

# Caractérisation de l'évolution d'un massif rocheux très fracturé par différentes méthodes sismiques

ADRGT: O. Le Roux, O. Meric, H. Cadet, L. Lorier

LGIT: E. Larose, D. Jongmans

IPGP: F. Brenguier



Journée de restitution du programme de recherche 2009  
financé par le Conseil général de l'Isère



Pôle Grenoblois d'étude et de recherche  
pour la prévention des Risques Naturels

1 décembre 2010



## **Introduction**

- a. Présentation du site d'étude
- b. Problématique et objectif

1. Données climatiques et de déformation

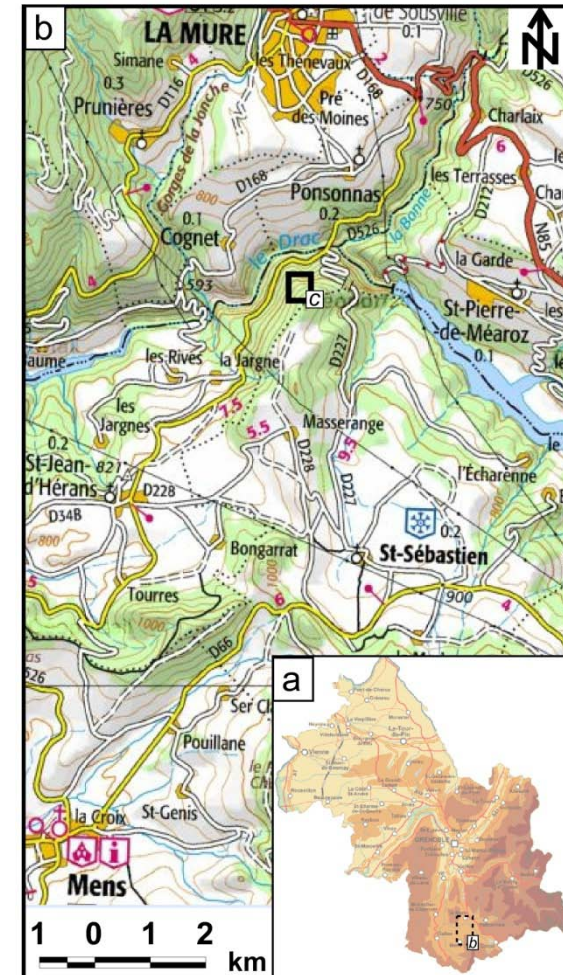
2. Sismique active

3. Sismique semi-active

Conclusions - Perspectives

## a. Présentation du site d'étude

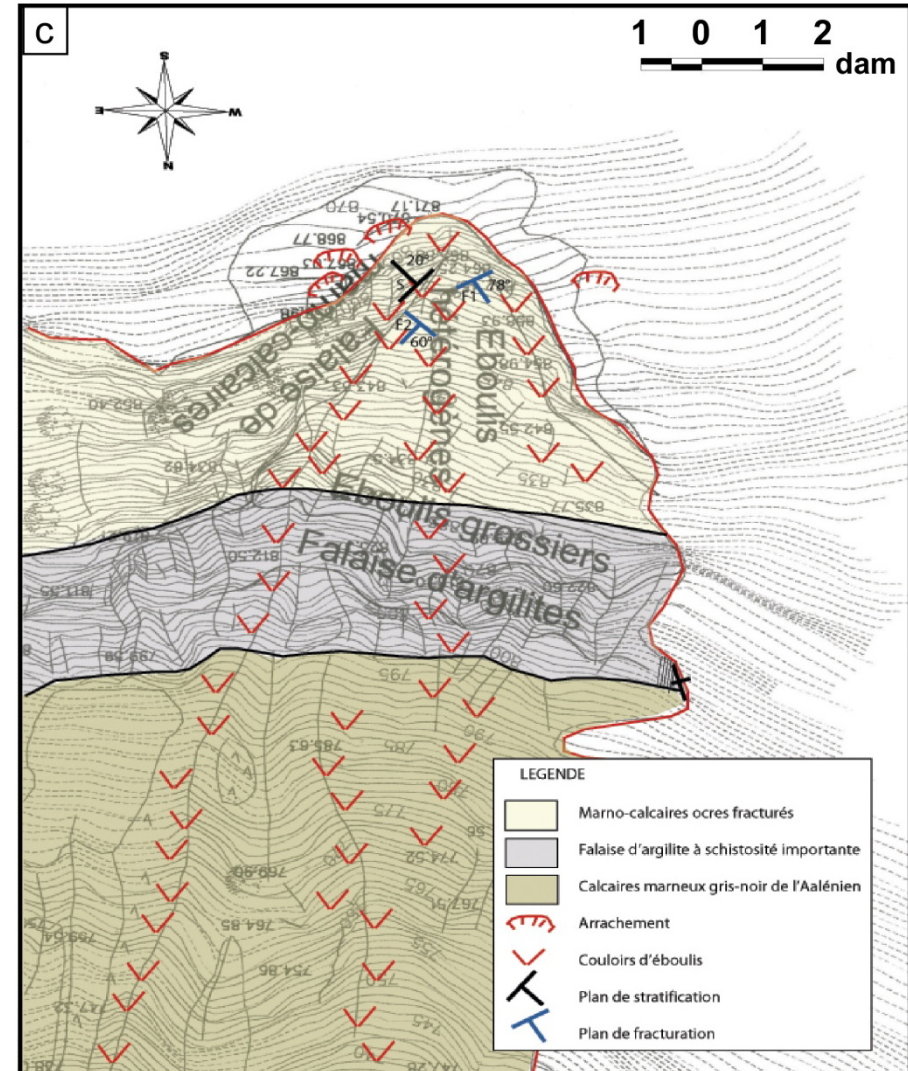
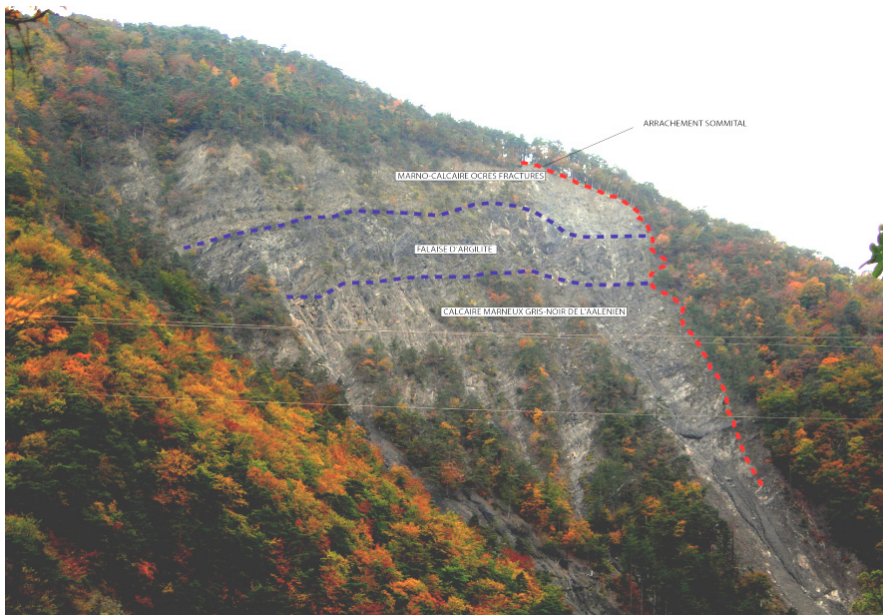
- ✓ Site des Echarenes (Sud Isère, Trièves)





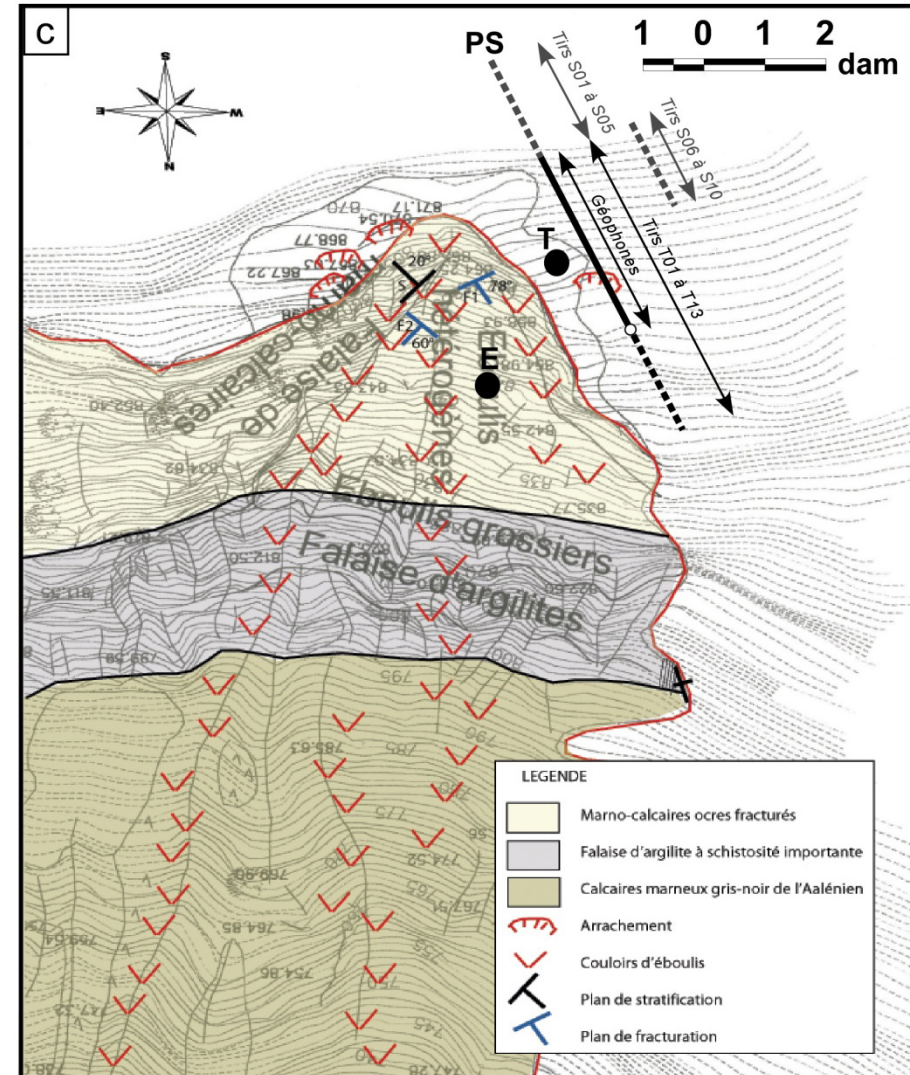
## a. Présentation du site d'étude

- ✓ Site des Echarences (Sud Isère, Trièves)
- ✓ Massif constitué de calcaires marneux et schistes fracturés
- ✓ Pente de 45° vers le Nord
- ✓ Eboulement de plusieurs centaines de m<sup>3</sup> le 20 janvier 2004



## b. Problématique et objectif

- ✓ Risque résiduel d'éboulement important
- ✓ Apprécier l'évolution des caractéristiques mécaniques par méthodes sismiques (à travers la variation temporelle des vitesses sismiques du massif rocheux)
  - Données climatiques (température, T et pluviométrie) et de déformation (extensomètre, E)
  - Sismique active (PS)
  - Sismique semi-active (PS)



## Introduction

### **1. Données climatiques et de déformation**

- a. Données climatiques
- b. Données de déformation

### 2. Sismique active

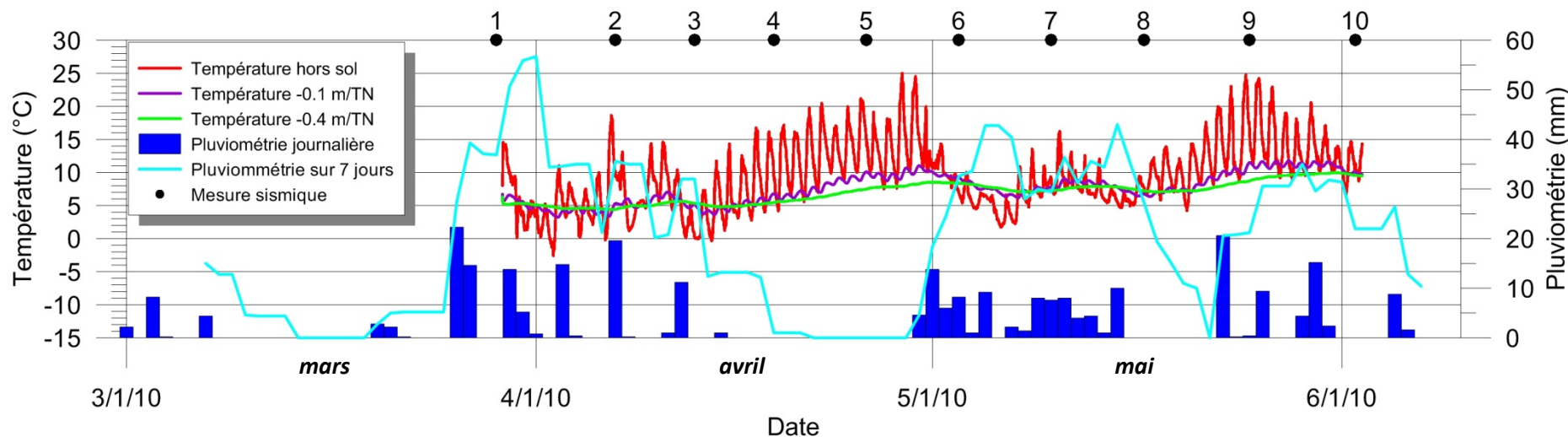
### 3. Sismique semi-active

### Conclusions - Perspectives



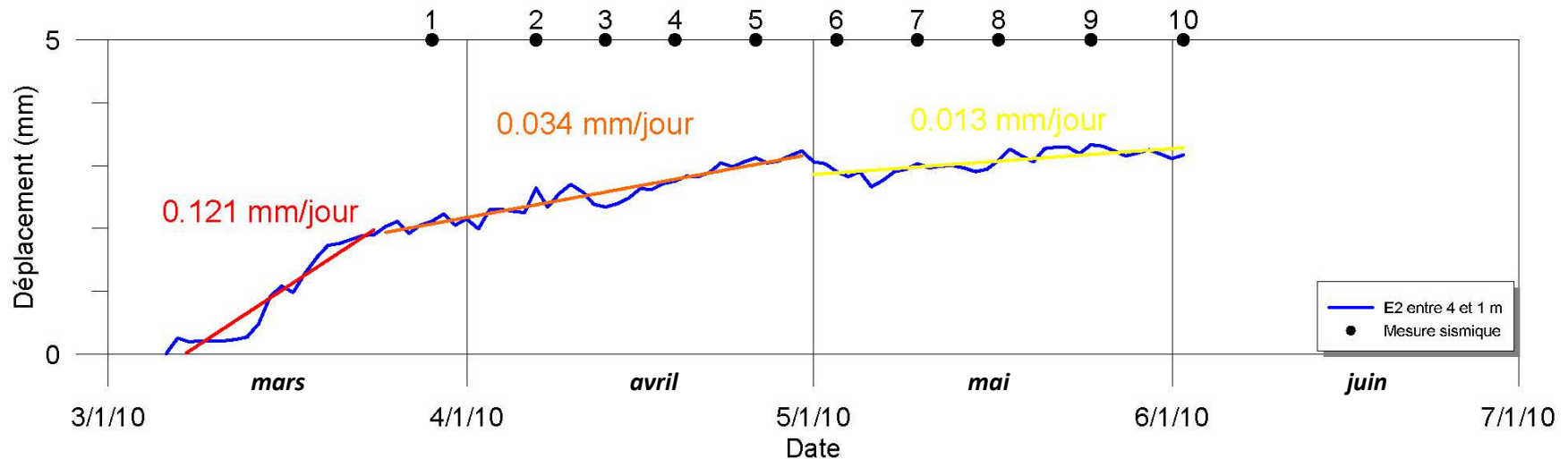
## a. Données climatiques

- ✓ 3 capteurs de températures sur site
- ✓ Pluviométrie journalière à La Mure
- ✓ Quatre périodes :
  - acquisitions 1 à 3 : période froide (avec gel) et pluvieuse (pluviométrie discontinue)
  - acquisitions 4 et 5 : période douce et sèche
  - acquisitions 6 à 8 : période froide (sans gel) et pluvieuse (pluviométrie continue)
  - acquisitions 9 et 10 : période douce et pluvieuse (pluviométrie discontinue)



## b. Données de déformation

- ✓ Capteur extensométrique sur site: déplacement relatif du massif entre 4 et 1 m de profondeur
- ✓ Déformation du massif très faible
- ✓ Trois phases de déformation :
  - du 6 au 24 mars 2010 : vitesse de déplacement de 0.12 mm/jour
  - du 25 mars au 30 avril 2010 : vitesse de déplacement de 0.03 mm/jour (acquisition 1 à 5)
  - du 01 mai au 02 juin 2010 : vitesse de déplacement quasi-nulle (acquisition 6 à 10)





## Introduction

### 1. Données climatiques et de déformation

### **2. Sismique active**

- a. Tomographie sismique de référence
- b. Variation relative de vitesses
- c. Discussion des résultats

### 3. Sismique semi-active

### Conclusions - Perspectives

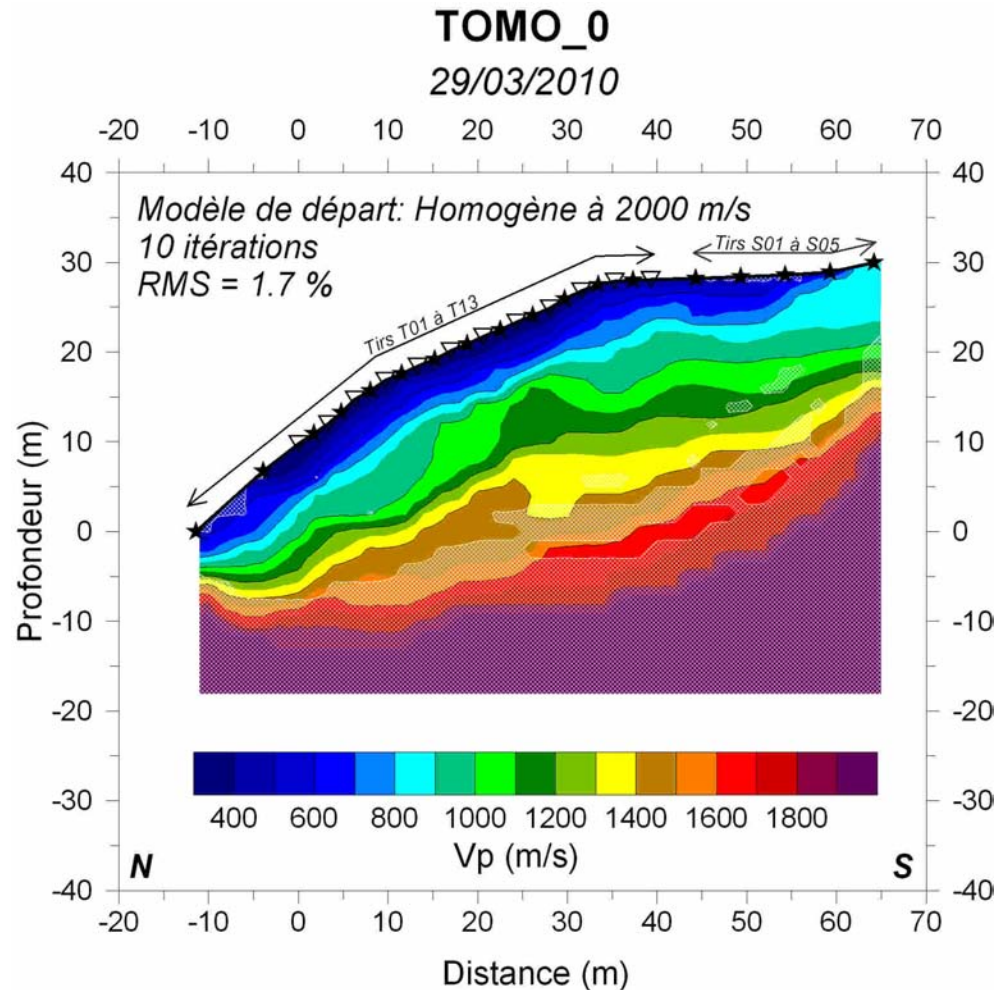
## a. Tomographie sismique de référence

✓ Vitesses très faible ( $V_p = 300 - 800$  m/s) sur 5 mètres d'épaisseur dans la partie aval du profil

- zone très altérée et très décomprimée du substratum rocheux
- cette couche s'approfondit légèrement dans la partie amont pour atteindre 6 - 7 m

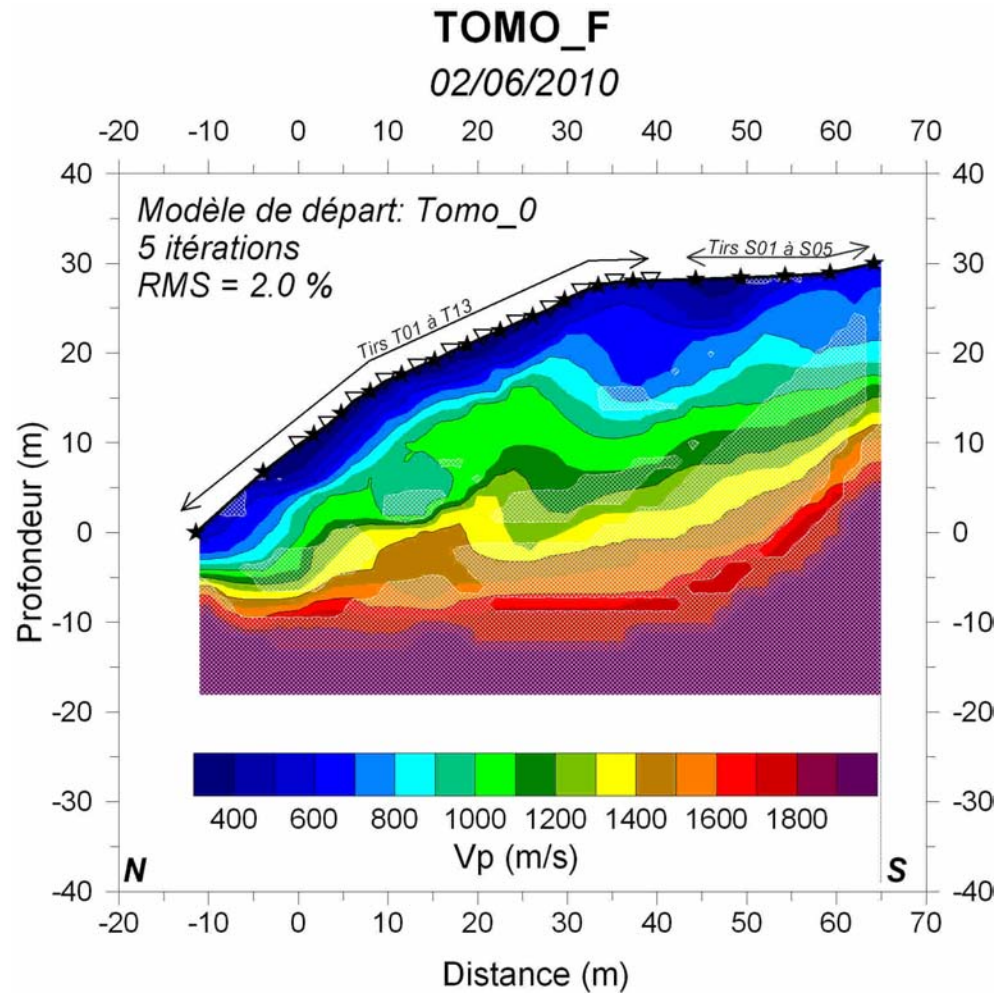
✓ Vitesses augmentent de manière progressive en profondeur ( $V_p = 1500$  m/s vers 25 à 30 m de profondeur)

- vitesses sur les 25 premiers mètres de profondeur restent faibles ( $V_p < 1800$  m/s) indiquant un massif rocheux très déstructuré et/ou fracturé sur une grande épaisseur



## b. Variation relative de vitesses

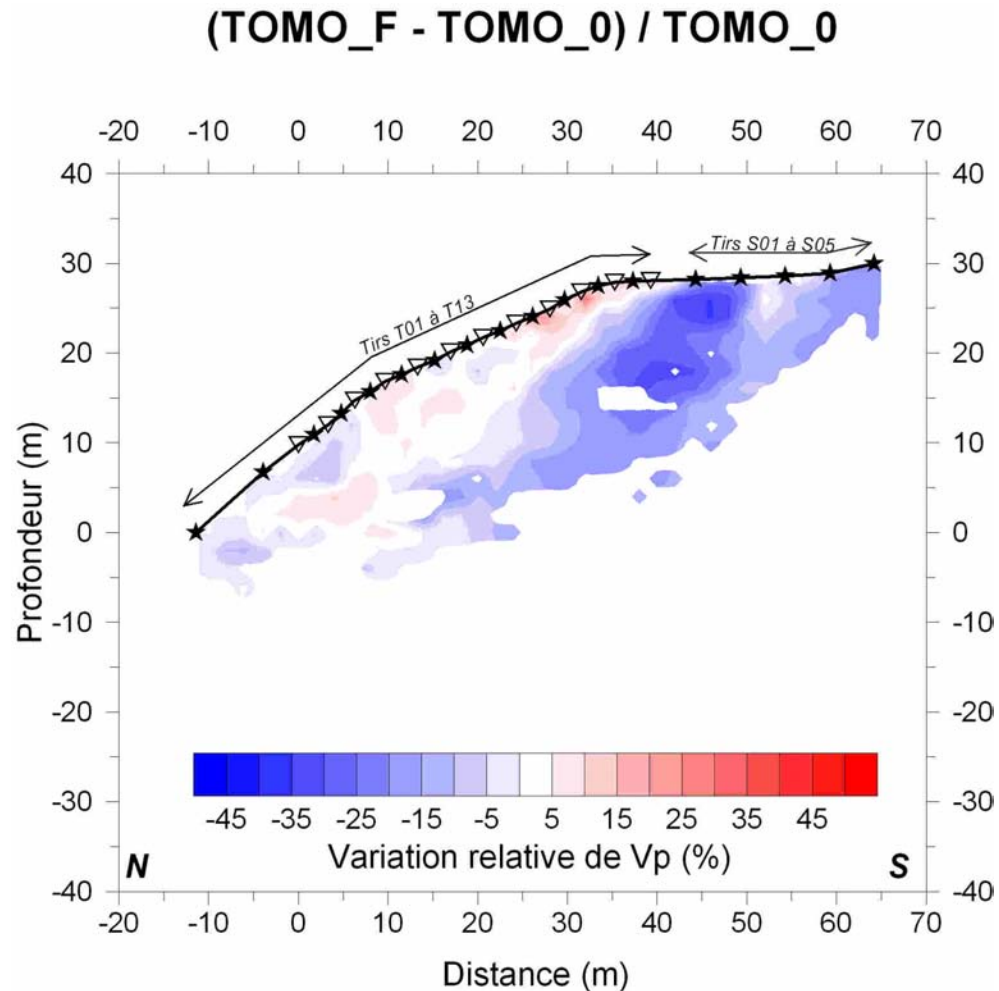
✓ Même ordre de grandeur de vitesse mais approfondissement de la couche de très faibles vitesses dans la zone amont jusqu'à 10 m d'épaisseur





## b. Variation relative de vitesses

- ✓ Même ordre de grandeur de vitesse mais approfondissement de la couche de très faibles vitesses dans la zone amont jusqu'à 10 m d'épaisseur
- ✓ Diminution relative des vitesses sismiques significative (- 30 %) dans la zone amont sur une dizaine de mètres d'épaisseur

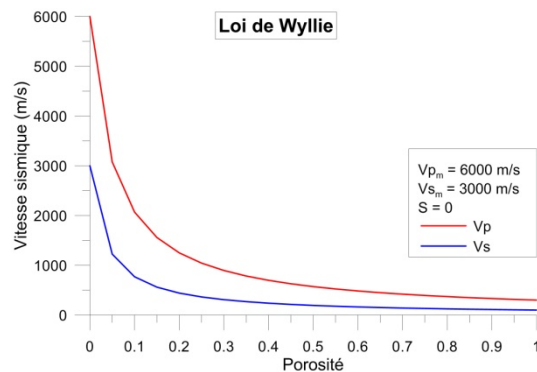


## b. Variation relative de vitesses

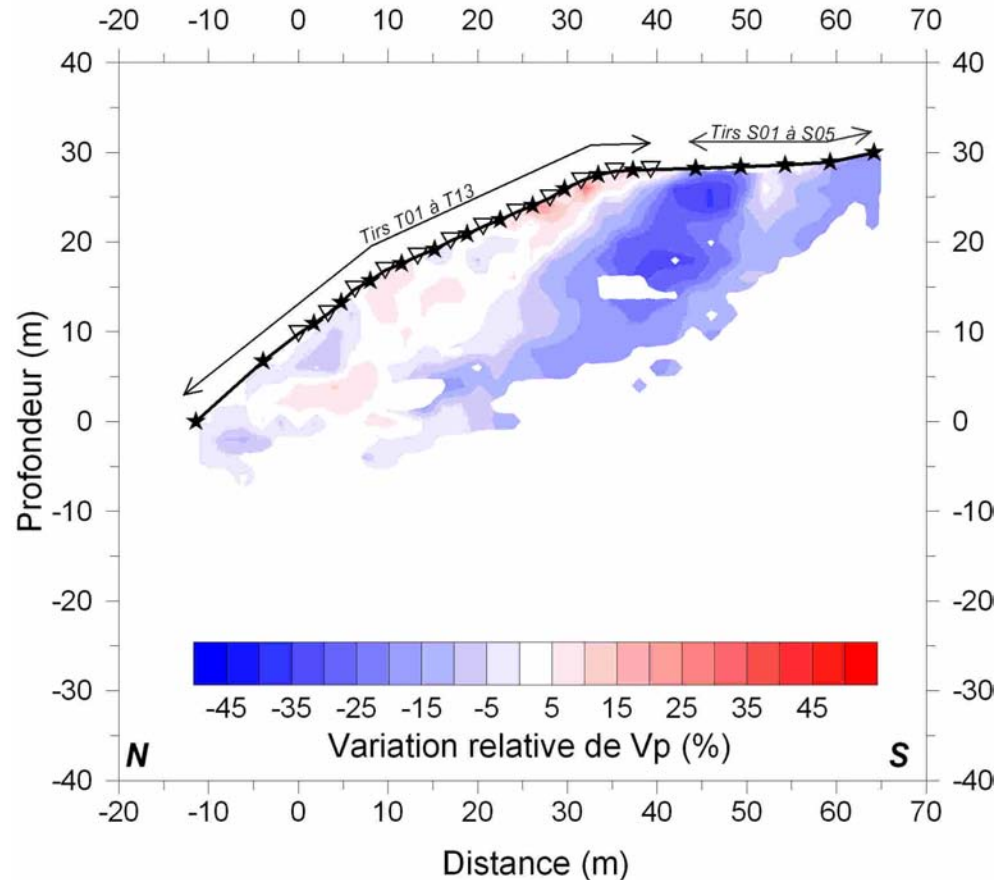
✓ Même ordre de grandeur de vitesse mais approfondissement de la couche de très faibles vitesses dans la zone amont jusqu'à 10 m d'épaisseur

✓ Diminution relative des vitesses sismiques significative (- 30 %) dans la zone amont sur une dizaine de mètres d'épaisseur

- diminution des caractéristiques mécaniques du massif rocheux
- ⇒ déformation gravitaire du versant ?

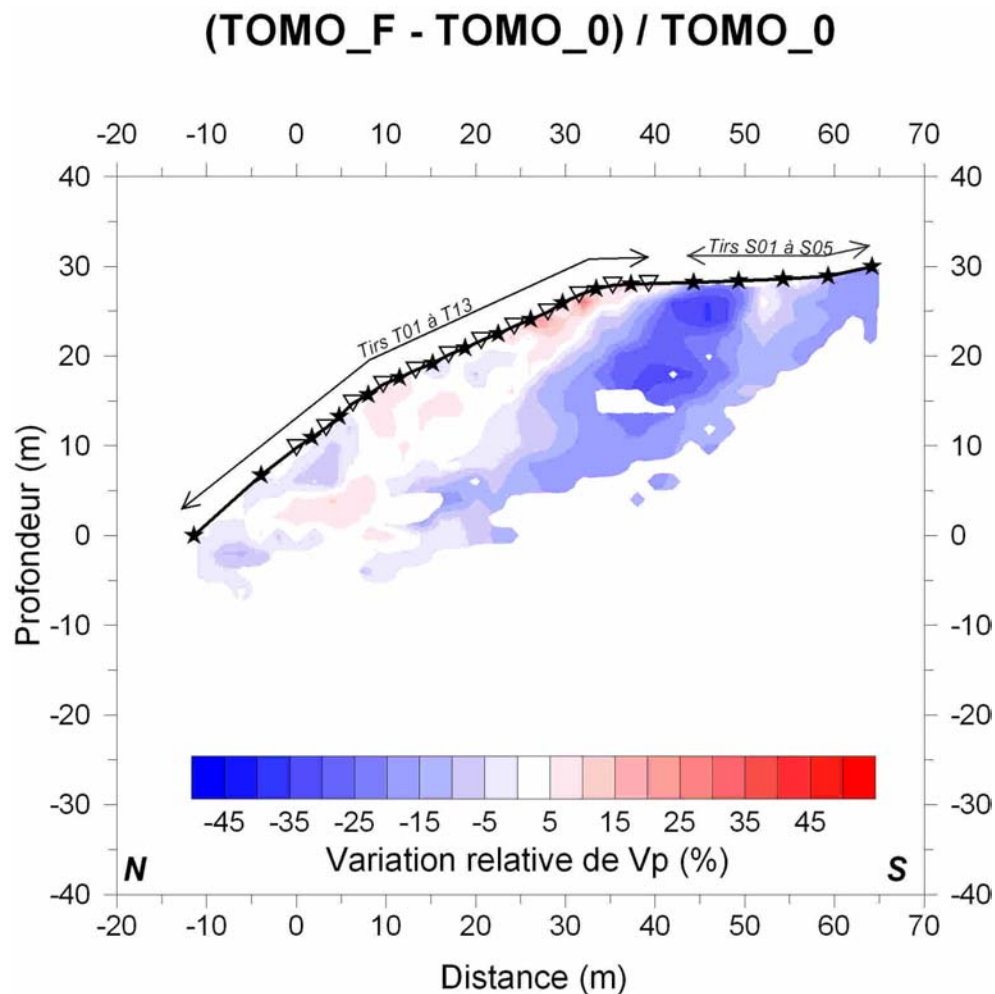


(TOMO\_F - TOMO\_0) / TOMO\_0



## b. Variation relative de vitesses

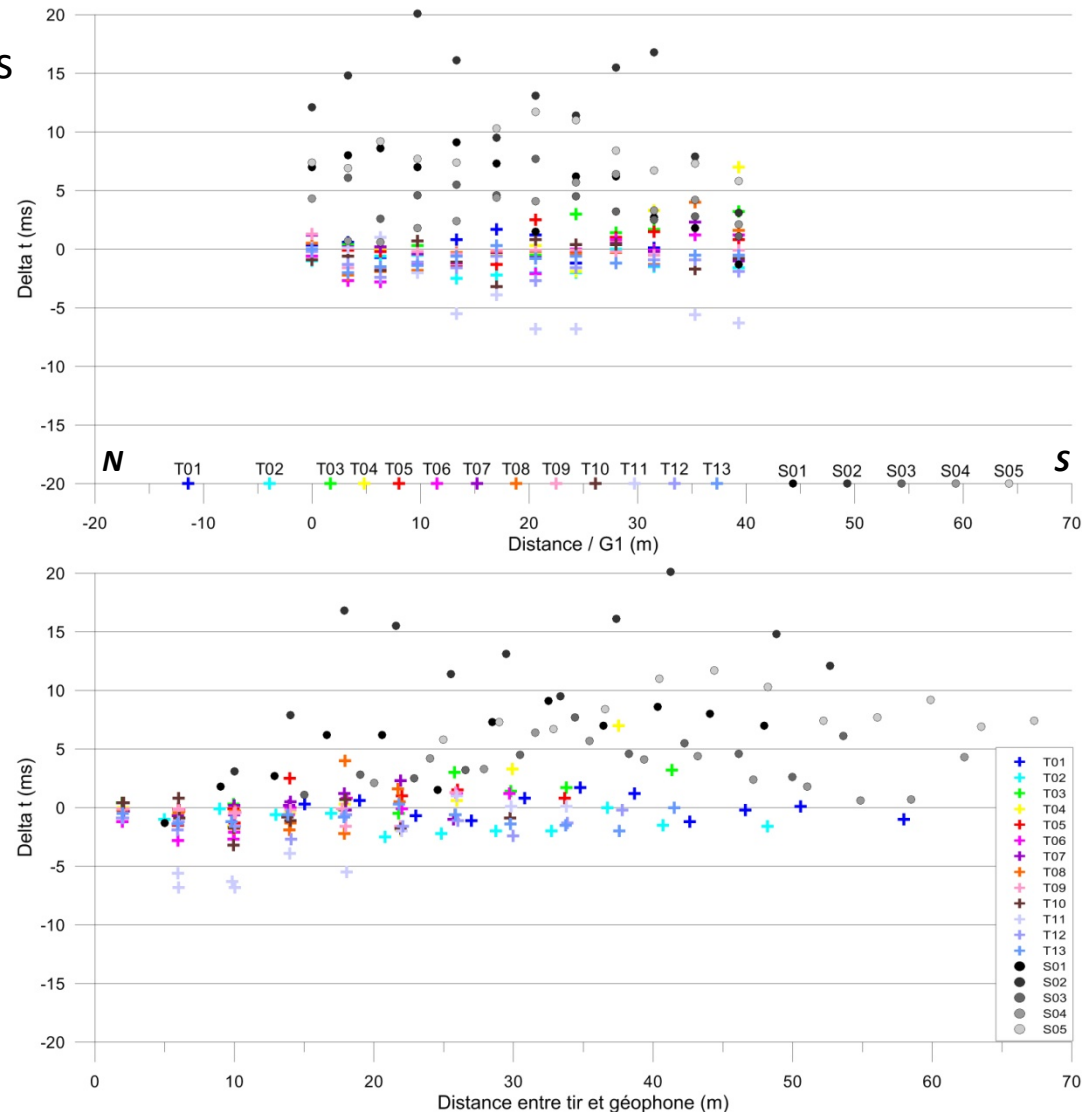
- ✓ Même ordre de grandeur de vitesse mais approfondissement de la couche de très faibles vitesses dans la zone amont jusqu'à 10 m d'épaisseur
- ✓ Diminution relative des vitesses sismiques significative (- 30 %) dans la zone amont sur une dizaine de mètres d'épaisseur
  - diminution des caractéristiques mécaniques du massif rocheux  
⇒ déformation gravitaire du versant ?
- ✓ Légère augmentation de vitesse (0 à 5 %) en surface dans la zone aval





### c. Discussion sur les résultats

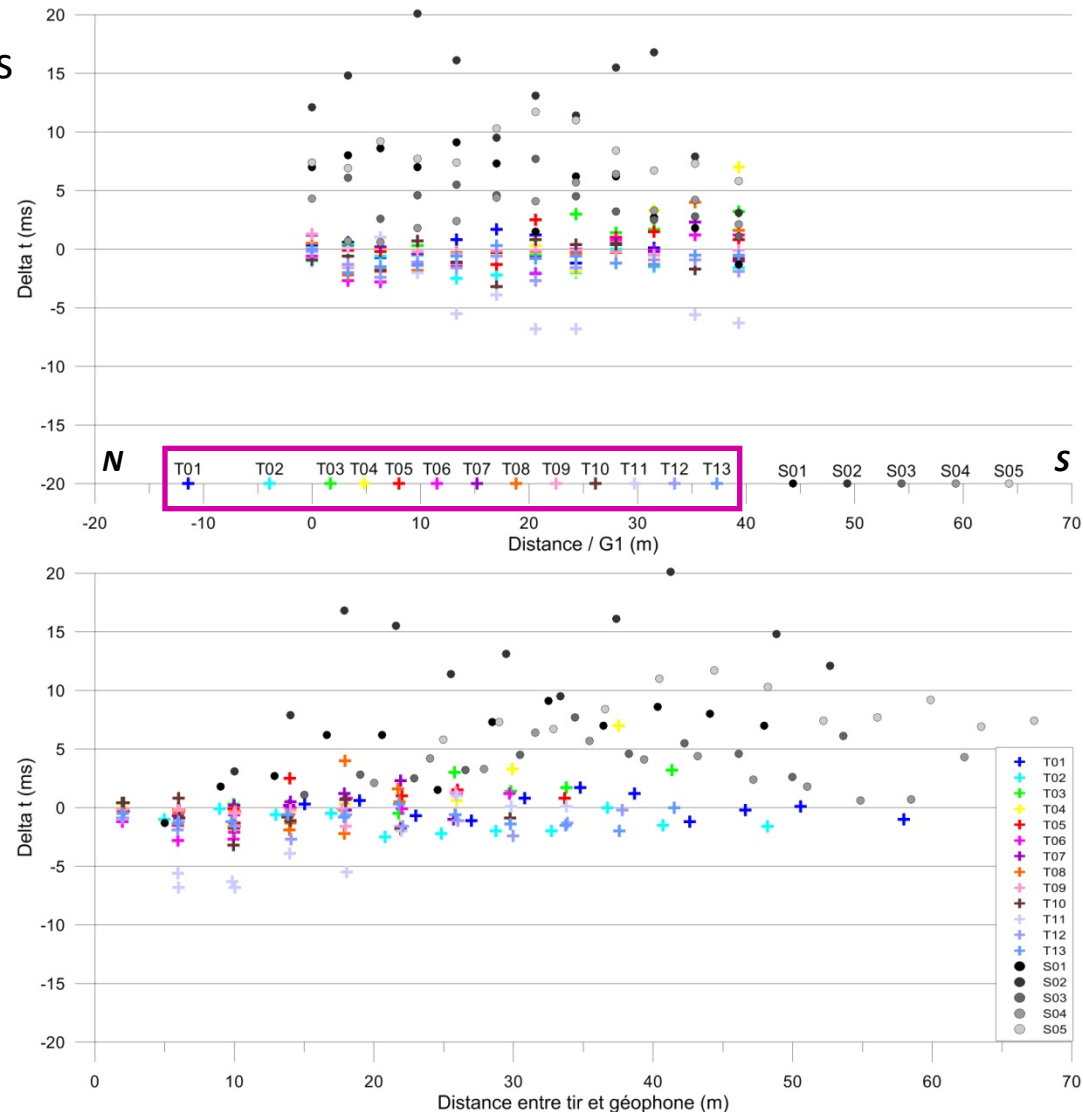
✓ Différence absolue des temps d'arrivées entre les acquisitions 10 et 1



### c. Discussion sur les résultats

✓ Différence absolue des temps d'arrivées entre les acquisitions 10 et 1

➤ Tirs T01 à T13

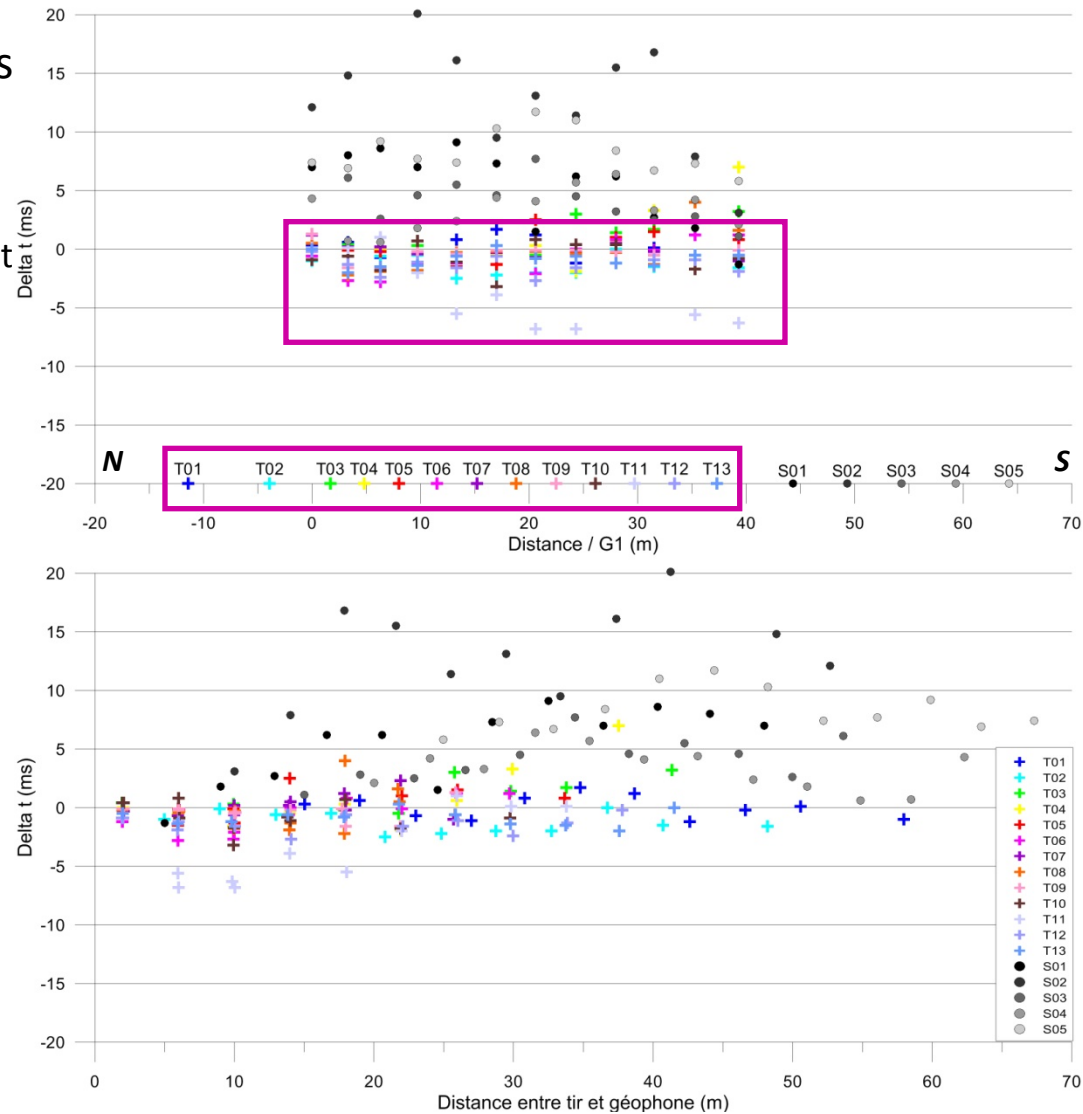


### c. Discussion sur les résultats

✓ Différence absolue des temps d'arrivées entre les acquisitions 10 et 1

➤ Tirs T01 à T13

- différences faibles et globalement négatives



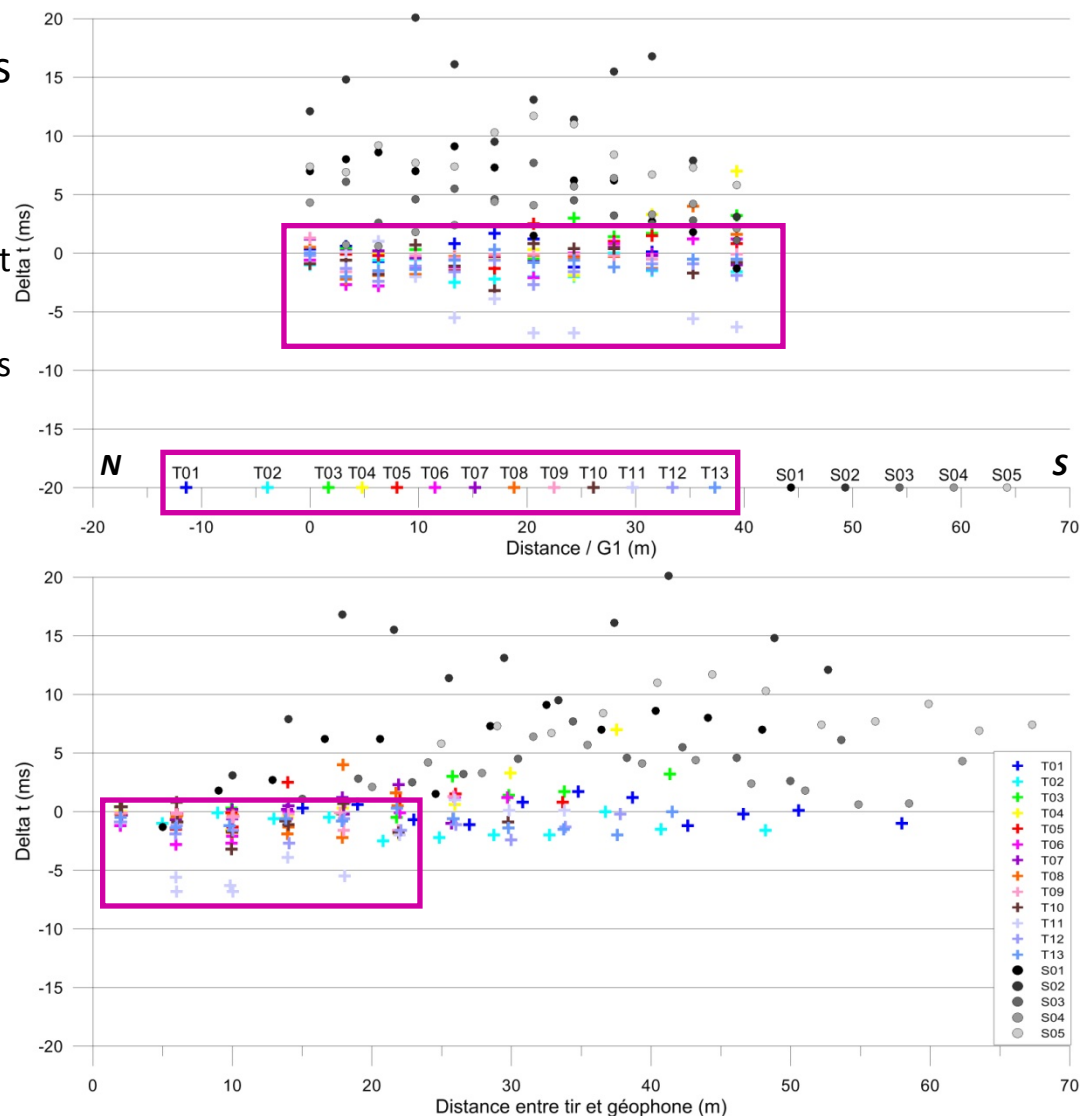


### c. Discussion sur les résultats

✓ Différence absolue des temps d'arrivées entre les acquisitions 10 et 1

➤ Tirs T01 à T13

- différences faibles et globalement négatives
- essentiellement pour des faibles distances tirs – géophones



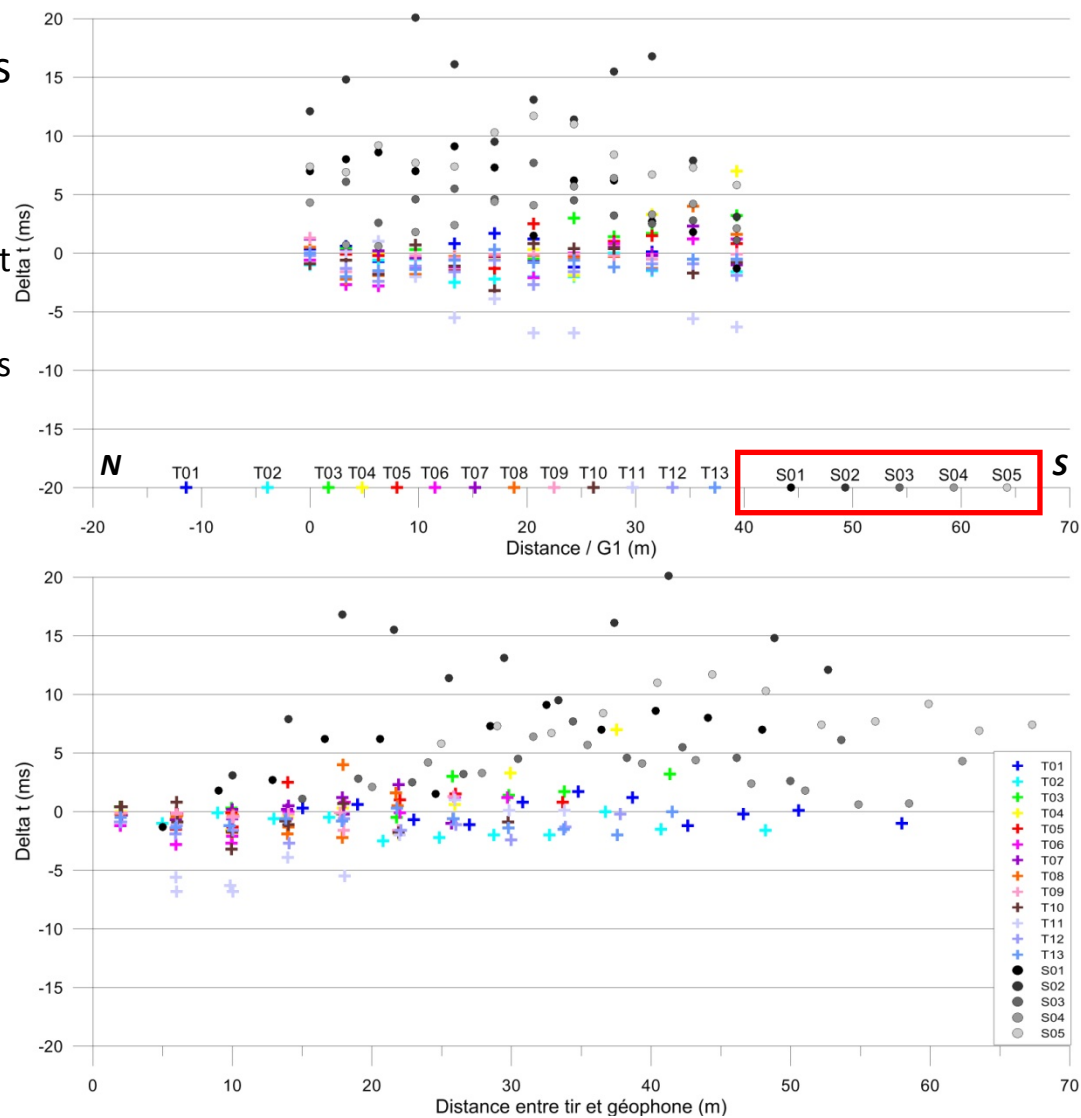
### c. Discussion sur les résultats

✓ Différence absolue des temps d'arrivées entre les acquisitions 10 et 1

➤ Tirs T01 à T13

- différences faibles et globalement négatives
- essentiellement pour des faibles distances tirs – géophones

➤ Tirs S01 à S05



### c. Discussion sur les résultats

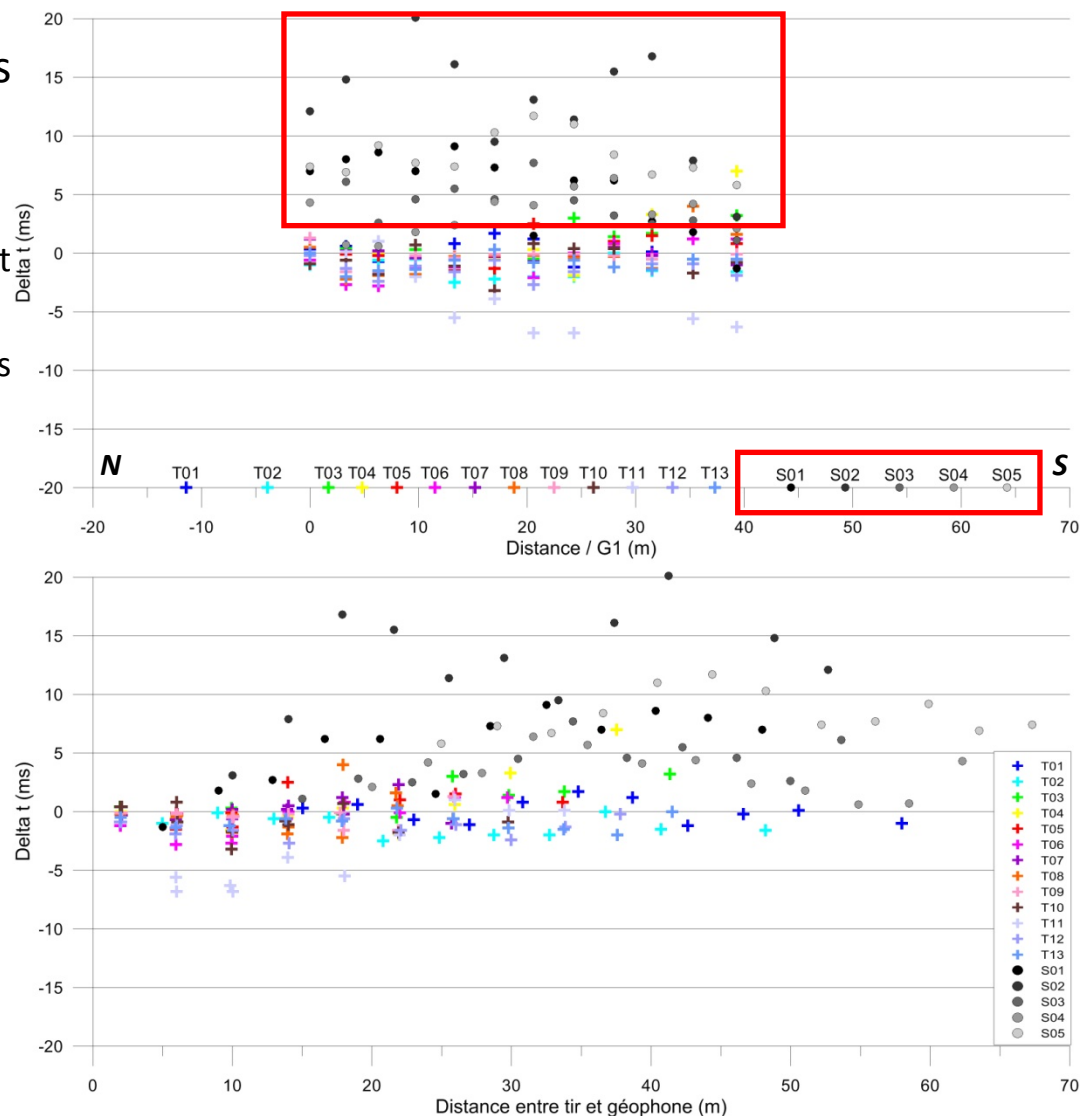
✓ Différence absolue des temps d'arrivées entre les acquisitions 10 et 1

➤ Tirs T01 à T13

- différences faibles et globalement négatives
- essentiellement pour des faibles distances tirs – géophones

➤ Tirs S01 à S05

- différence positives importantes



### c. Discussion sur les résultats

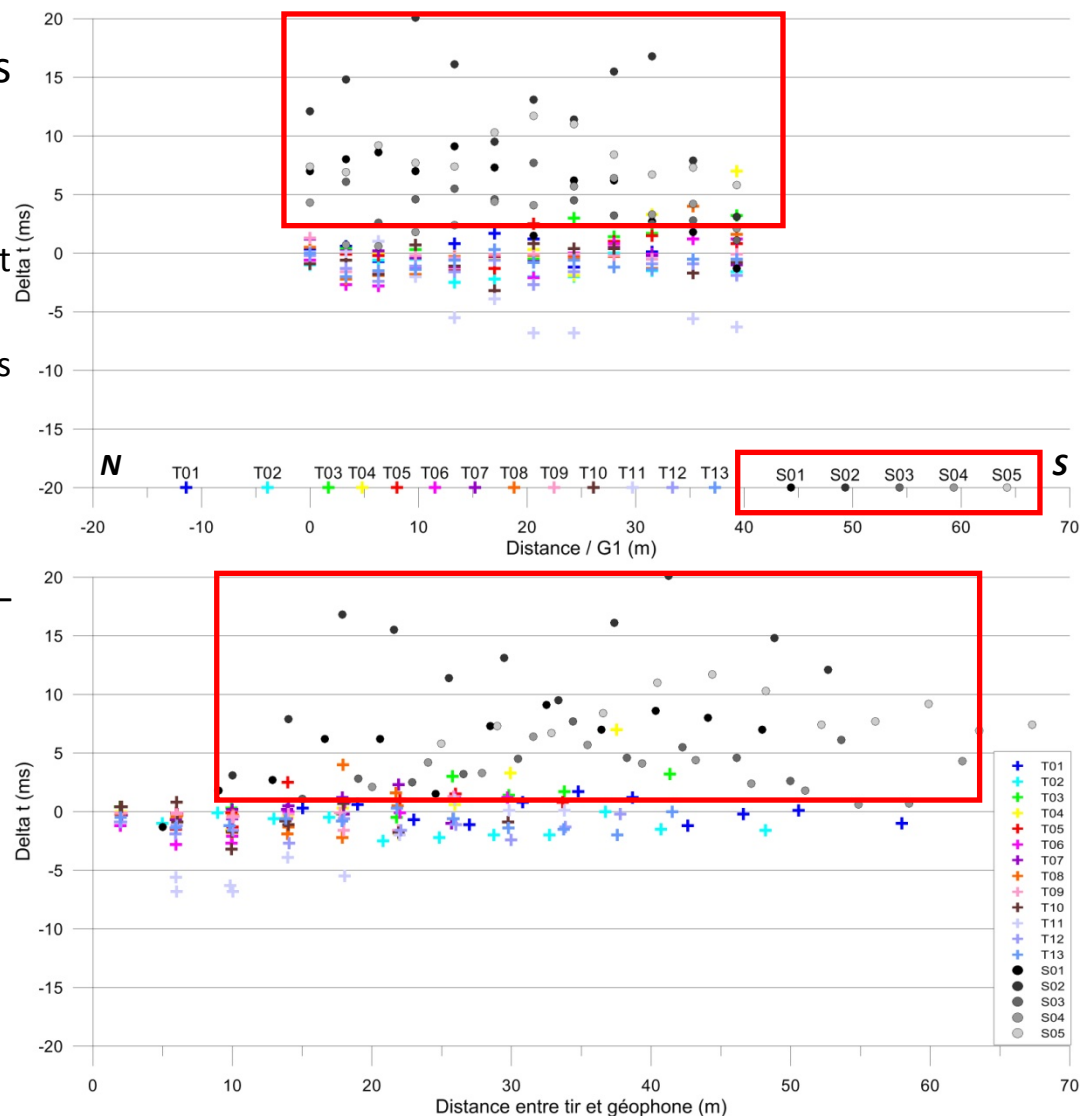
✓ Différence absolue des temps d'arrivées entre les acquisitions 10 et 1

➤ Tirs T01 à T13

- différences faibles et globalement négatives
- essentiellement pour des faibles distances tirs – géophones

➤ Tirs S01 à S05

- différence positives importantes
- des faibles aux grandes distances tirs – géophones





### c. Discussion sur les résultats

✓ Différence absolue des temps d'arrivées entre les acquisitions 10 et 1

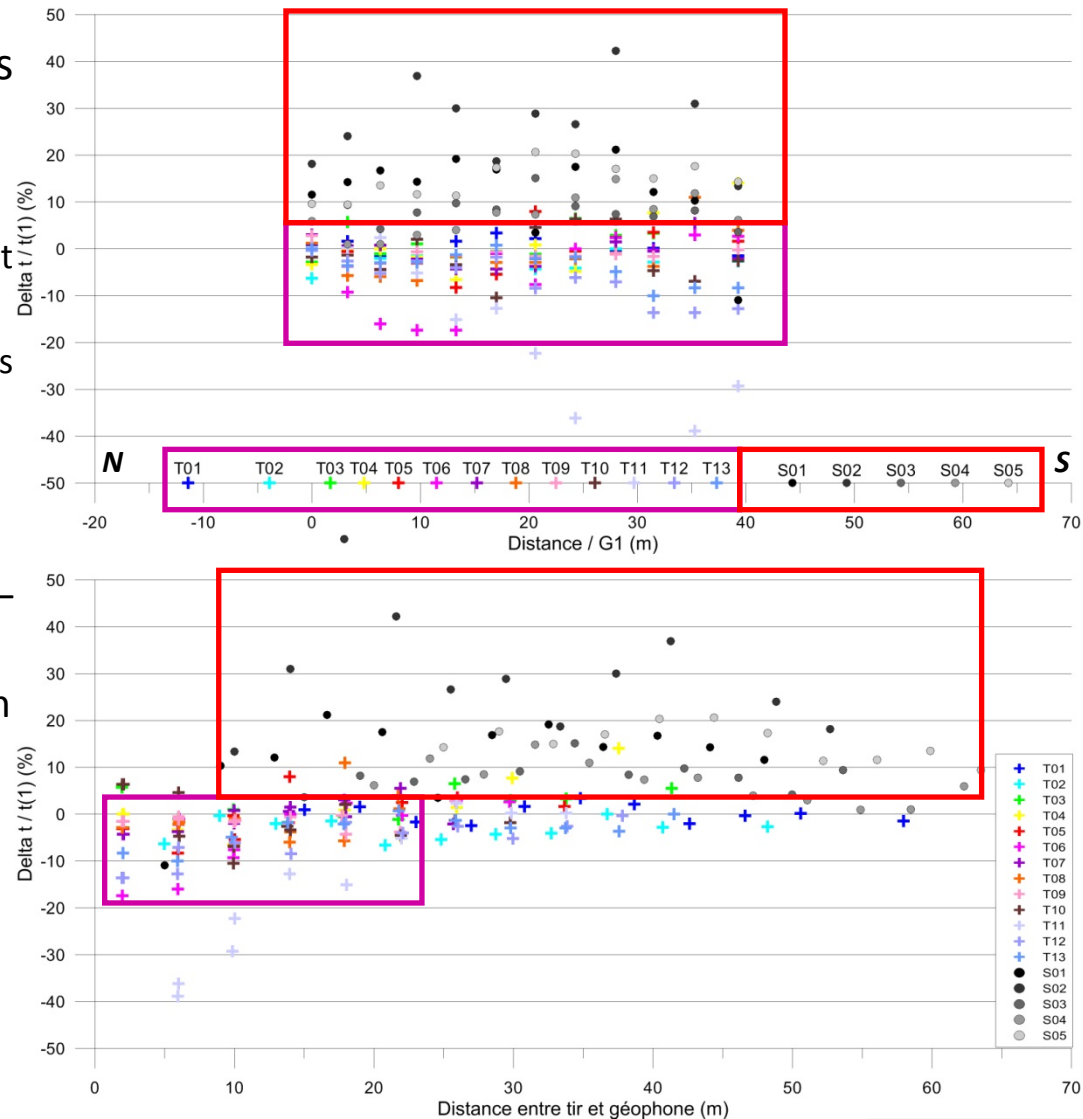
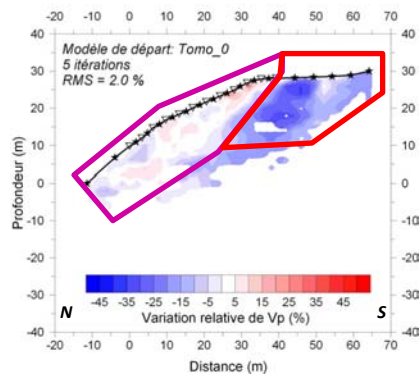
➤ Tirs T01 à T13

- différences faibles et globalement négatives
- essentiellement pour des faibles distances tirs – géophones

➤ Tirs S01 à S05

- différence positives importantes
- des faibles aux grandes distances tirs – géophones

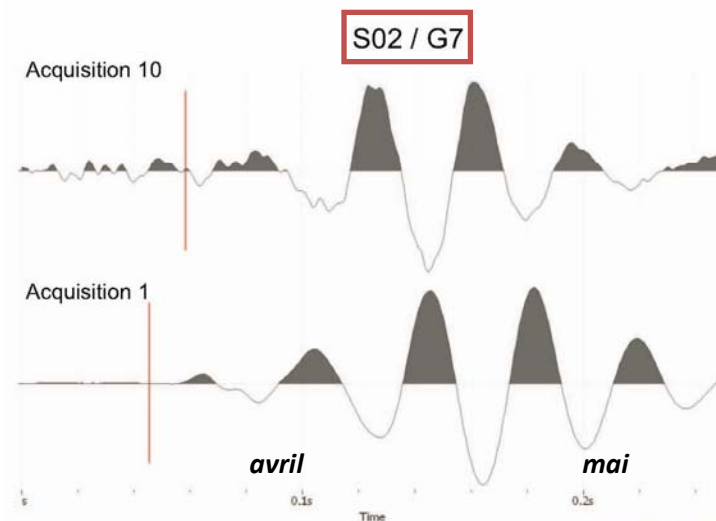
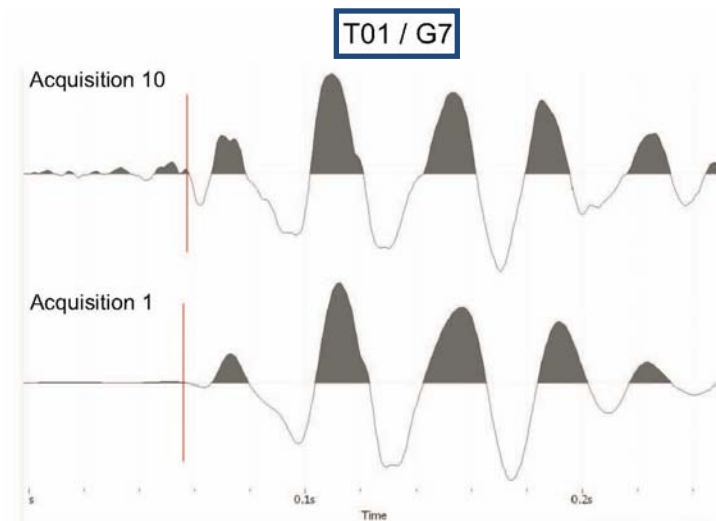
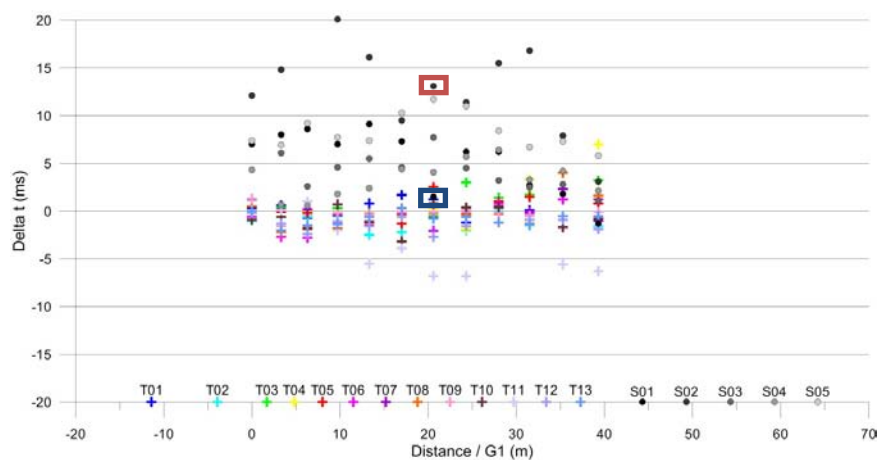
⇒ Explique bien les résultats de l'inversion



### c. Discussion des résultats

✓ Visualisation de l'incertitude sur les pointés et réalité de l'augmentation des temps pour les tirs S01 à S05

➤ Acquisition 10 bruitée (vent)

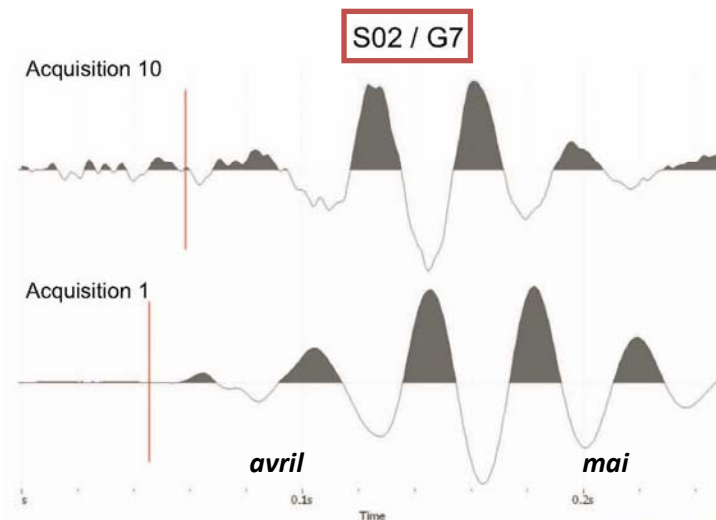
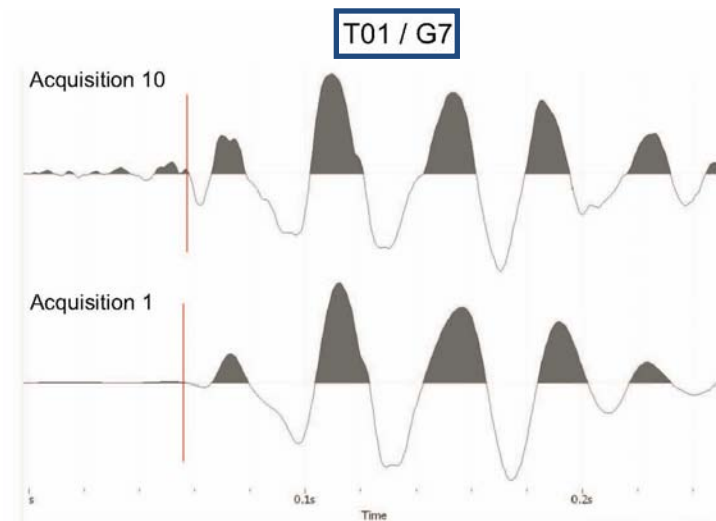
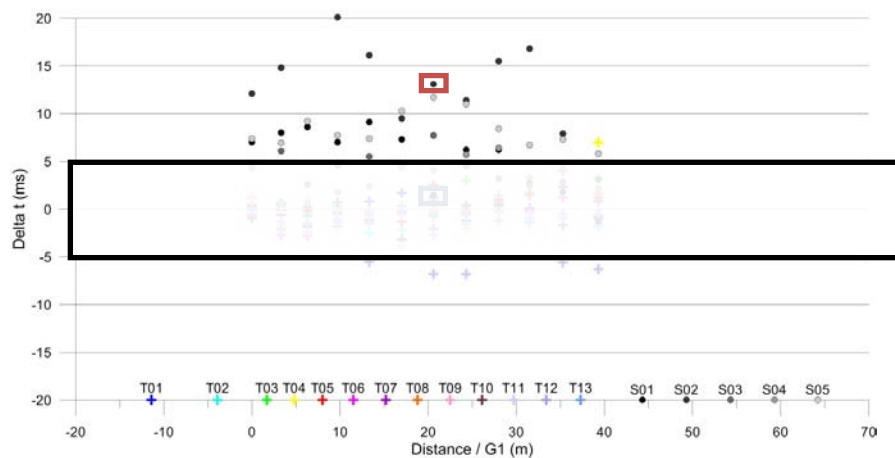


### c. Discussion des résultats

✓ Visualisation de l'incertitude sur les pointés et réalité de l'augmentation des temps pour les tirs S01 à S05

➤ Acquisition 10 bruitée (vent)

↪ Variation  $< \pm 5$  ms non significative (T01 à T13)



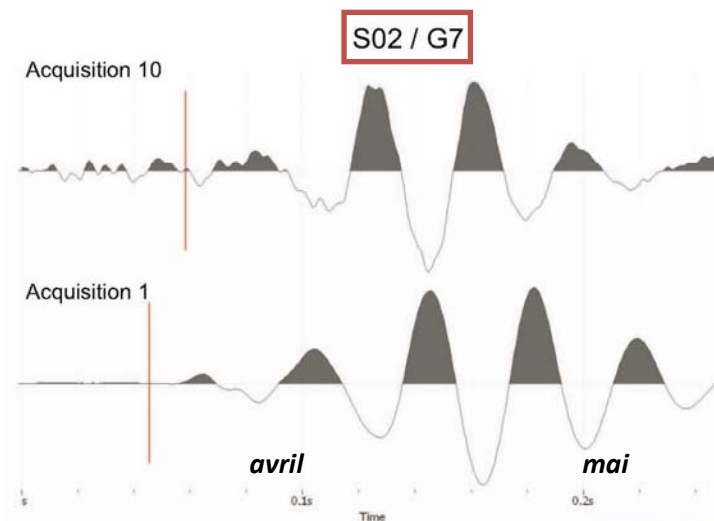
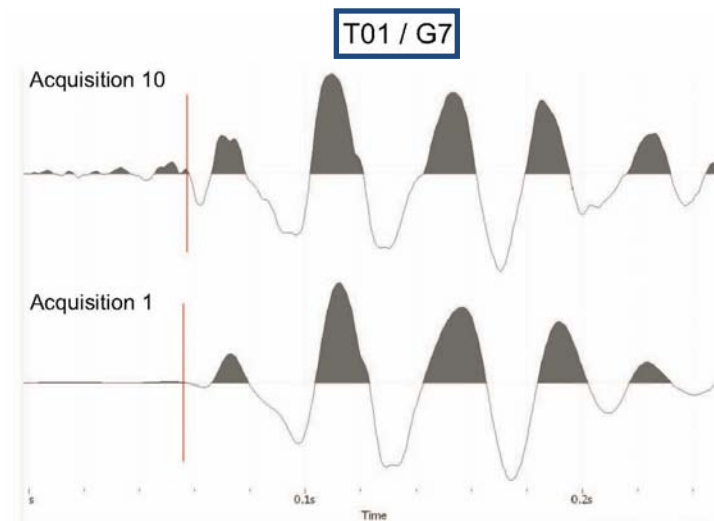
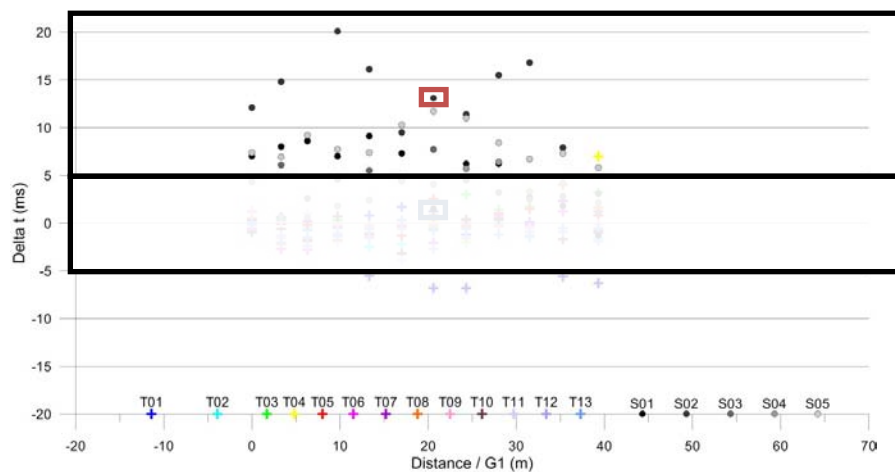
### c. Discussion des résultats

✓ Visualisation de l'incertitude sur les pointés et réalité de l'augmentation des temps pour les tirs S01 à S05

➤ Acquisition 10 bruitée (vent)

↪ Variation  $< \pm 5$  ms non significative (T01 à T13)

↪ Tirs S01 à S05: augmentation significative ?

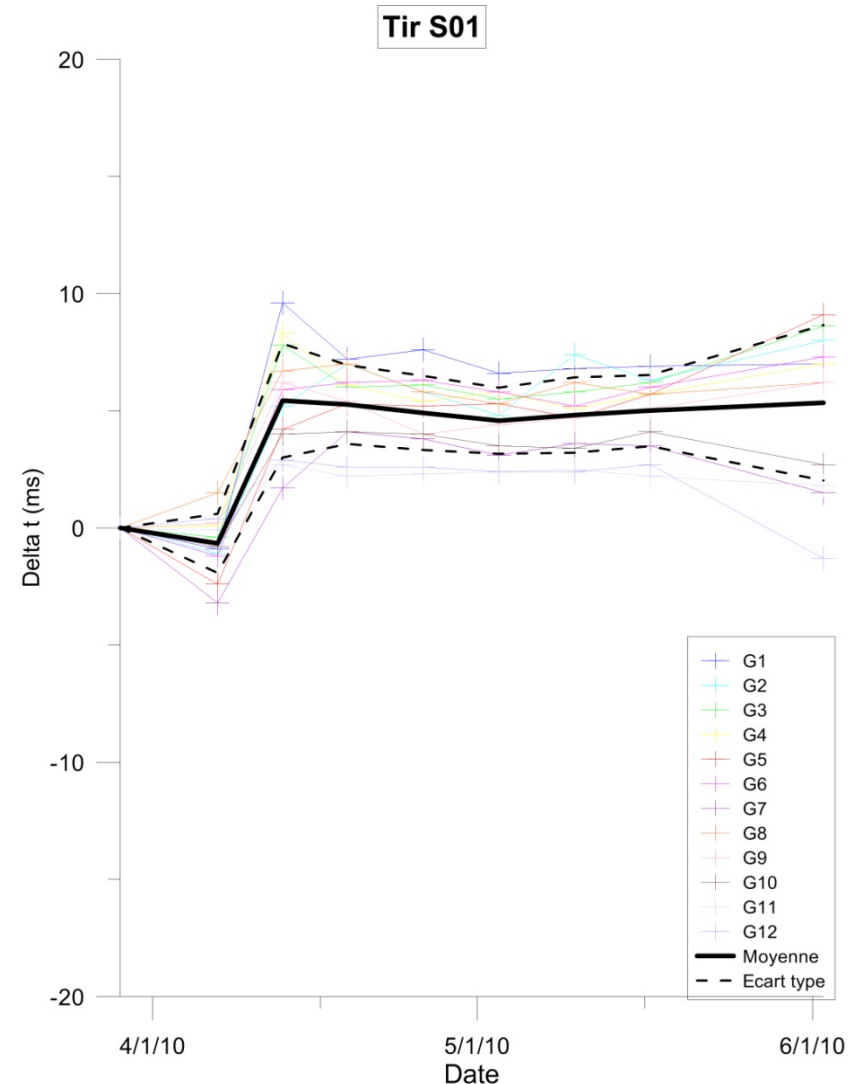
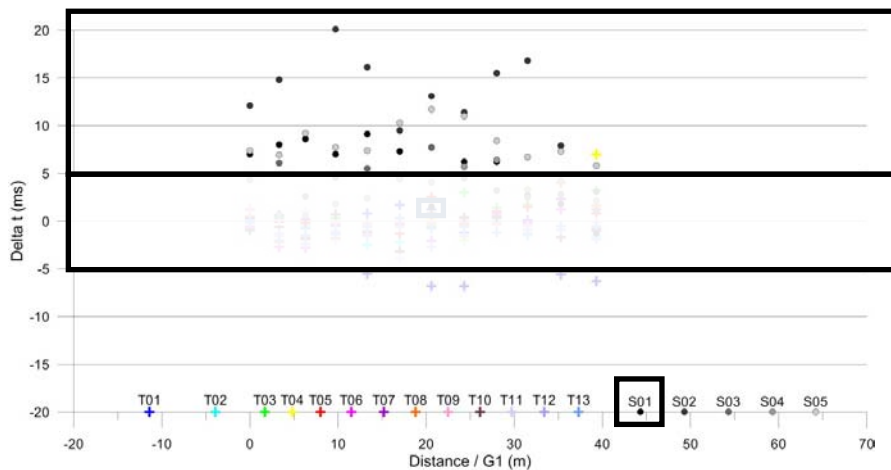




### c. Discussion des résultats

✓ Visualisation de l'incertitude sur les pointés et réalité de l'augmentation des temps pour les tirs S01 à S05

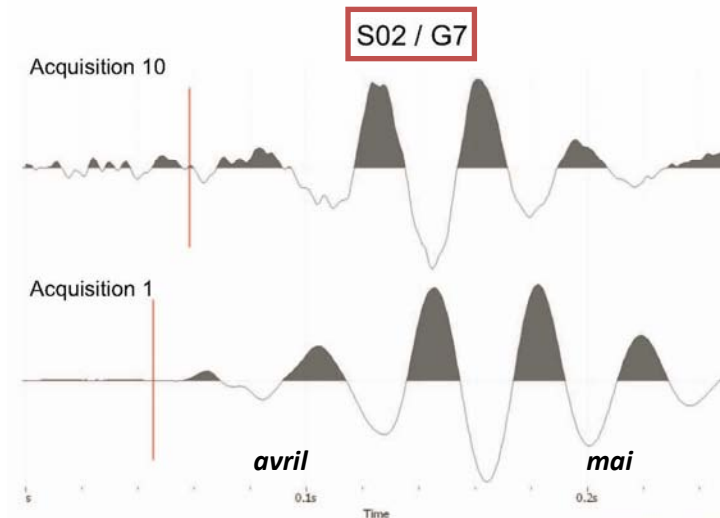
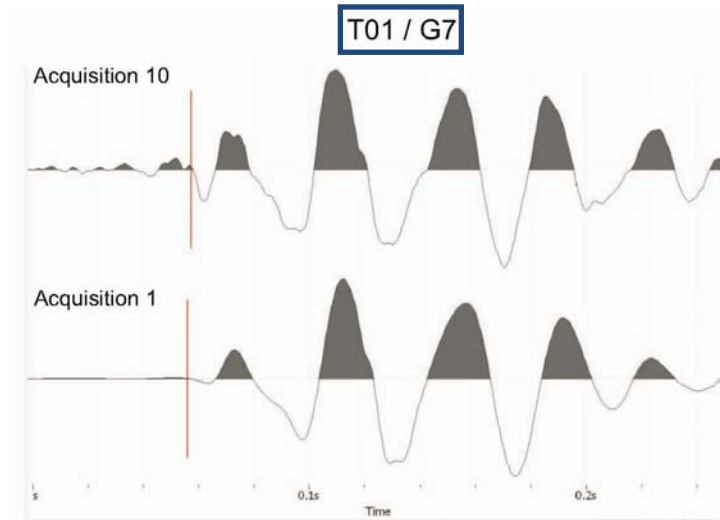
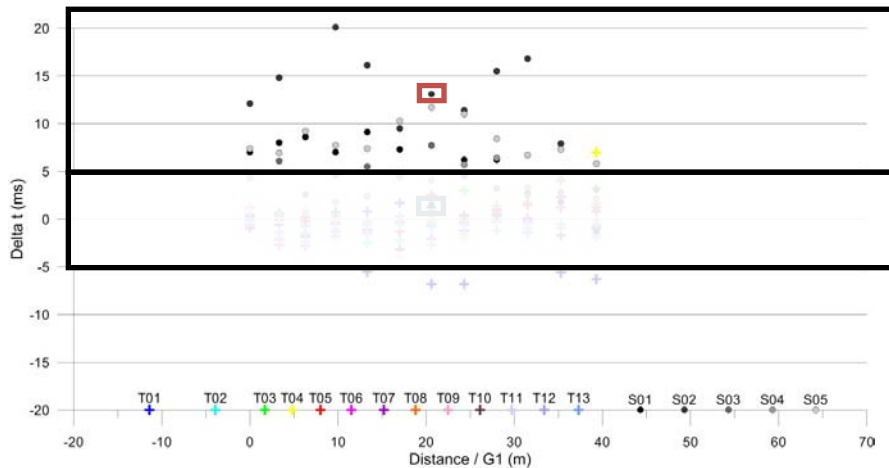
- Acquisition 10 bruitée (vent)
- ↪ Variation  $< \pm 5$  ms non significative (T01 à T13)
- ↪ Tirs S01 à S05: augmentation significative ?
  - ⇒ Augmentation brusque entre acquisitions 2 et 3 (7 au 13 avril 2010)



### c. Discussion des résultats

✓ Visualisation de l'incertitude sur les pointés et réalité de l'augmentation des temps pour les tirs S01 à S05

- Acquisition 10 bruitée (vent)
- ↪ Variation  $< \pm 5$  ms non significative (T01 à T13)
- ↪ Tirs S01 à S05: augmentation significative ?
  - ⇒ Augmentation brusque entre acquisitions 2 et 3 (7 au 13 avril 2010)
  - ↪ Réalité ou déphasage des signaux ?



## Introduction

1. Données climatiques et de déformation

2. Sismique active

**3. Sismique semi-active**

a. Principe

b. Résultats et interprétation

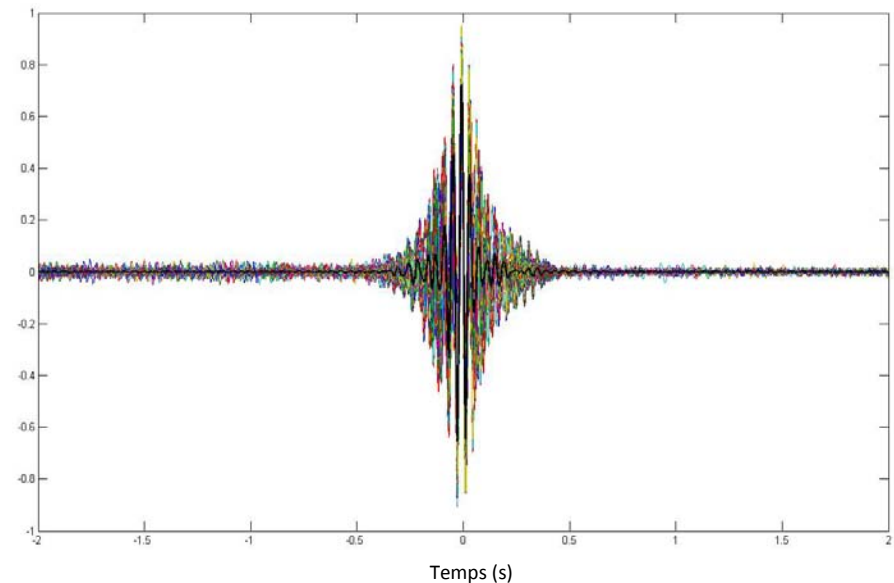
Conclusions - Perspectives

## a. Principe

### Deux étapes :

✓ Première étape: construction des fonctions de corrélation moyennes pour chaque acquisition (10\*10 tirs par acquisition) entre tous les capteurs (fonction de Green)

➤ pour un jour donné (29/03) et pour un couple donné (G1-G2)



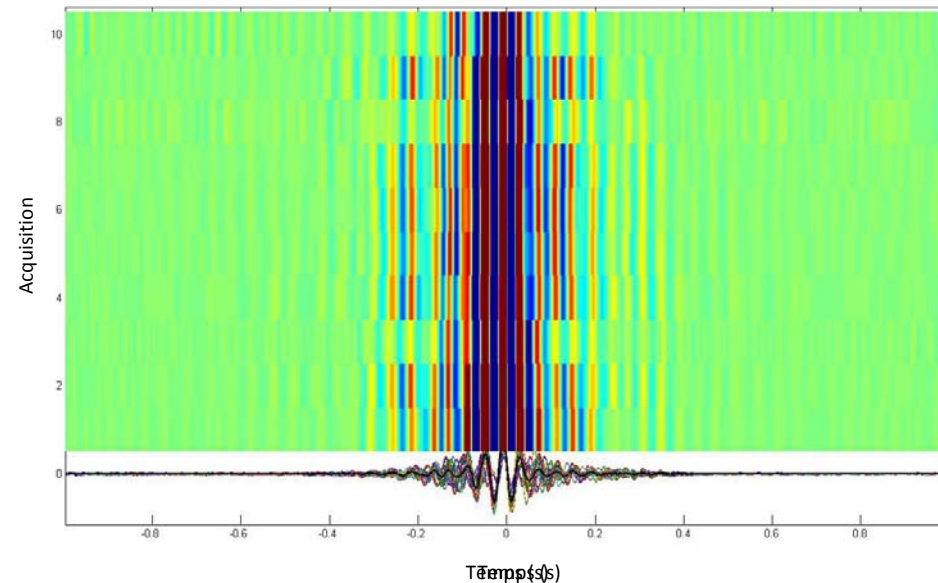


## a. Principe

### Deux étapes :

✓ Première étape: construction des fonctions de corrélation moyennes pour chaque acquisition (10\*10 tirs par acquisition) entre tous les capteurs (fonction de Green)

- pour un jour donné (29/03) et pour un couple donné (G1-G2)
- pour toutes les acquisitions et pour un couple donné (G1-G2)



## a. Principe

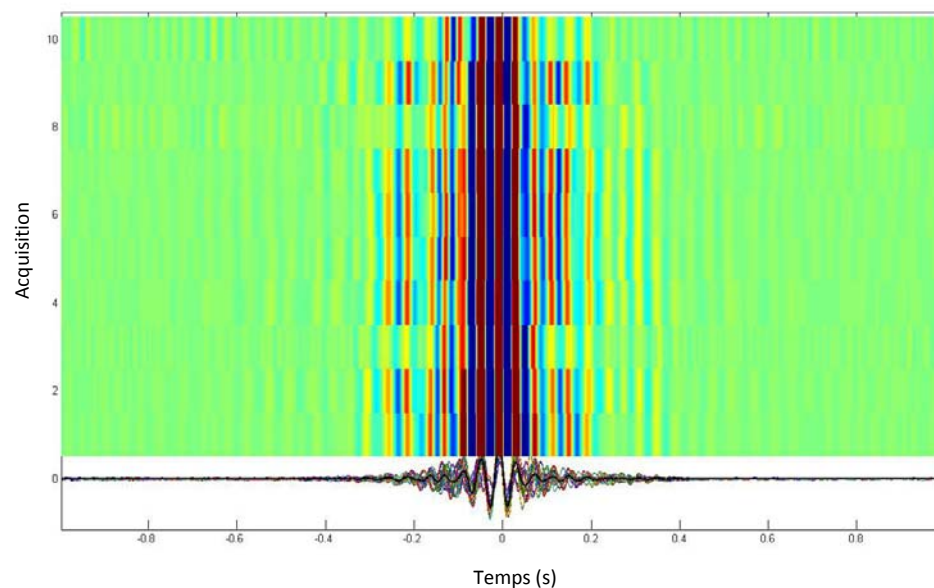
### Deux étapes :

✓ Première étape: construction des fonctions de corrélation moyennes pour chaque acquisition (10\*10 tirs par acquisition) entre tous les capteurs (fonction de Green)

➤ pour un jour donné (29/03) et pour un couple donné (G1-G2)

➤ pour toutes les acquisitions et pour un couple donné (G1-G2)

✓ Deuxième étape: comparaison des fonctions de corrélations obtenues pour un jour donné et les fonctions de corrélation de référence (moyenne sur tous les jours)



## a. Principe

### Deux étapes :

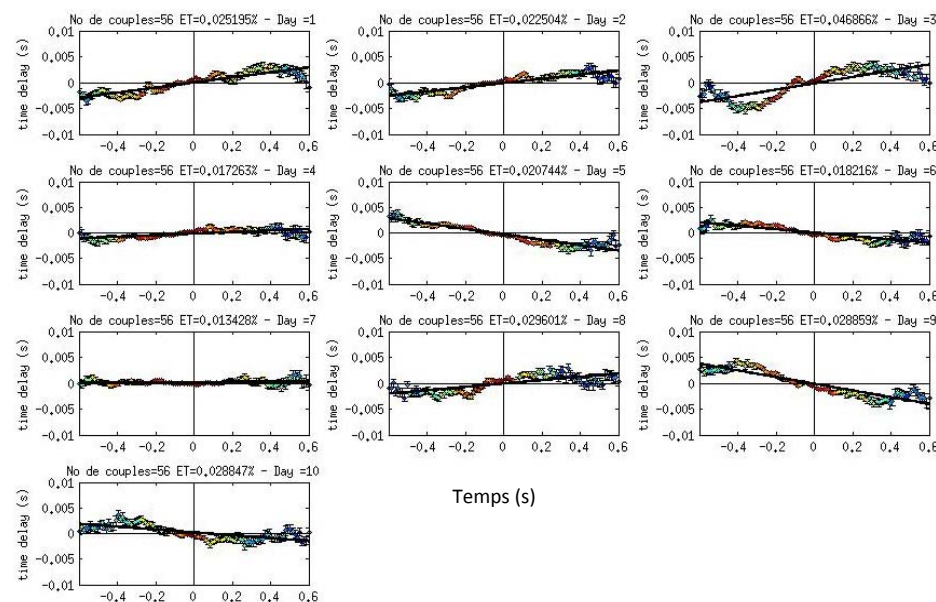
✓ Première étape: construction des fonctions de corrélation moyennes pour chaque acquisition (10\*10 tirs par acquisition) entre tous les capteurs (fonction de Green)

➤ pour un jour donné (29/03) et pour un couple donné (G1-G2)

➤ pour toutes les acquisitions et pour un couple donné (G1-G2)

✓ Deuxième étape: comparaison des fonctions de corrélations obtenues pour un jour donné et les fonctions de corrélation de référence (moyenne sur tous les jours)

➤ méthode des doublets (entre 20 et 50 Hz)



## a. Principe

### Deux étapes :

✓ Première étape: construction des fonctions de corrélation moyennes pour chaque acquisition (10\*10 tirs par acquisition) entre tous les capteurs (fonction de Green)

➤ pour un jour donné (29/03) et pour un couple donné (G1-G2)

➤ pour toutes les acquisitions et pour un couple donné (G1-G2)

✓ Deuxième étape: comparaison des fonctions de corrélations obtenues pour un jour donné et les fonctions de corrélation de référence (moyenne sur tous les jours)

➤ méthode des doublets (entre 20 et 50 Hz)

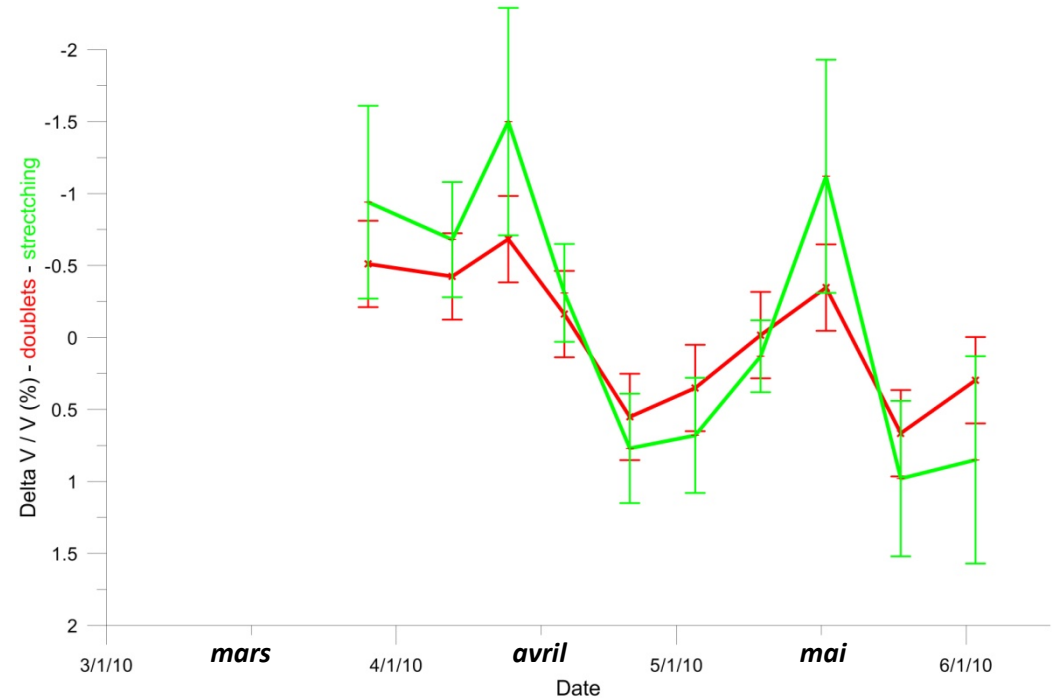
➤ méthode de stretching



## b. Résultats et interprétation

⇒ Estimer la différence de temps relative, inversement liée aux variations de vitesse dans le milieu sur quelques mètres d'épaisseurs

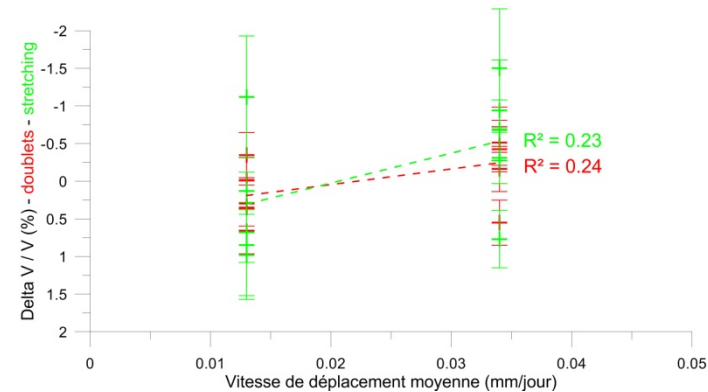
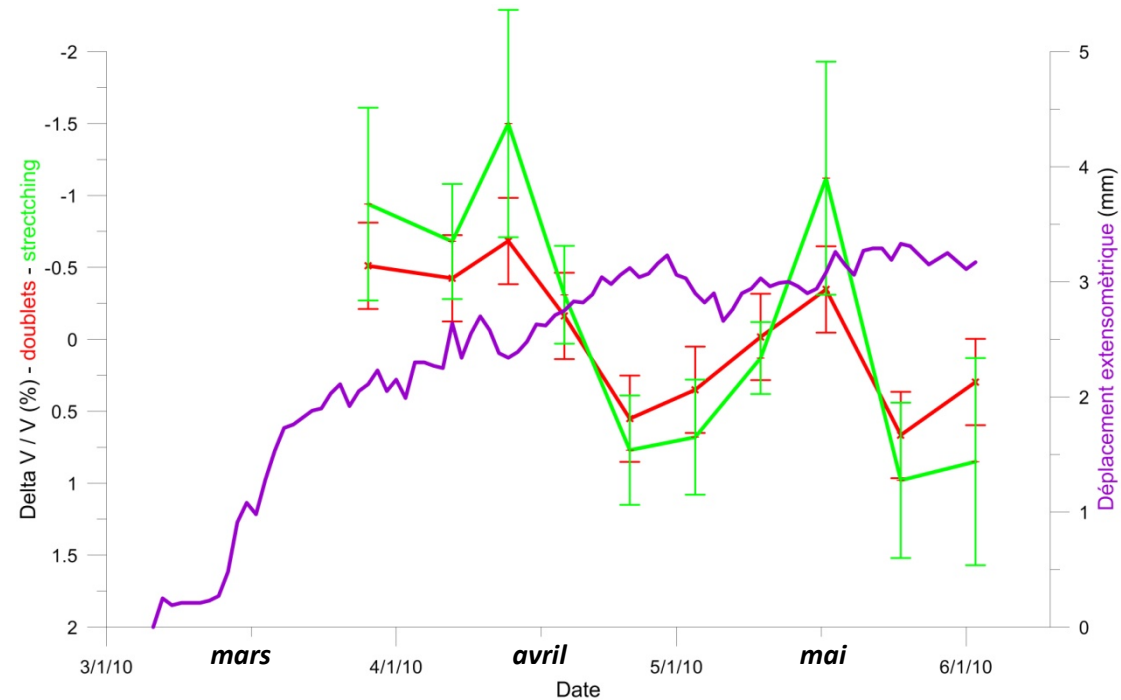
↳ corrélation avec déformation



## b. Résultats et interprétation

⇒ Estimer la différence de temps relative, inversement liée aux variations de vitesse dans le milieu sur quelques mètres d'épaisseurs

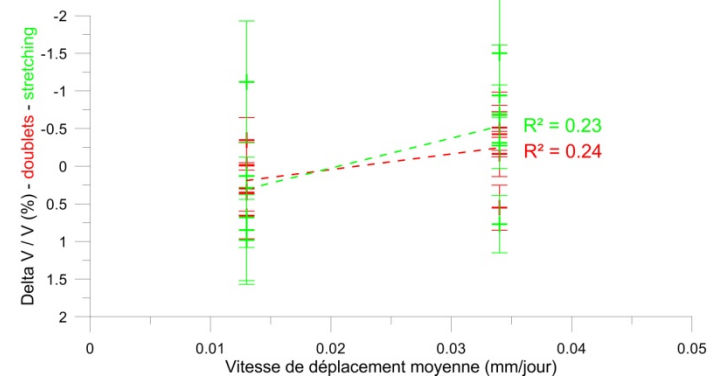
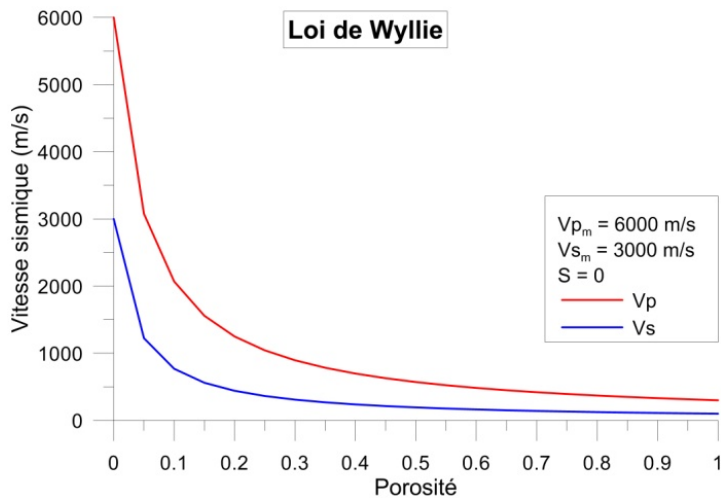
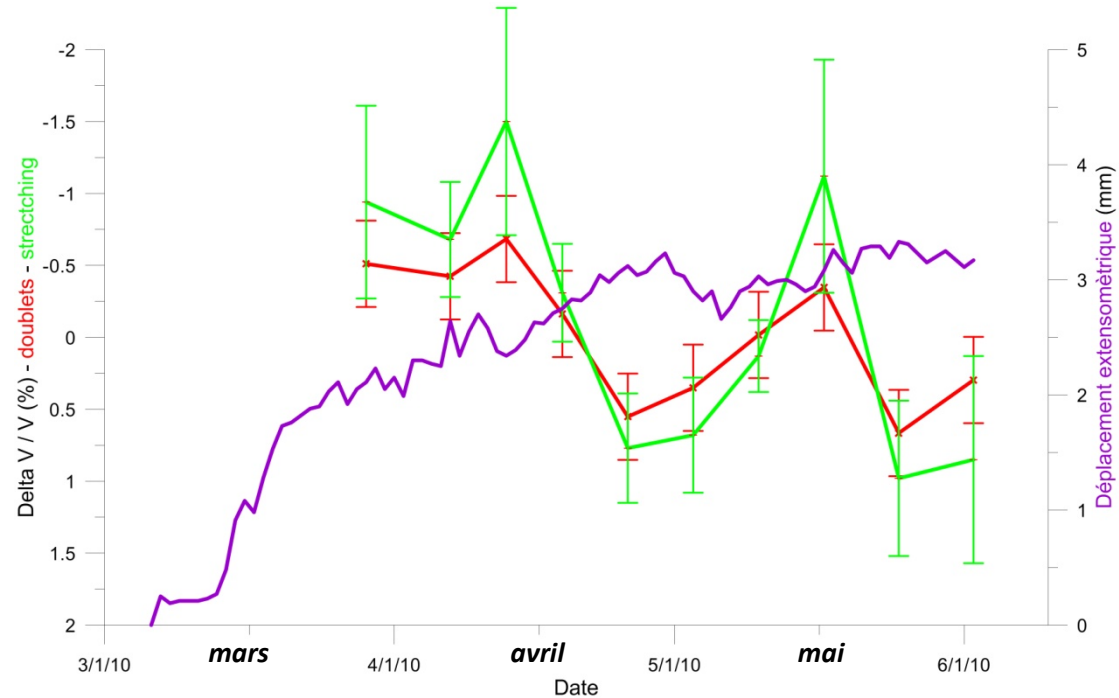
↪ corrélation avec déformation



## b. Résultats et interprétation

⇒ Estimer la différence de temps relative, inversement liée aux variations de vitesse dans le milieu sur quelques mètres d'épaisseurs

↪ corrélation avec déformation  
 ⇒ Non

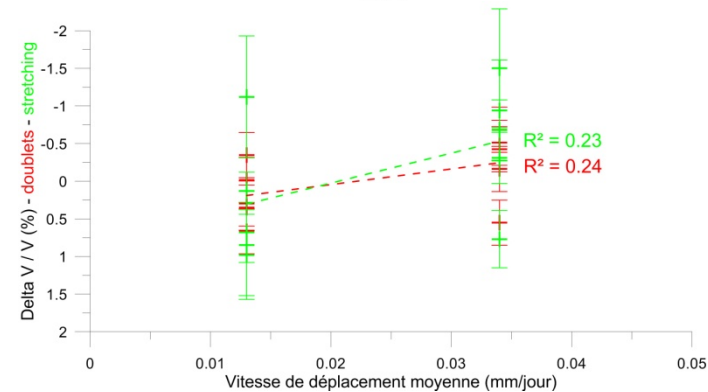
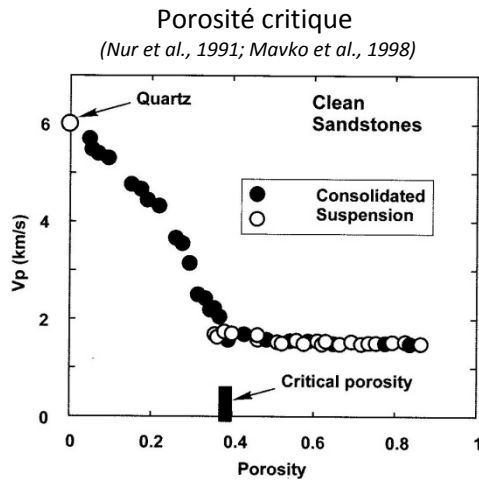
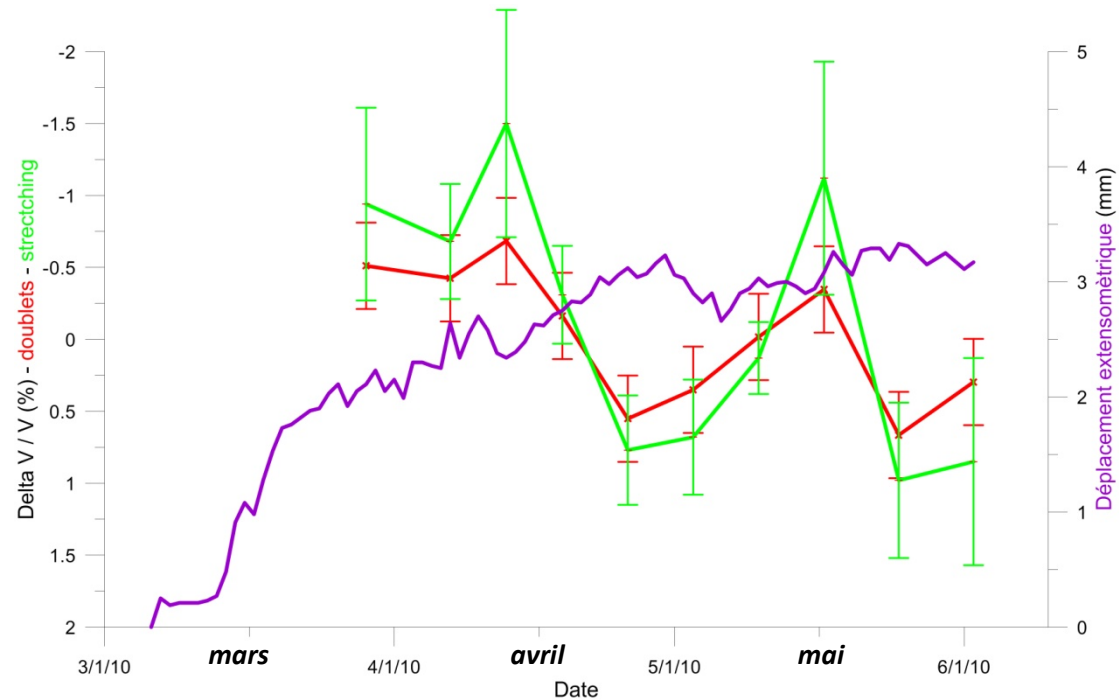


## b. Résultats et interprétation

⇒ Estimer la différence de temps relative, inversement liée aux variations de vitesse dans le milieu sur quelques mètres d'épaisseurs

↪ corrélation avec déformation

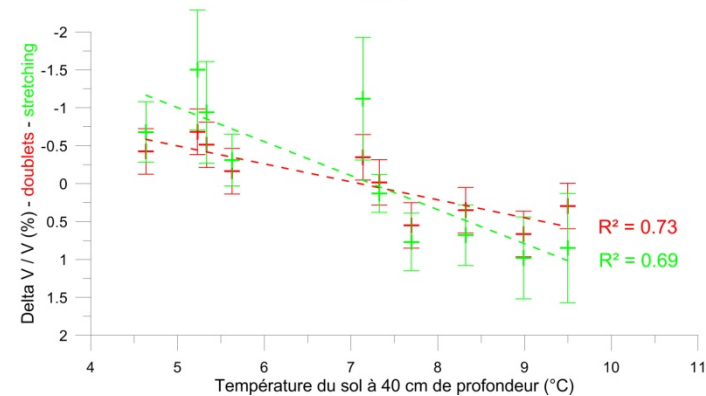
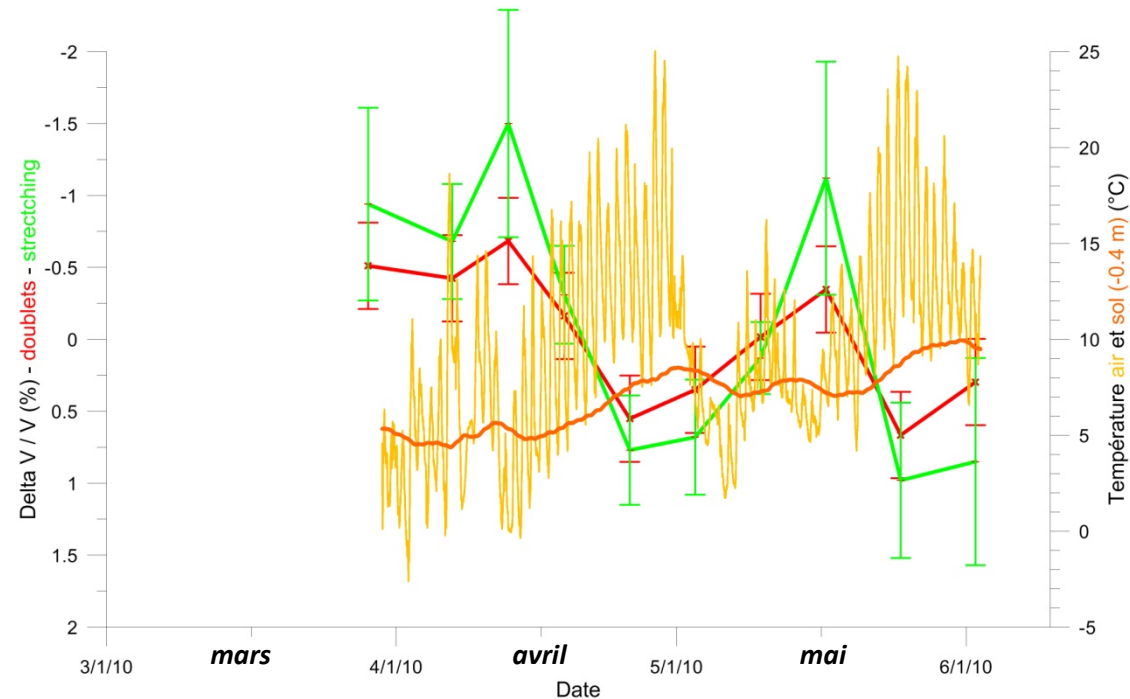
⇒ Non



## b. Résultats et interprétation

⇒ Estimer la différence de temps relative, inversement liée aux variations de vitesse dans le milieu sur quelques mètres d'épaisseurs

- ↪ corrélation avec déformation
  - ⇒ Non
- ↪ corrélation avec température





## b. Résultats et interprétation

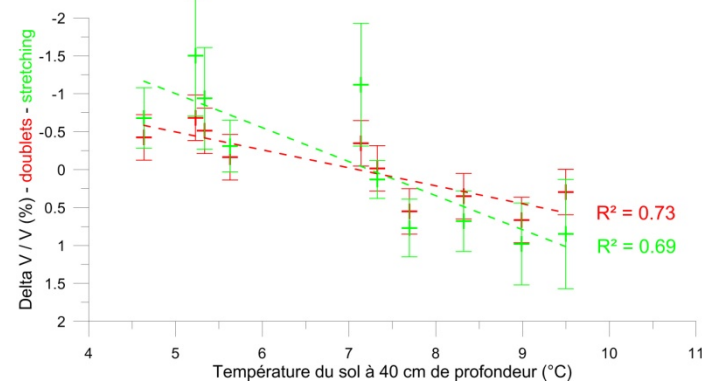
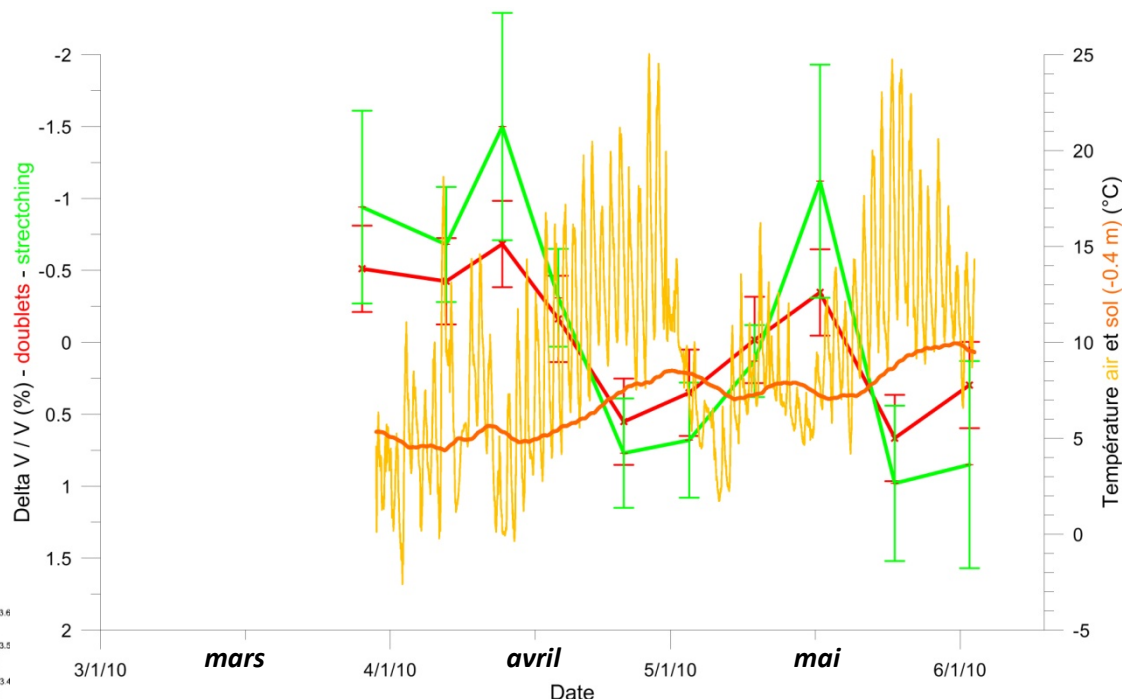
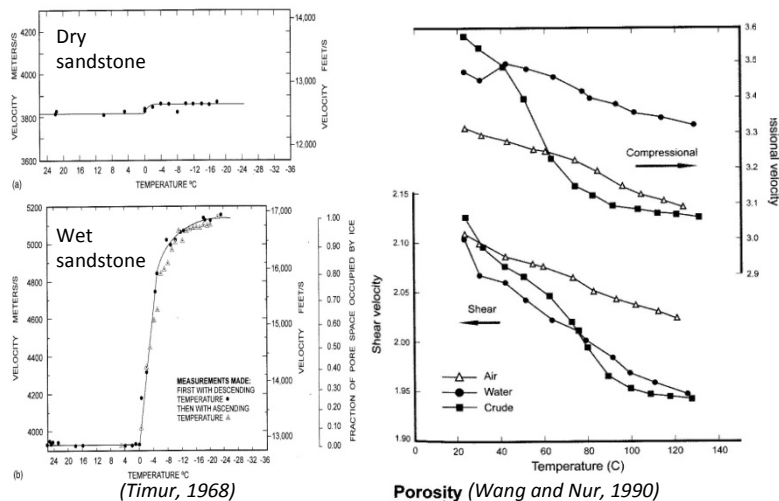
⇒ Estimer la différence de temps relative, inversement liée aux variations de vitesse dans le milieu sur quelques mètres d'épaisseurs

⇒ corrélation avec déformation

⇒ Non

⇒ corrélation avec température

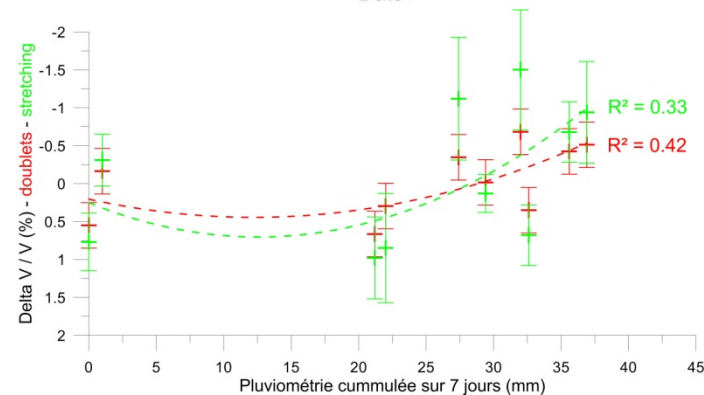
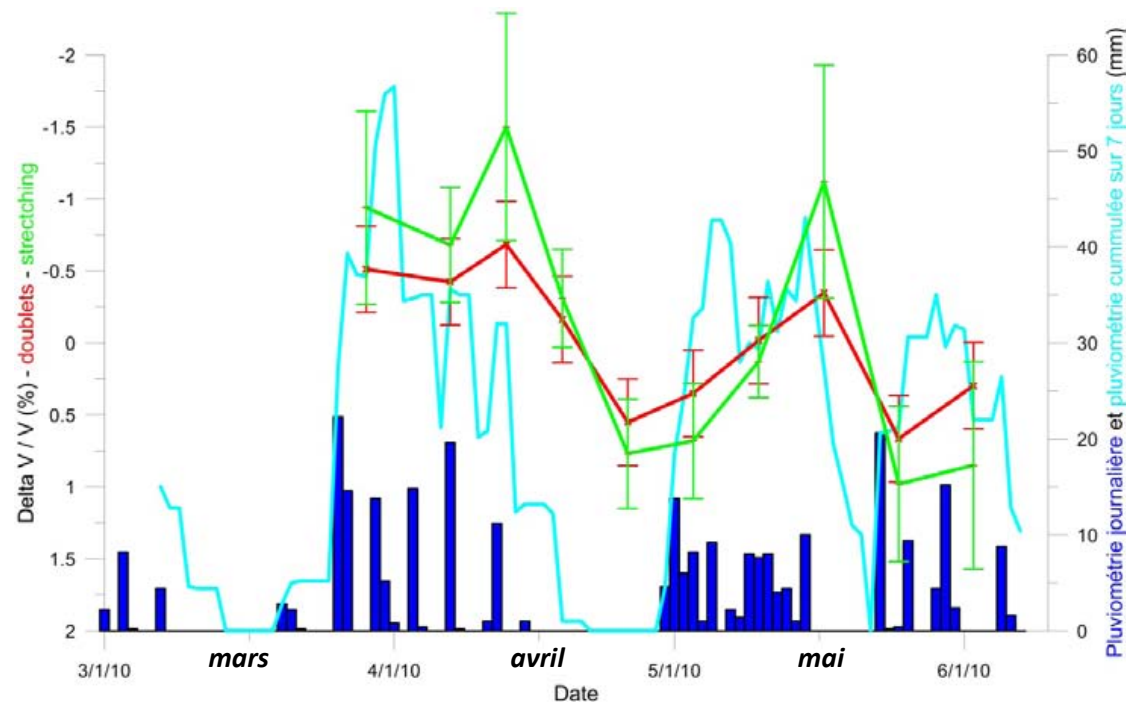
⇒ ↗ température ⇒ ↗ vitesse ?



## b. Résultats et interprétation

⇒ Estimer la différence de temps relative, inversement liée aux variations de vitesse dans le milieu sur quelques mètres d'épaisseurs

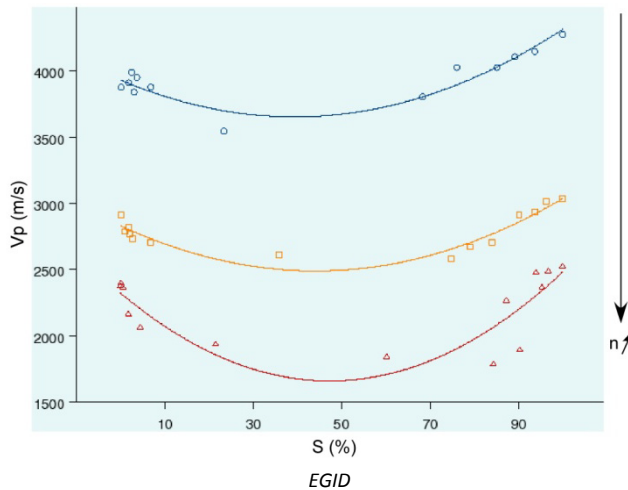
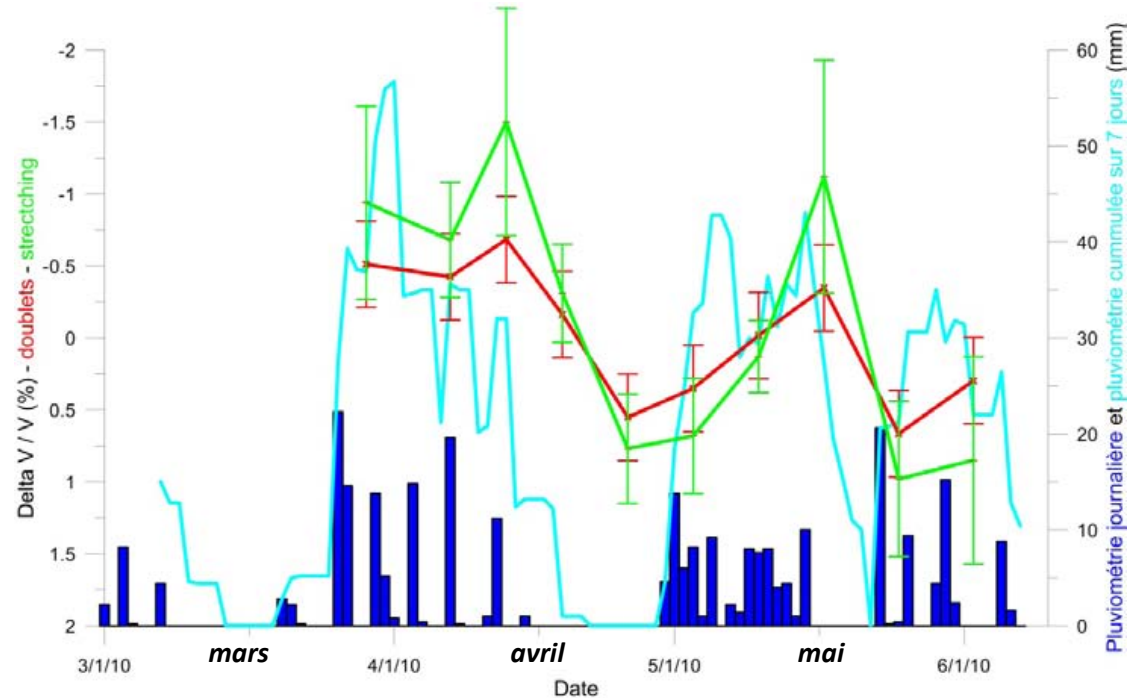
- ↪ corrélation avec déformation
  - ⇒ Non
- ↪ corrélation avec température
  - ⇒ ↗ température ⇒ ↗ vitesse ?
- ↪ corrélation avec pluviométrie



## b. Résultats et interprétation

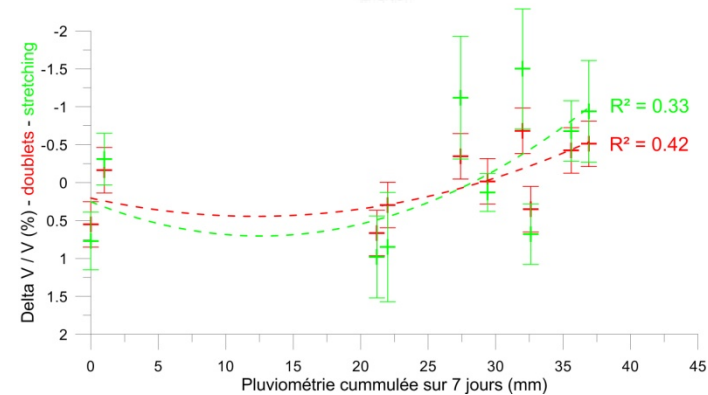
⇒ Estimer la différence de temps relative, inversement liée aux variations de vitesse dans le milieu sur quelques mètres d'épaisseurs

- ⇒ corrélation avec déformation
  - ⇒ Non
- ⇒ corrélation avec température
  - ⇒ ↗ température ⇒ ↗ vitesse ?
- ⇒ corrélation avec pluviométrie
  - ⇒ ↗ pluviométrie ⇒ ↘ vitesse



$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$



## Introduction

1. Données climatiques et de déformation
2. Sismique active
3. Sismique semi-active

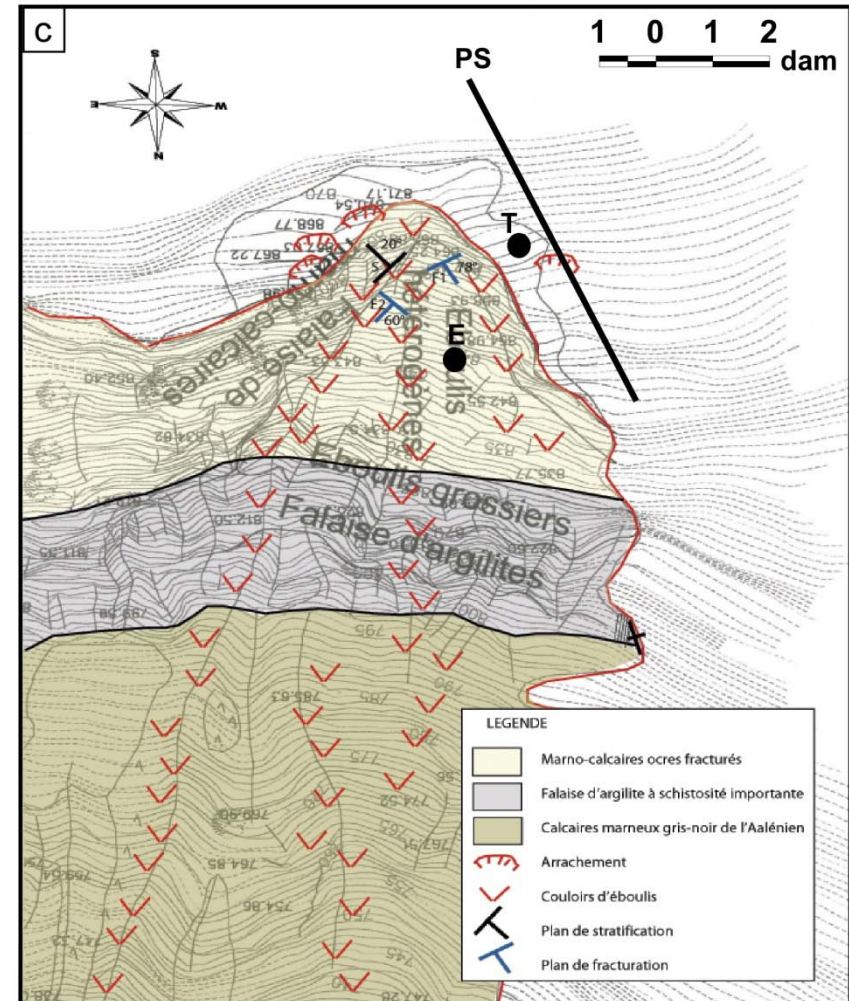
## ***Conclusions – Perspectives***

- a. Conclusions
- b. Perspectives

## a. Conclusions

✓ Tomographies sismiques

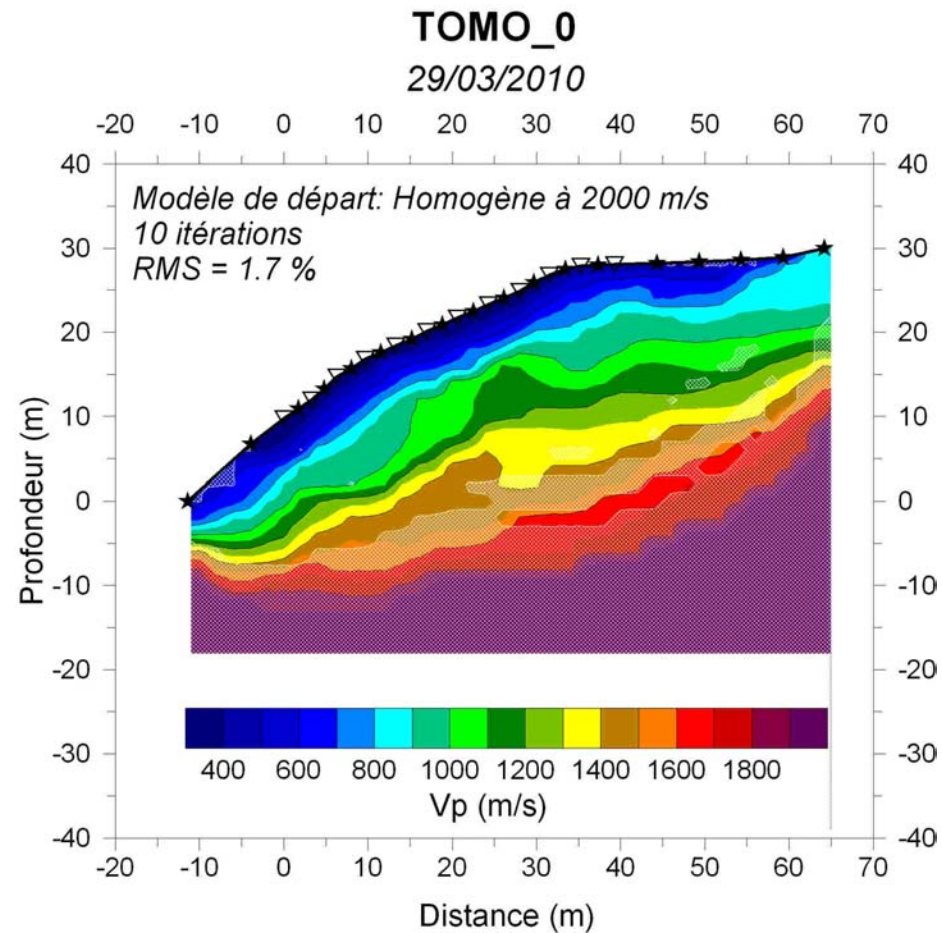
✓ Expériences de sismique semi-active





## a. Conclusions

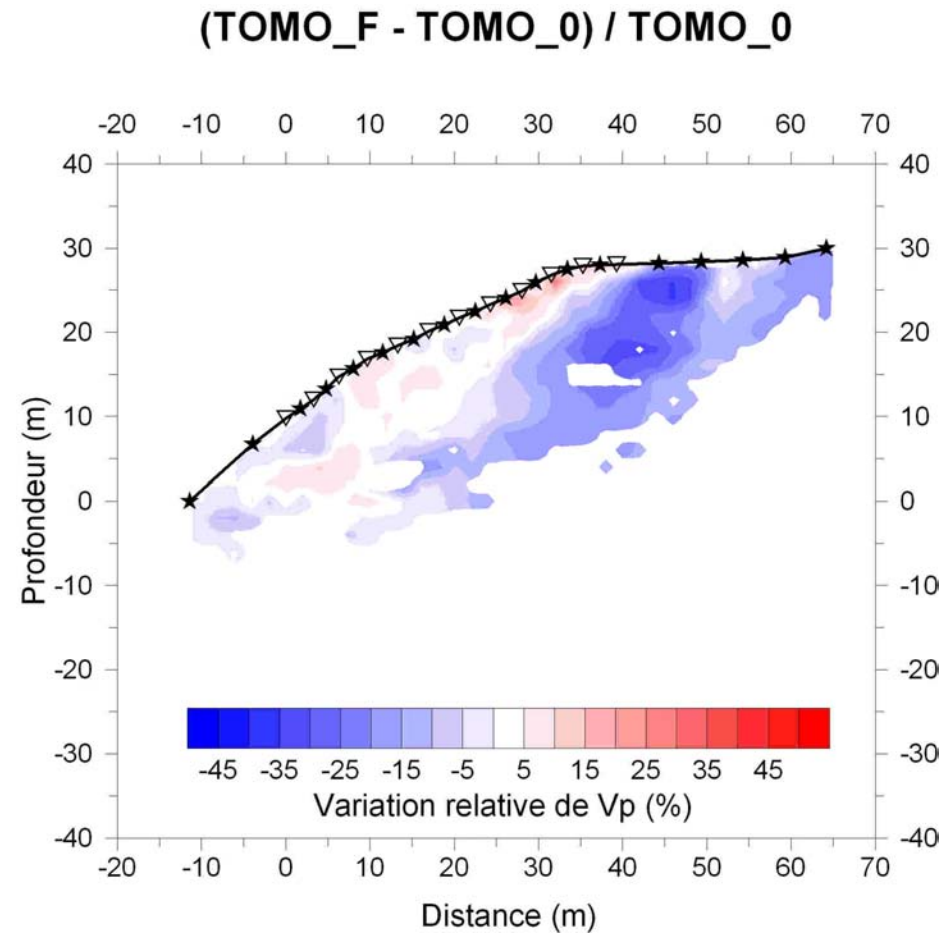
- ✓ Tomographies sismiques
  - Caractérisation du milieu :  $V_p$  très faible
    - ⇒ milieu très fracturé et décomprimé
  
- ✓ Expériences de sismique semi-active





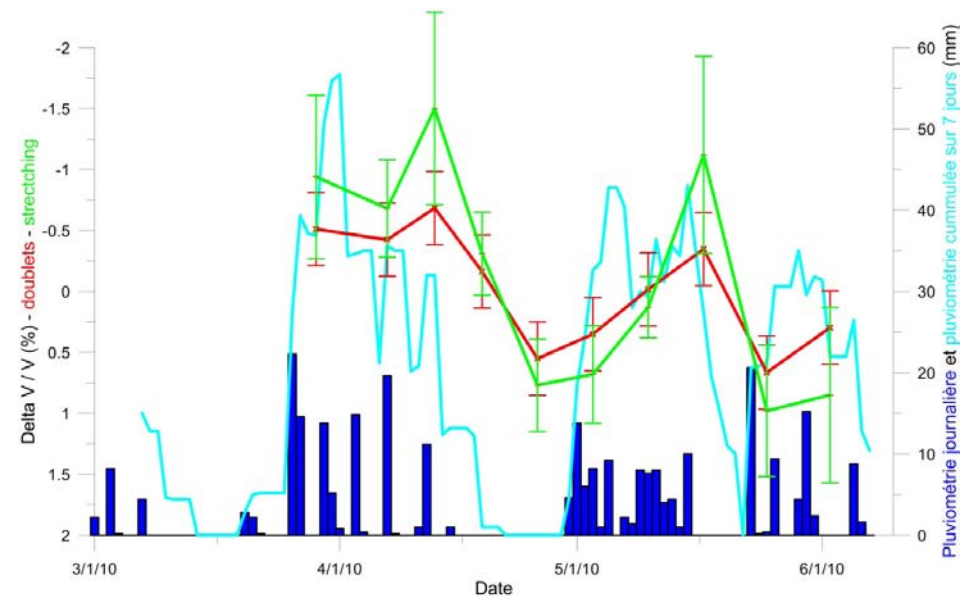
## a. Conclusions

- ✓ Tomographies sismiques
  - Caractérisation du milieu :  $V_p$  très faible
    - ⇒ milieu très fracturé et décomprimé
  - Forte diminution de vitesses à l'amont
    - ⇒ ↗ fracturation ?
  - Légère augmentation de vitesses à l'aval
    - ⇒ mais non significative
- ✓ Expériences de sismique semi-active



## a. Conclusions

- ✓ Tomographies sismiques
  - Caractérisation du milieu :  $V_p$  très faible
    - ⇒ milieu très fracturé et décomprimé
  - Forte diminution de vitesses à l'amont
    - ⇒ ↗ fracturation ?
  - Légère augmentation de vitesses à l'aval
    - ⇒ mais non significative
- ✓ Expériences de sismique semi-active
  - Faibles variations de vitesse du milieu détectables avec une très bonne précision ( $< \pm 0.5\%$ )
    - ⇒ probablement en lien avec la variation du degré de saturation du massif rocheux



## a. Conclusions

### ✓ Tomographies sismiques

- Caractérisation du milieu :  $V_p$  très faible
  - ⇒ milieu très fracturé et décomprimé
- Forte diminution de vitesses à l'amont
  - ⇒ ↗ fracturation ?
- Légère augmentation de vitesses à l'aval
  - ⇒ mais non significative

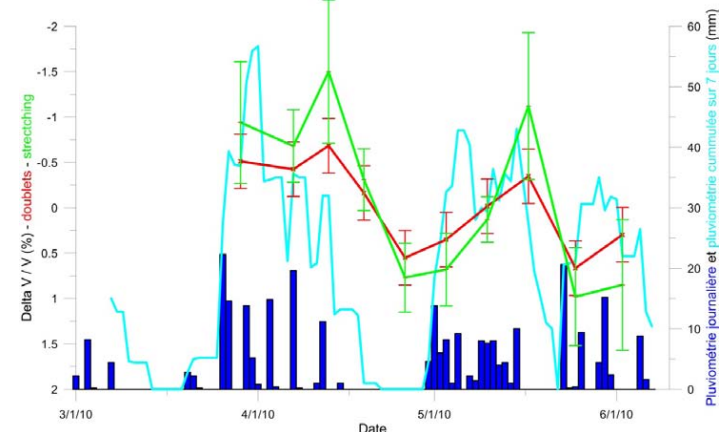
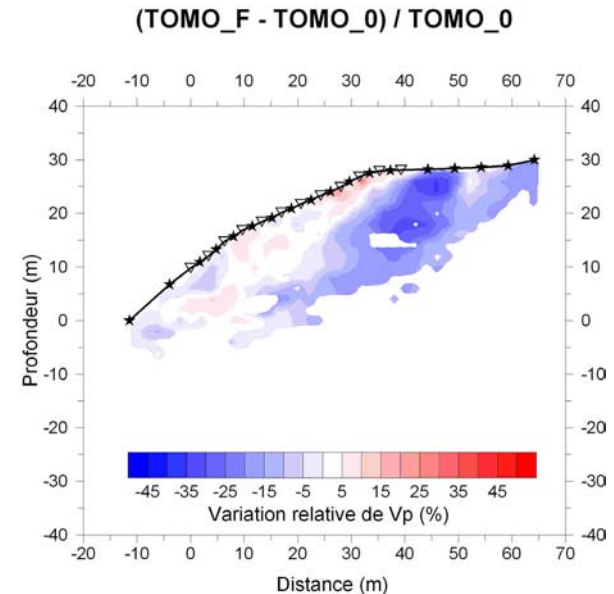
### ✓ Expériences de sismique semi-active

- Faibles variations de vitesse du milieu détectables avec une très bonne précision ( $< \pm 0.5\%$ )
  - ⇒ probablement en lien avec la variation du degré de saturation du massif rocheux

#### ⇒ Comparaison des 2 méthodes

- Zone commune:  $X = 0-40\text{m}$  et  $H = 0-10\text{m}$
- ↔ Active:  $DV/V = +0.7\%$
- ↔ Semi-active:  $dV/V = +0.8$  à  $+1.7\%$

#### ⇒ Assèchement du milieu



## b. Perspectives

✓ Analyse des ondes de surface des tirs S01 à S05

✓ Construction des fonctions de corrélation et leur comparaison permettent d'estimer des variations très fines de vitesses dans le milieu à l'échelle décimétrique

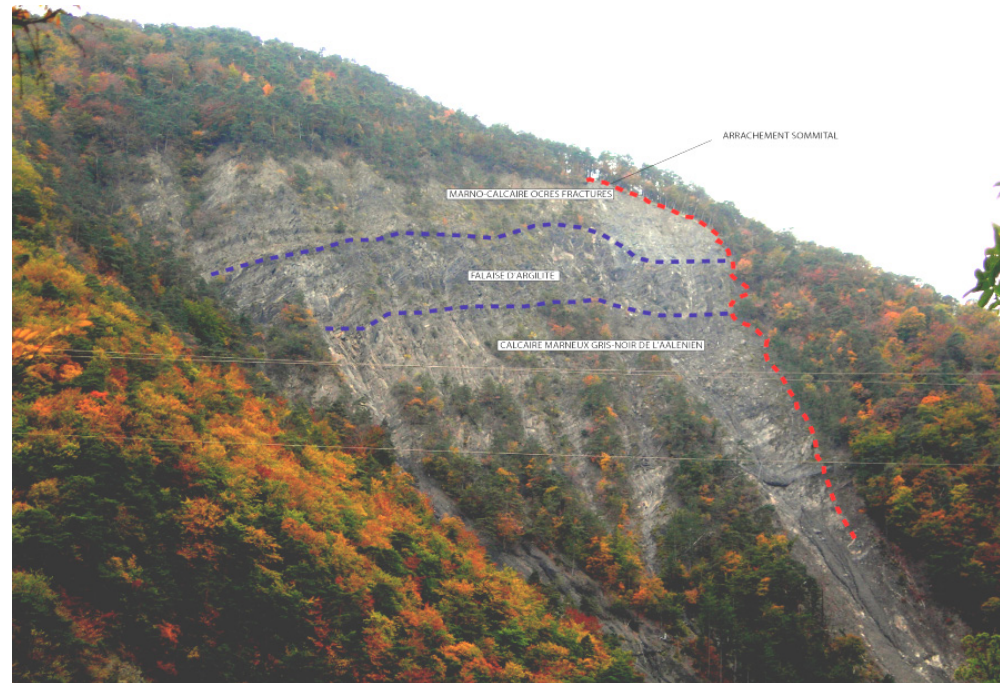
+ Applicable dans le cadre de faibles déformations du massif

- Sensible aux facteurs externes (autre que la déformation du massif)

⇒ Analyse sur différentes gammes spectrales

⇒ Analyse sur une durée temporelle plus grande

↳ Utilisation du bruit de fond sismique en complément des tirs





# Caractérisation de l'évolution d'un massif rocheux très fracturé par différentes méthodes sismiques

ADRGT: O. Le Roux, O. Meric, H. Cadet, L. Lorier

LGIT: E. Larose, D. Jongmans

IPGP: F. Brenguier



Journée de restitution du programme de recherche 2009  
financé par le Conseil général de l'Isère



Pôle Grenoblois d'étude et de recherche  
pour la prévention des Risques Naturels

1 décembre 2010

