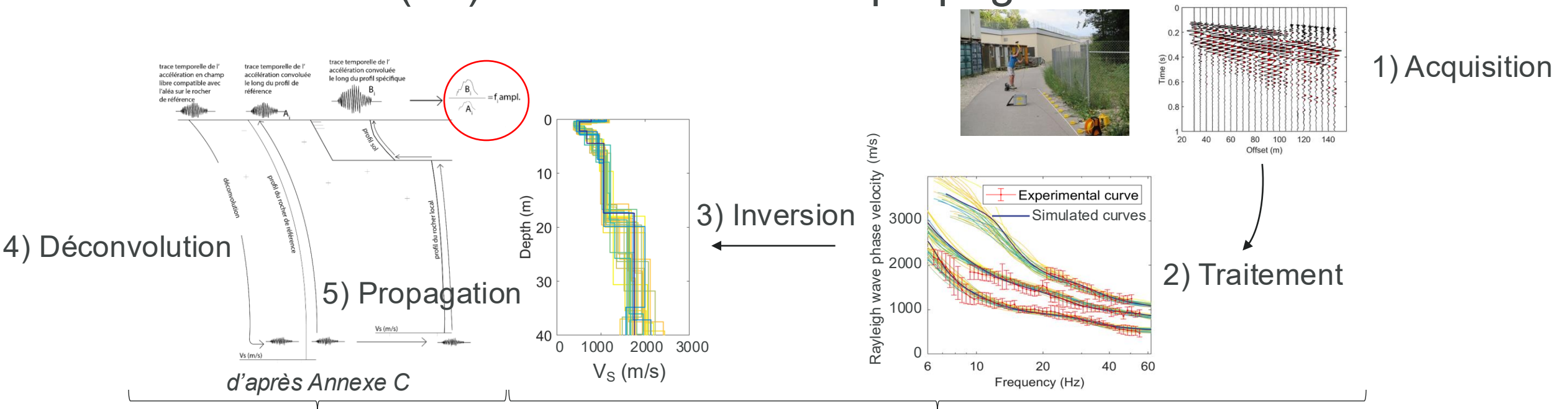


# 1/3) INTRODUCTION

## RÉPONSE SISMIQUE DU SITE

Réponse sismique du site – Comment l'estimer ? (Voie 1b, 2, Dir. C3)

B) Mesures géophysiques du profil de vitesse local des ondes de cisaillement ( $V_s$ ) + simulation de la propagation des ondes



Simulation de propagation des ondes

Mesure géophysique

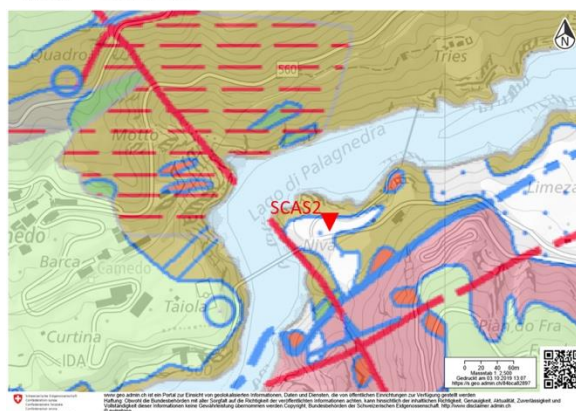







# 1/3) INTRODUCTION RÉPONSE SISMIQUE DU SITE

Exemple : amplification de site à la station sismique SCAS2 (Camedo, TI)



SCAS2



-  Roche cristalline
-  Éboulis
-  Gneiss "Monte Rosa"
-  Moraine
-  Faille



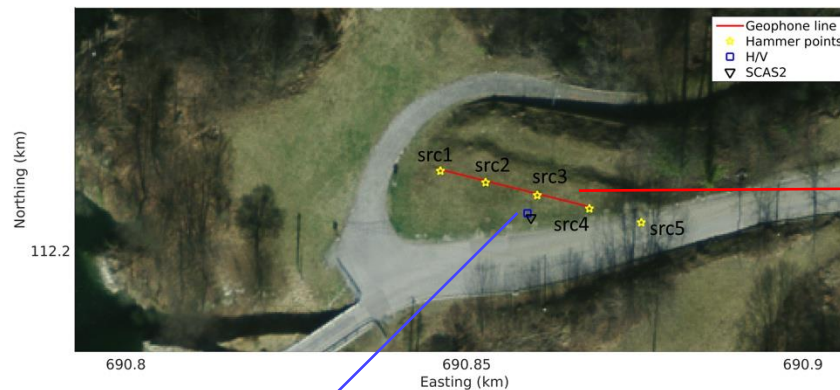
# 1/3) INTRODUCTION

## RÉPONSE SISMIQUE DU SITE

Exemple : amplification de site à la station sismique SCAS2 (Camedo, TI)



### 1) Acquisition



Mesure  
sismique  
active



24 géophones à 3  
composants, 4.5 Hz

Source : masse de  
6 kg sur plaque  
métallique  
triangulaire  
(réfraction des  
ondes P et S) et  
plaque métallique  
plate (MASW)

Acquisition de bruit ambiant



Capteur Lennartz 5-s  
Acquisition: 1 heure



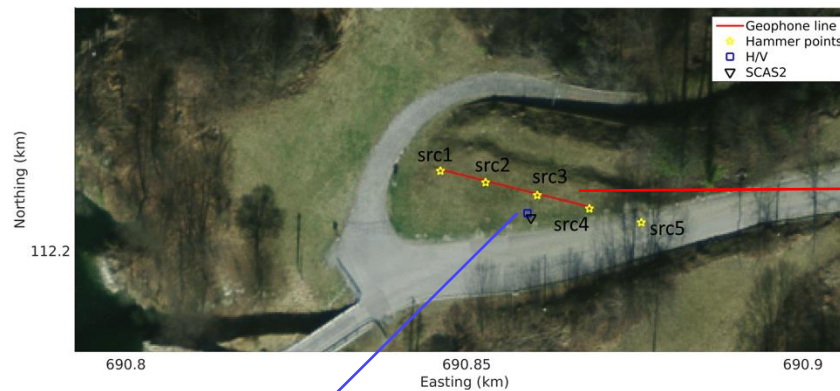
# 1/3) INTRODUCTION

## RÉPONSE SISMIQUE DU SITE

Exemple : amplification de site à la station sismique SCAS2 (Camedo, TI)

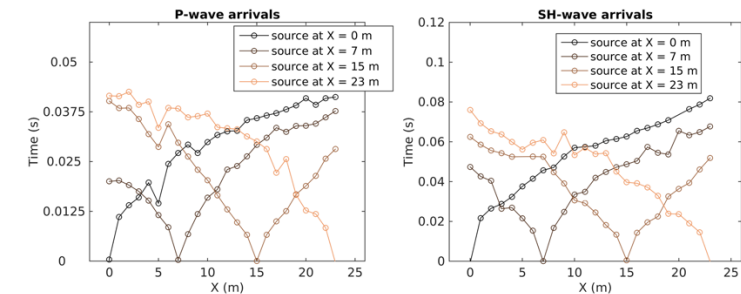


### 2) Traitement

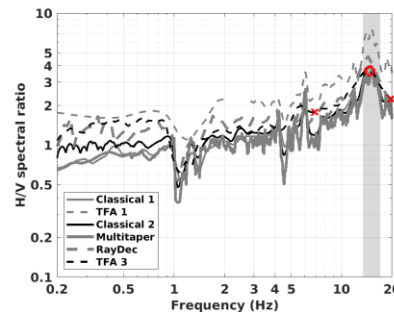


Mesure  
sismique  
active

### Réfraction des ondes P et S

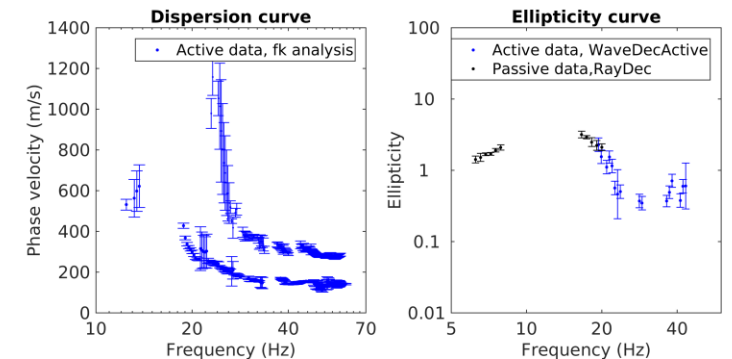


### Acquisition de bruit ambiant



$f_0$ , fréquence  
de résonance  
du sol

### MASW







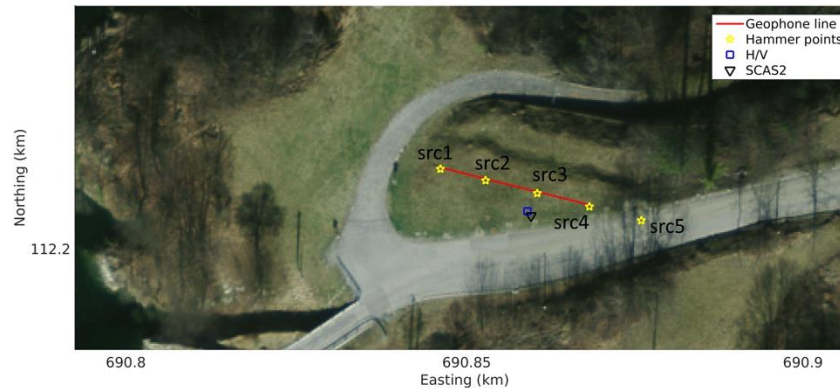
# 1/3) INTRODUCTION

## RÉPONSE SISMIQUE DU SITE

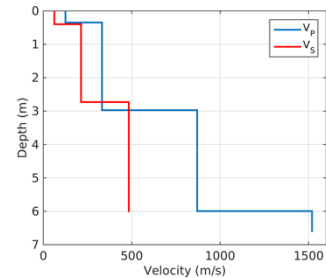
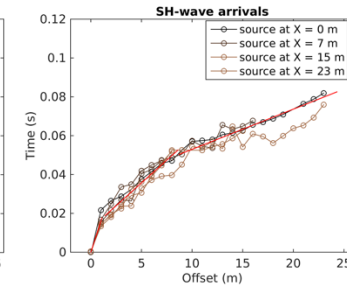
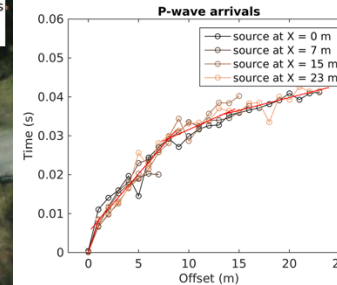
Exemple : amplification de site à la station sismique SCAS2 (Camedo, TI)



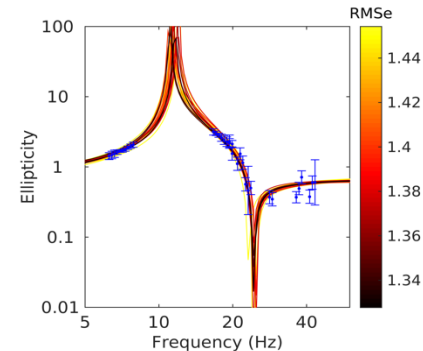
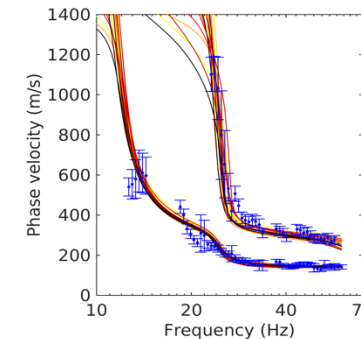
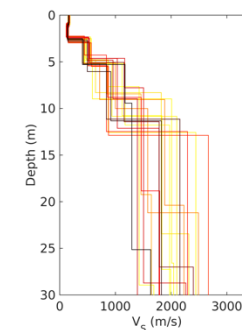
### 3) Inversion



### Réfraction des ondes P et S



### MASW



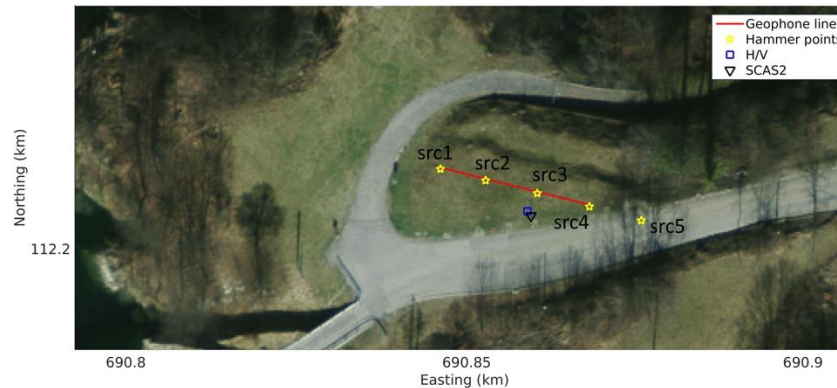


# 1/3) INTRODUCTION

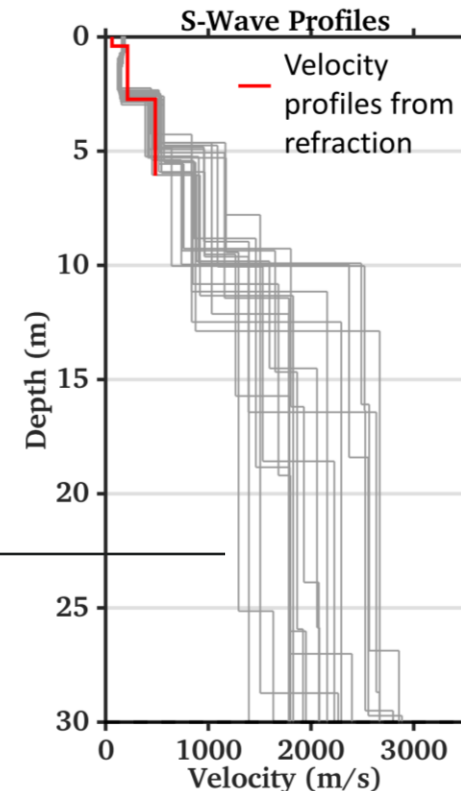
## RÉPONSE SISMIQUE DU SITE

Exemple : amplification de site à la station sismique SCAS2 (Camedo, TI)

### 3) Inversion



Les 20 profils de vitesse des ondes S les plus performants obtenus après l'inversion des données des ondes de Rayleigh



$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

$$V_{S30} = 894 \pm 40 \text{ m/s}$$

Profondeur jusqu'à  $V_s > 800 \text{ m/s} = 5.1 \text{ m}$

$V_s$  moyen des sédiments de surface = 273 m/s

**Classe E** selon la Directive C3

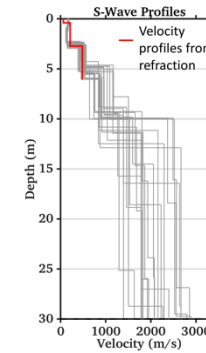
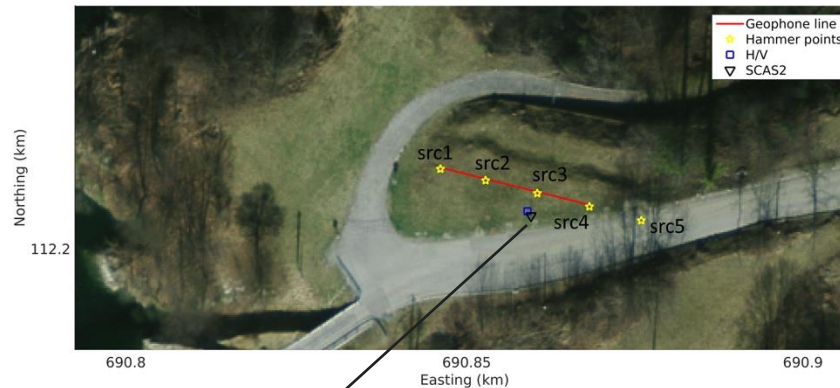




# 1/3) INTRODUCTION

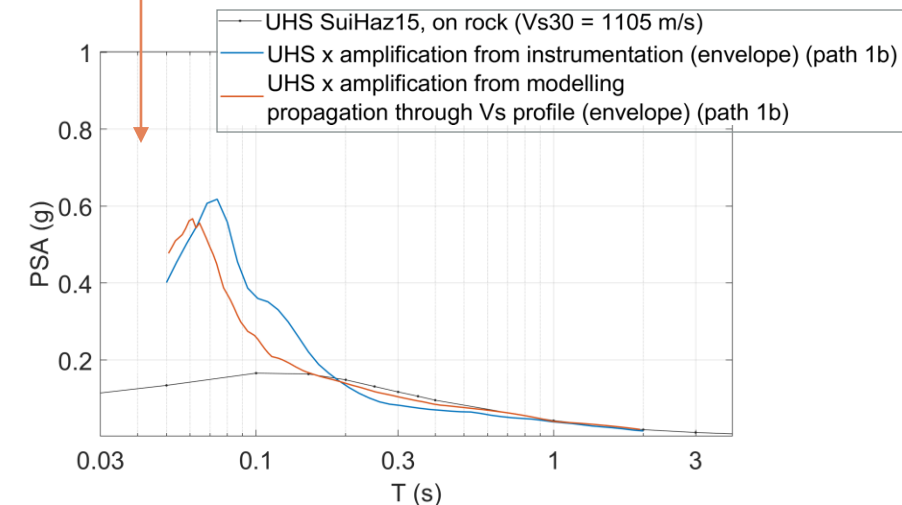
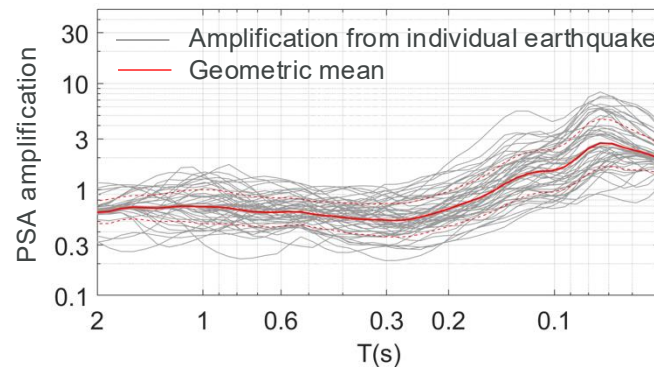
## RÉPONSE SISMIQUE DU SITE

Exemple : amplification de site à la station sismique SCAS2 (Camedo, TI)



Déconvolution +  
modélisation de la  
propagation des ondes  
à travers du profil Vs

Fonction d'amplification  
empirique à partir des  
enregistrements  
sismiques de la station

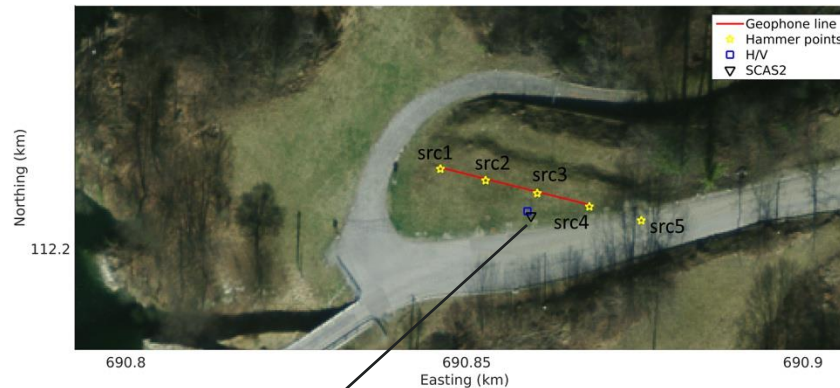




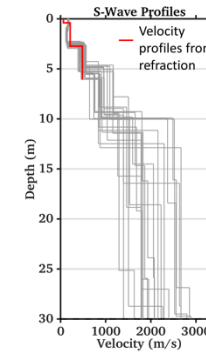
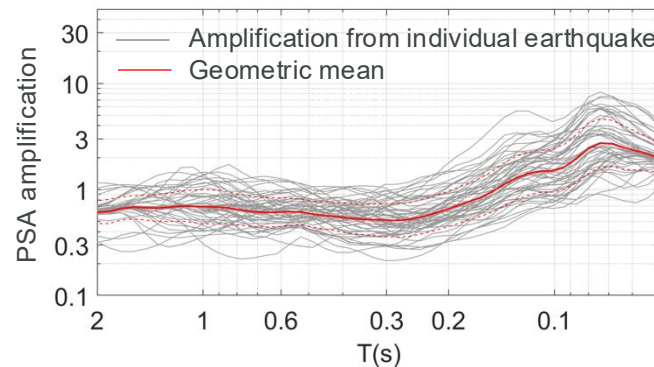
# 1/3) INTRODUCTION

## RÉPONSE SISMIQUE DU SITE

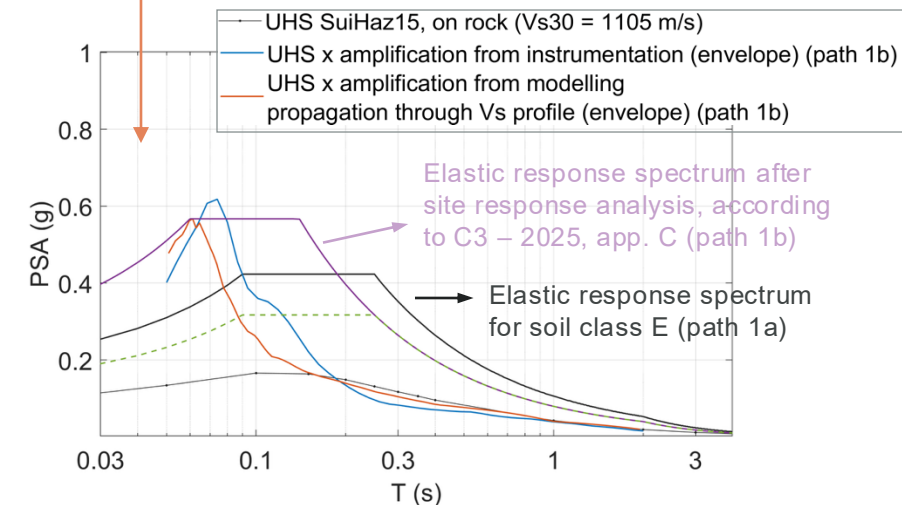
Exemple : amplification de site à la station sismique SCAS2 (Camedo, TI)



Fonction d'amplification empirique à partir des enregistrements sismiques de la station



Déconvolution +  
modélisation de la  
propagation des ondes  
à travers du profil Vs





## 2/3) ÉTUDE

### DÉSAMPLIFICATION POUR LES FONDATIONS AVEC VS30 > 1105 M/S

---

- Projet « Potentiel de désamplification par rapport au spectre de réponse élastique pour les fondations des barrages avec Vs30 > 1105 m/s »



désamplification par rapport au rocher de  
référence suisse (Vs30 = 1105 m/s)



## 2/3) ÉTUDE

### DÉSAMPLIFICATION POUR LES FONDATIONS AVEC $V_{s30} > 1105$ M/S

---

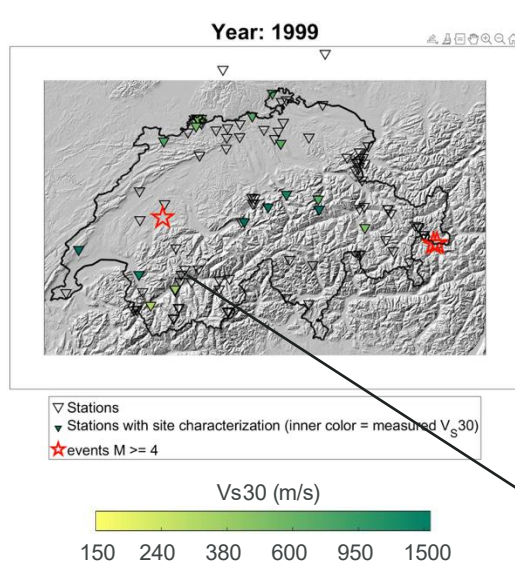
- Projet « Potentiel de désamplification par rapport au spectre de réponse élastique pour les fondations des barrages avec  $V_{s30} > 1105$  m/s »
- Mandaté par l'OFEN au SED (Service Sismologique Suisse à l'EPF de Zurich)
- Objectifs:
  - *Calcul de facteurs de désamplification empiriques pour comparaison avec les facteurs d'ajustement de Danciu et Fäh (2017)*
  - *Détermination de la désamplification admissible pour les sites avec  $V_{s30} > 1105$  m/s*
  - *Recommandations d'étude du site pour une application fiable de la désamplification*



## 2/3) ÉTUDE

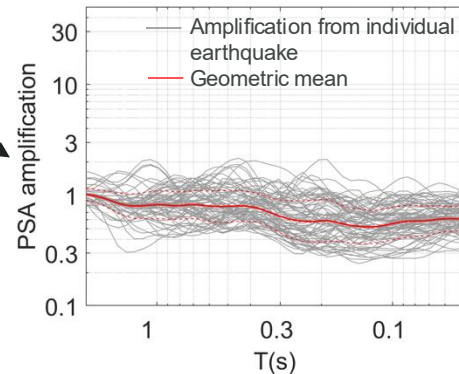
### DÉSAMPLIFICATION POUR LES FONDATIONS AVEC $V_{S30} > 1105$ M/S

Objectif 1: *calcul de facteurs de désamplification empiriques pour comparaison avec les facteurs d'ajustement de Danciu et Făh (2017)*

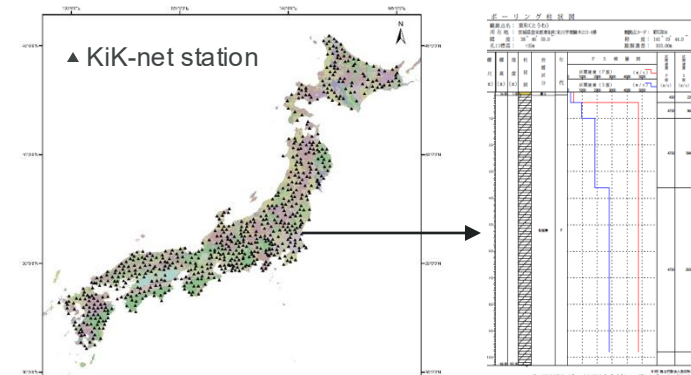


Fonctions d'amplification empiriques à partir de la modélisation spectrale (enregistrements 1999 – 2024)

Station STSW2, Tseuzier (VS)  
 $V_{S30} = 1057$  m/s

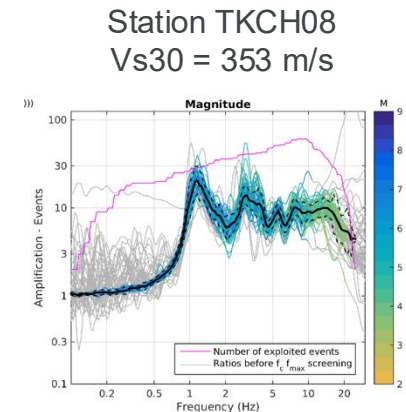


Stations japonaises KiK-net (enregistrements 1997 - 2013)



Données en libre accès

Profil  $V_s$  mesuré (P-S logging)



Rapport surface/fond d'un forage



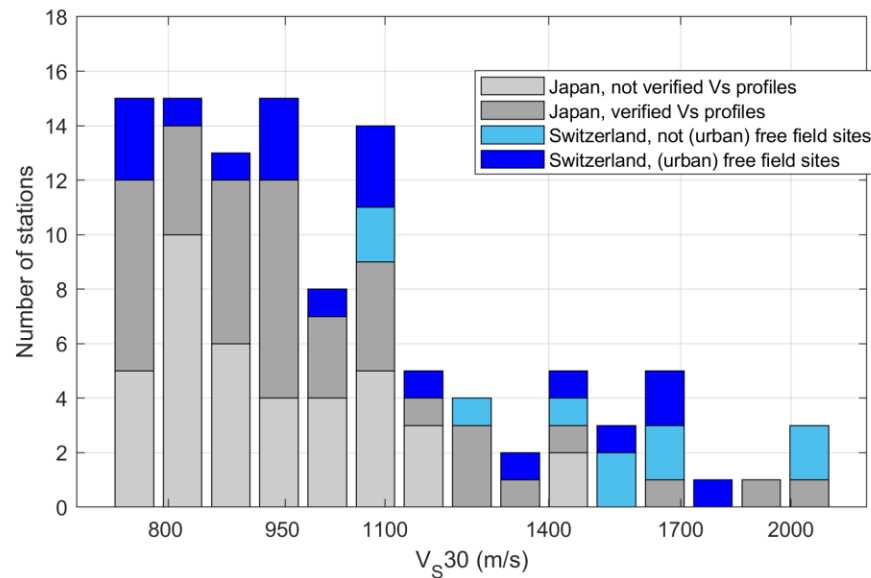


## 2/3) ÉTUDE

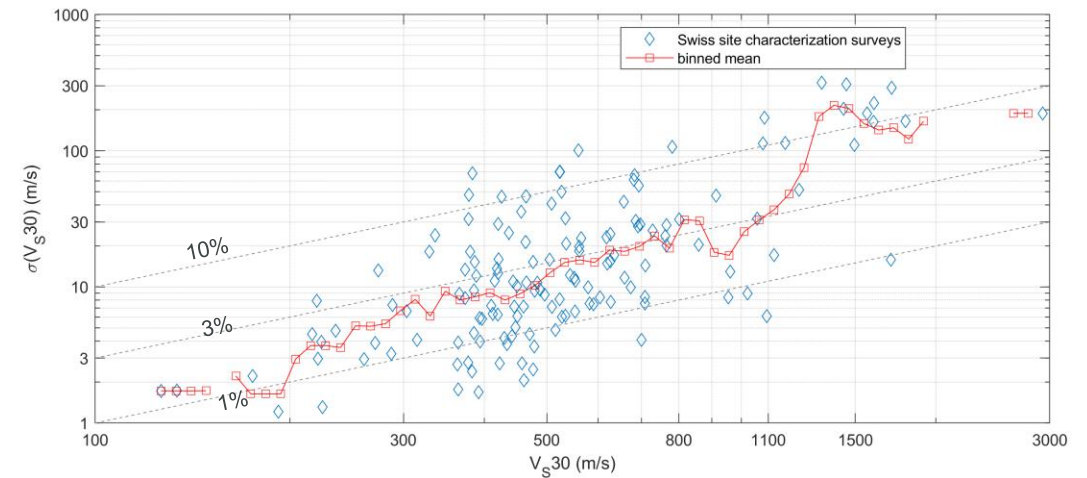
### DÉSAMPLIFICATION POUR LES FONDATIONS AVEC VS30 > 1105 M/S

Objectif 1: *calcul de facteurs de désamplification empiriques pour comparaison avec les facteurs d'ajustement de Danciu et Fähr (2017)*

Nous nous concentrons sur les stations avec Vs30 > 750 m/s



Nous classons les stations par intervalles de Vs30 en tenant compte de la  $\sigma$  d'estimation de Vs30

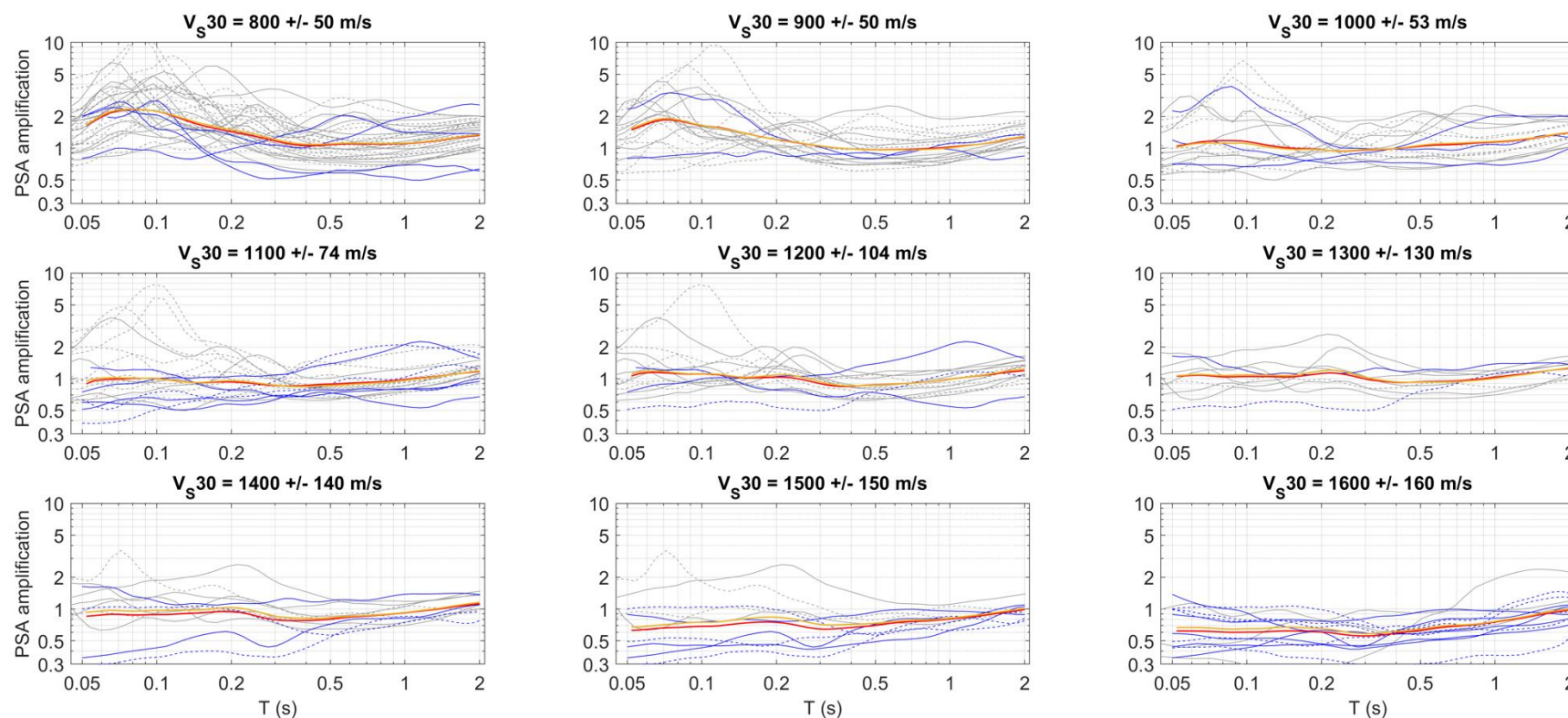




## 2/3) ÉTUDE

### DÉSAMPLIFICATION POUR LES FONDATIONS AVEC $V_{S30} > 1105$ M/S

Objectif 1: *calcul de facteurs de désamplification empiriques pour comparaison avec les facteurs d'ajustement de Danciu et Fäh (2017)*



Fonctions d'amplification empiriques des stations sismiques :

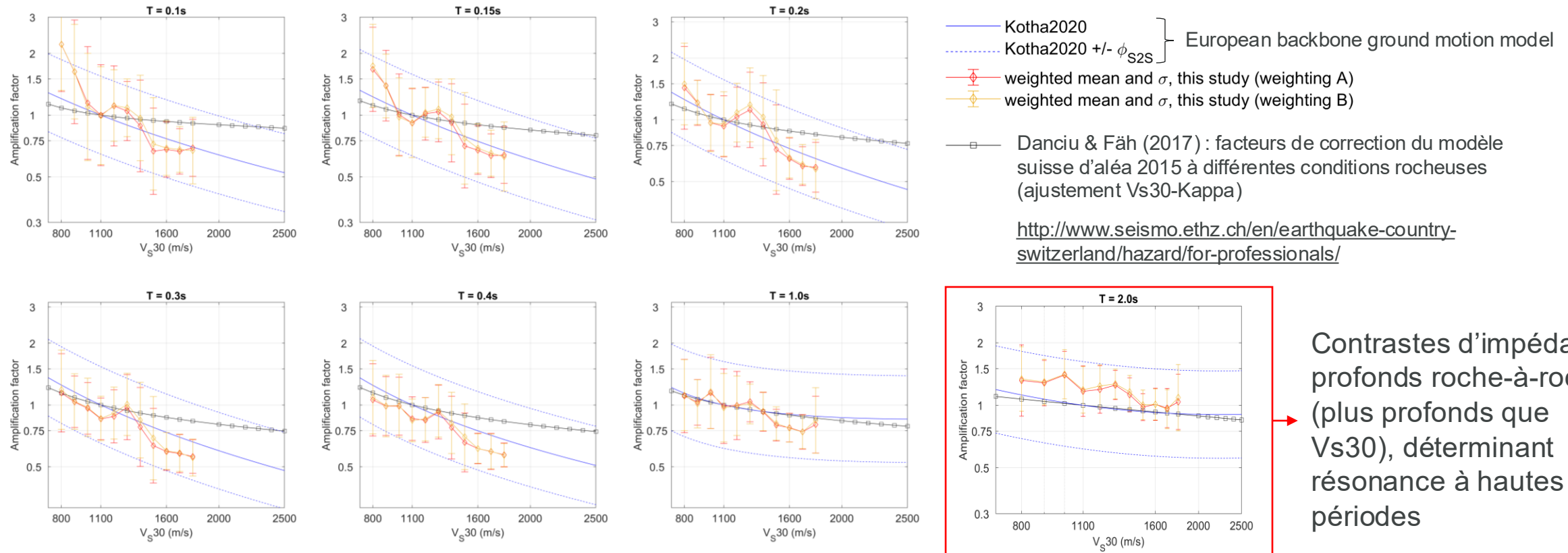
- Stations suisses « free field »
- - - Autres stations suisses
- Stations KiKnet avec des profils de  $V_s$  fiables
- - - Autres stations KiKnet
- Moyenne pondérée, pondération A
- Moyenne pondérée, pondération B



## 2/3) ÉTUDE

### DÉSAMPLIFICATION POUR LES FONDATIONS AVEC VS30 > 1105 M/S

Objectif 1: *calcul de facteurs de désamplification empiriques pour comparaison avec les facteurs d'ajustement de Danciu et Fäh (2017)*





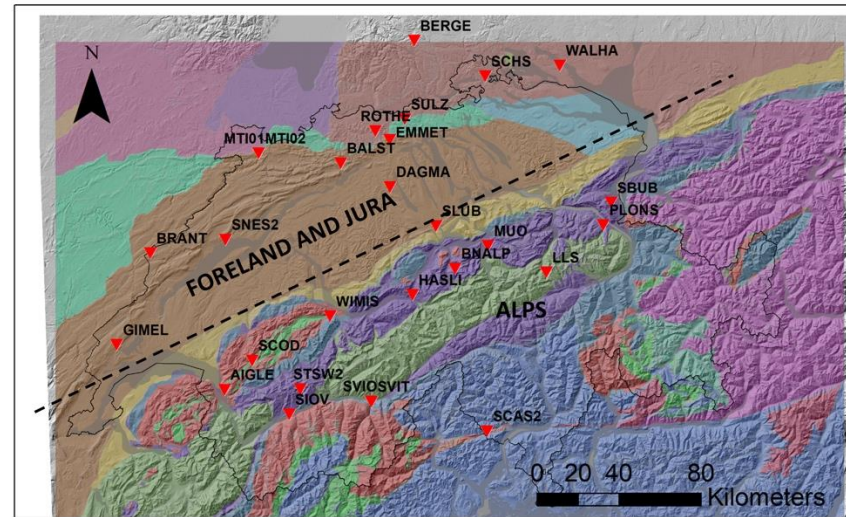
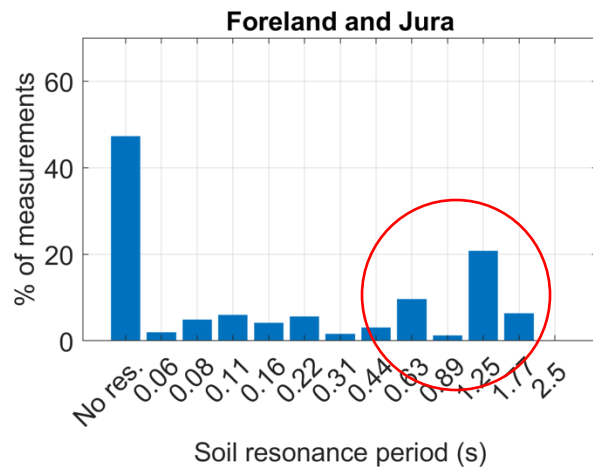
## 2/3) ÉTUDE

### DÉSAMPLIFICATION POUR LES FONDATIONS AVEC VS30 > 1105 M/S

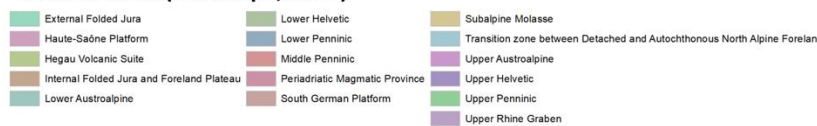
Objectif 2: *déterminer la désamplification admissible pour les sites avec Vs30 > 1105 m/s*

#### Plateau et Jura

- Prévalence des roches sédimentaires
- Résonances à hautes périodes correspondant à des contrastes d'impédance profonde entre roches: plus fréquentes



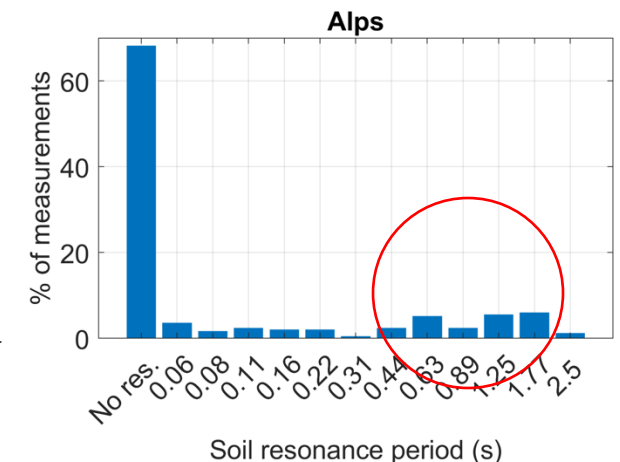
Tectonic units (Swisstopo, 2024)



520 mesures de bruit ambiant  
sur des sols de classe A, ou  
des affleurements rocheux

#### Région alpine

- Prévalence des roches métamorphiques et cristallines
- Résonances à hautes périodes correspondant à des contrastes d'impédance profonde entre roches: moins fréquentes



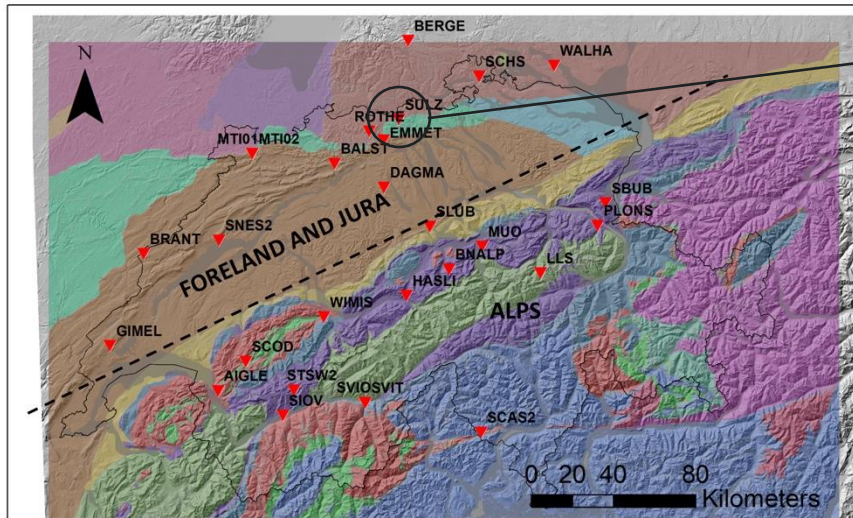




## 2/3) ÉTUDE

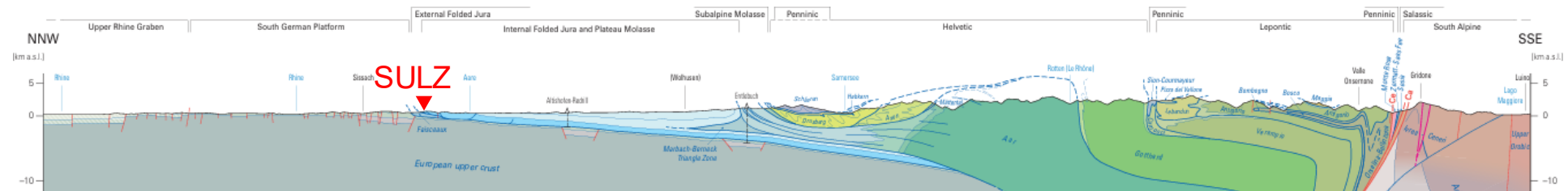
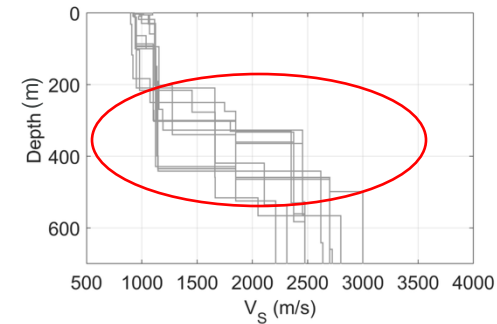
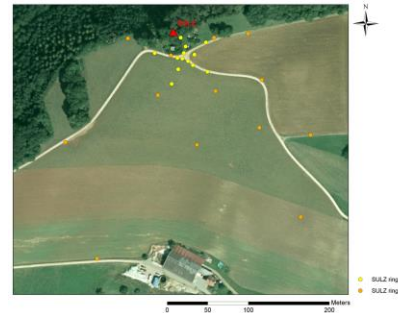
### DÉSAMPLIFICATION POUR LES FONDATIONS AVEC $V_{S30} > 1105$ M/S

Objectif 2: *déterminer la désamplification admissible pour les sites avec  $V_{S30} > 1105$  m/s*



Station **SULZ** (Sulz, AG),  $V_{S30} = 1168$  m/s

Mesure passive des ondes de surface



d'après Gouffon et al. (2024), Swisstopo

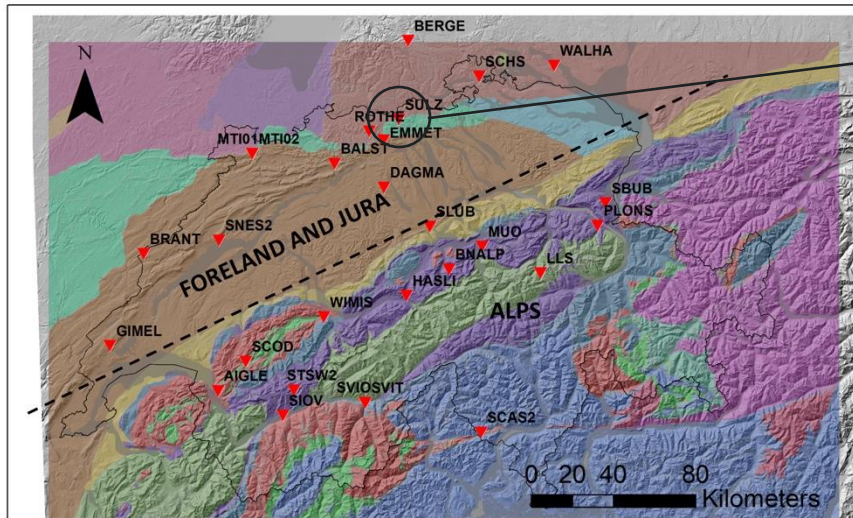




## 2/3) ÉTUDE

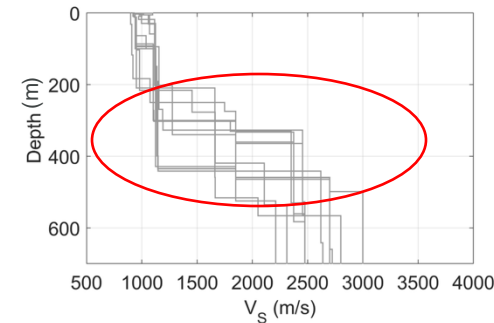
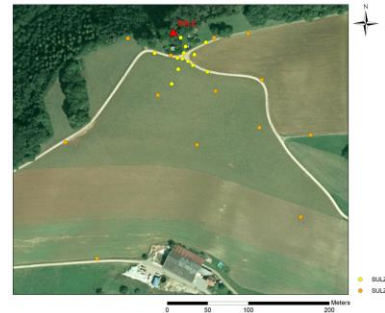
### DÉSAMPLIFICATION POUR LES FONDATIONS AVEC $V_{S30} > 1105$ M/S

Objectif 2: *déterminer la désamplification admissible pour les sites avec  $V_{S30} > 1105$  m/s*

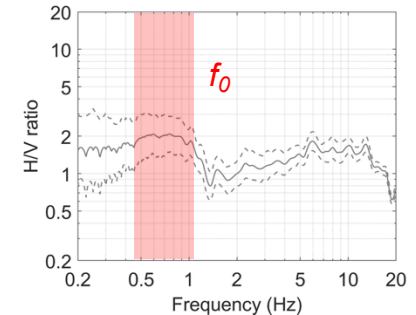


Station **SULZ** (Sulz, AG),  $V_{S30} = 1168$  m/s

Mesure passive des ondes de surface

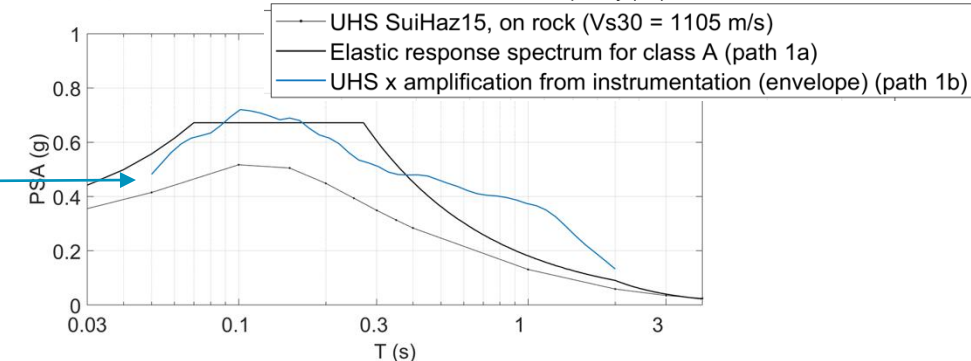
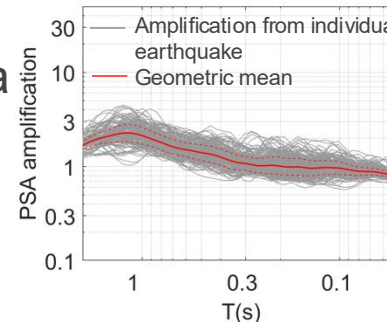


Rapport spectral H/V



d'après  
Stamm et al.  
(2008)

Fonction d'amplification de la station à partir des enregistrements sismiques





## 2/3) ÉTUDE

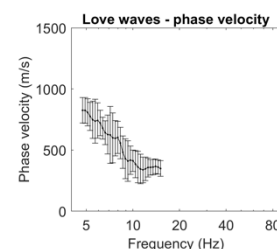
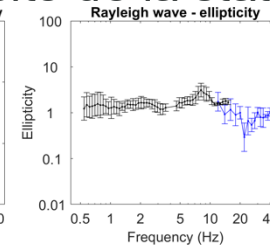
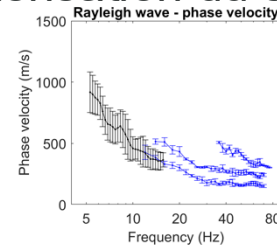
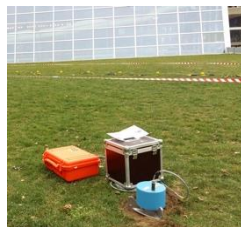
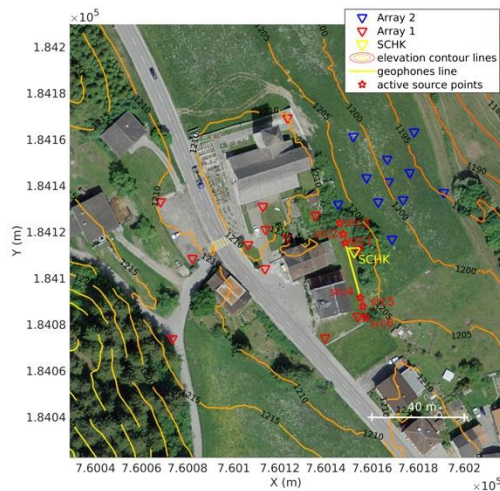
### DÉSAMPLIFICATION POUR LES FONDATIONS AVEC VS30 > 1105 M/S

Objectif 3 : *recommandations pour une application fiable de la désamplification*

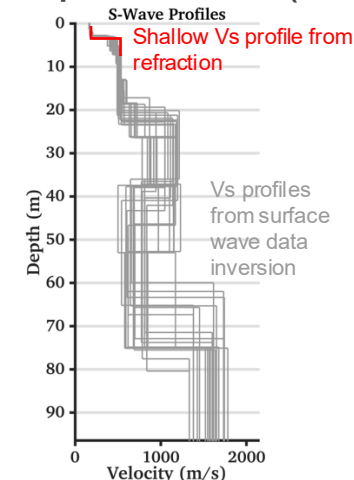
Recommandations pour les mesures géophysiques non invasives

- Mesures conjointes des ondes de surface actives et passives
- Utilisation de géophones à 3 composants -> courbes de dispersion des ondes de Rayleigh et de Love, ellipticité de Rayleigh
- Mesures conjointes ondes de surface et réfraction d'ondes P/S -> déterminer les contrastes d'impédance peu profonds

Exemple : caractérisation du site de la station sismique SCHK (Churwalden, GR)



— Courbes à partir de la mesure passive  
— Courbes à partir de la mesure active



Logiciels de traitement disponibles :  
- Geopsy (open source)  
- Rayfract...



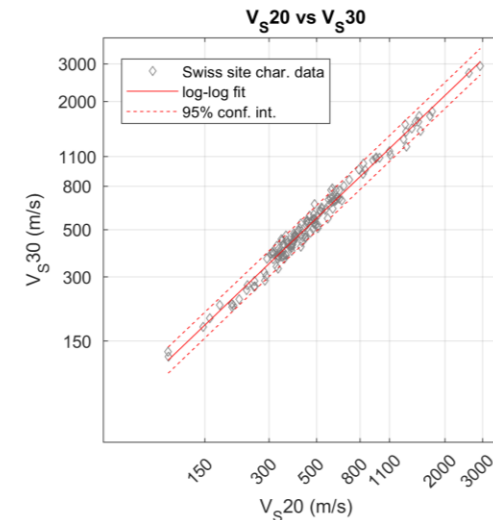
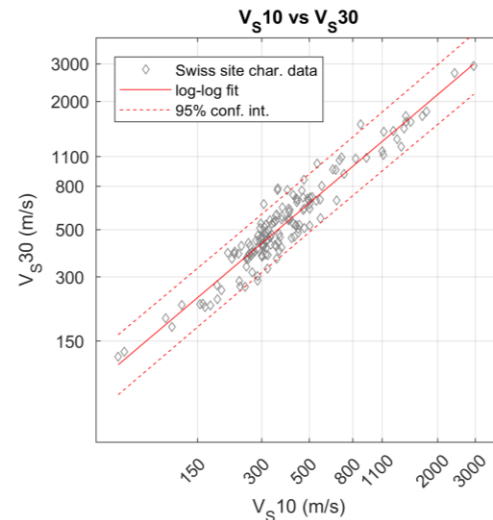
## 2/3) ÉTUDE

### DÉSAMPLIFICATION POUR LES FONDATIONS AVEC $V_{S30} > 1105$ M/S

Objectif 3 : *recommandations pour une application fiable de la désamplification*

Recommandations pour les mesures géophysiques non invasives

- Il est nécessaire d'atteindre une profondeur d'investigation adéquate pour contraindre l'estimation de  $V_{S30}$



*Données de 120 stations sismiques caractérisées en Suisse (SED site characterization database, 2015)*

Prédiction de  $V_{S30}$  basée sur  $V_{S10}$  (à gauche) et sur  $V_{S20}$  (à droite)





## 2/3) ÉTUDE

### DÉSAMPLIFICATION POUR LES FONDATIONS AVEC VS30 > 1105 M/S

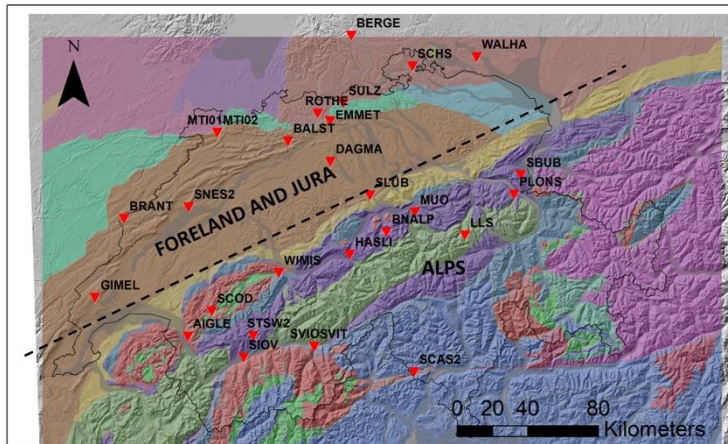
Objectif 3 : *recommandations pour une application fiable de la désamplification*

Recommandations pour les mesures géophysiques non invasives

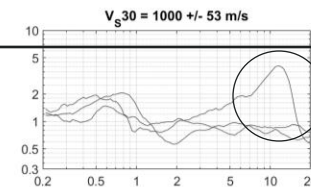
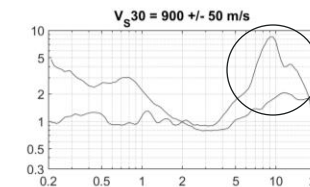
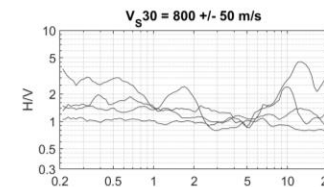
- Rapport spectral H/V des vibrations ambiantes pour détecter les contrastes d'impédance, aussi en profondeur

H/V mesuré aux stations suisses avec Vs30 > 750 m/s

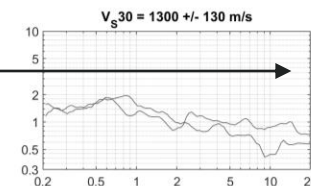
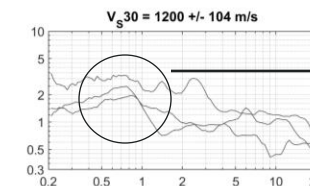
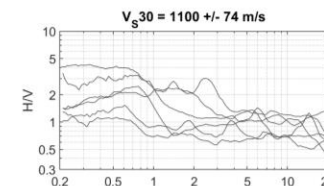
Mesure H/V à la station STSW2(Tseuzier, VS)



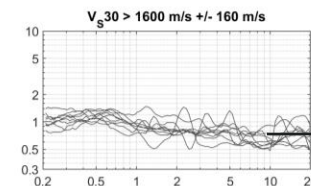
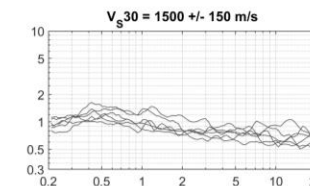
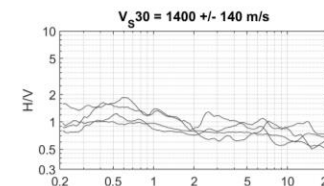
Capteur 3-C Lennartz 5 s  
Durée de l'acquisition: > 30 mins



Contrastes d'impédance peu profonds (roche dégradée sur roche compacte)



Contrastes d'impédance en profondeur



H/V « plat » -> pas de résonance



## 3/3) CONCLUSIONS

---

### ■ Introduction – Amplification sismique du site

Qu'est-ce  
que c'est?

- Le terme « amplification du site » ou « réponse du site » désigne l'effet des couches superficielles du sous-sol sur les ondes sismiques se propageant à partir de la croûte terrestre
- Principalement liée au profil de vitesse des ondes de cisaillement du sous-sol
- Elle amplifie généralement les amplitudes des ondes sismiques se propageant dans la croûte

Pourquoi est-  
elle  
importante ?

- La réponse du site modifie de manière significative (= d'un facteur 10) les amplitudes des ondes sismique d'une façon complexe (dépendant de la fréquence)

Comment la  
mesurer ?

- Mesures géophysiques du profil de vitesse local des ondes de cisaillement ( $V_s$ ) + simulation de la propagation des ondes
- Mesure directe de la réponse sismique à partir de la sismicité régionale : rapport spectral site/référence, modélisation spectrale empirique





## 3/3) CONCLUSIONS

---

- L'étude « Potentiel de désamplification par rapport au spectre de réponse élastique pour les fondations des barrages avec  $V_{s30} > 1105$  m/s »

Données  
d'entrée

- Fonctions d'amplification empiriques à partir de stations suisses et japonaises,  $V_{s30} > 750$  m/s
- Fonctions d'amplification empiriques à partir d'enregistrements sismiques

Principaux  
résultats

- L'amplification du site diminue à mesure que  $V_{s30}$  augmente. À  $V_{s30} > 1105$  m/s : désamplification (par rapport au rocher de référence suisse)
- Facteurs de correction Danciu&Fäh (2017): option appropriée pour la modélisation de la désamplification, sauf aux hautes périodes ( $T > 1$ s)
- $V_{s30}$  n'est qu'un proxy : les contrastes d'impédance en profondeur peuvent déterminer l'amplification aux hautes périodes

Recommandations  
pour les levés  
géophysiques

- Les techniques non invasives peuvent être efficaces, à condition d'appliquer conjointement plusieurs mesures (ondes de surface + réfraction + H/V)



---

Merci de votre attention  
[paolo.bergamo@sed.ethz.ch](mailto:paolo.bergamo@sed.ethz.ch)