

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

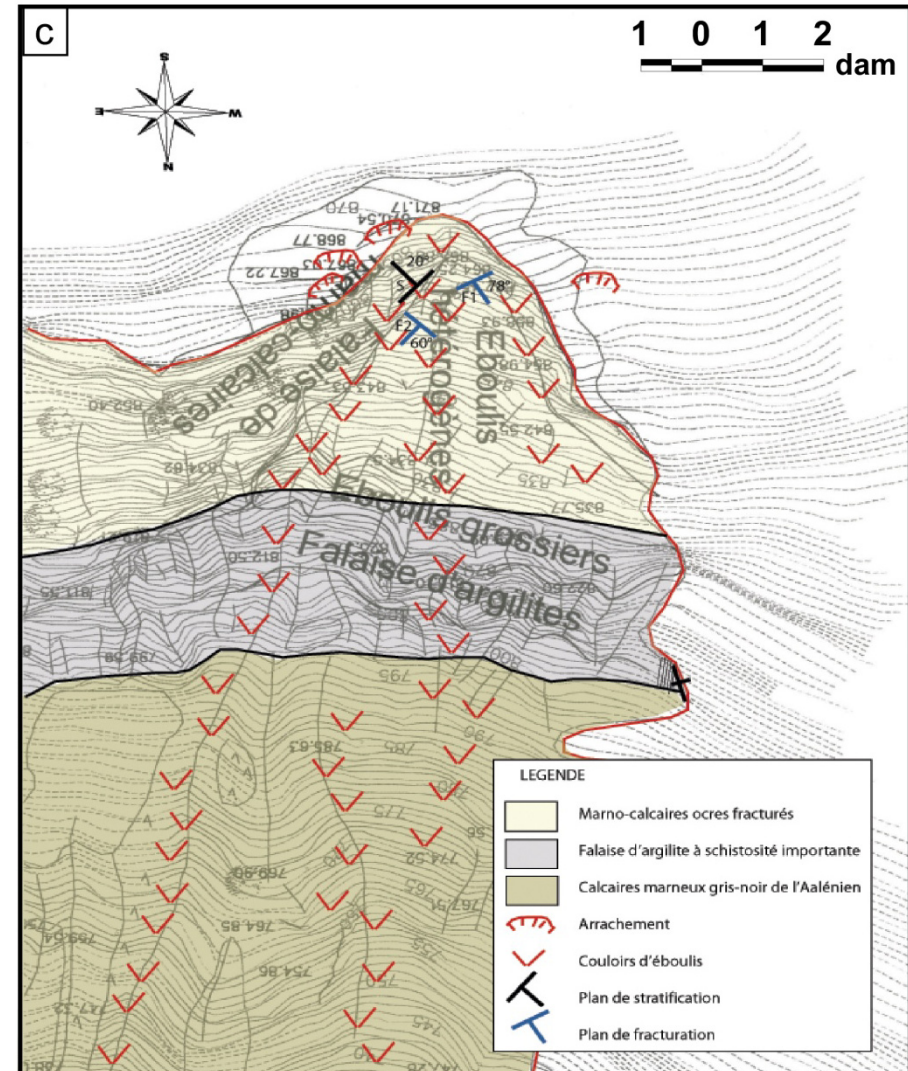
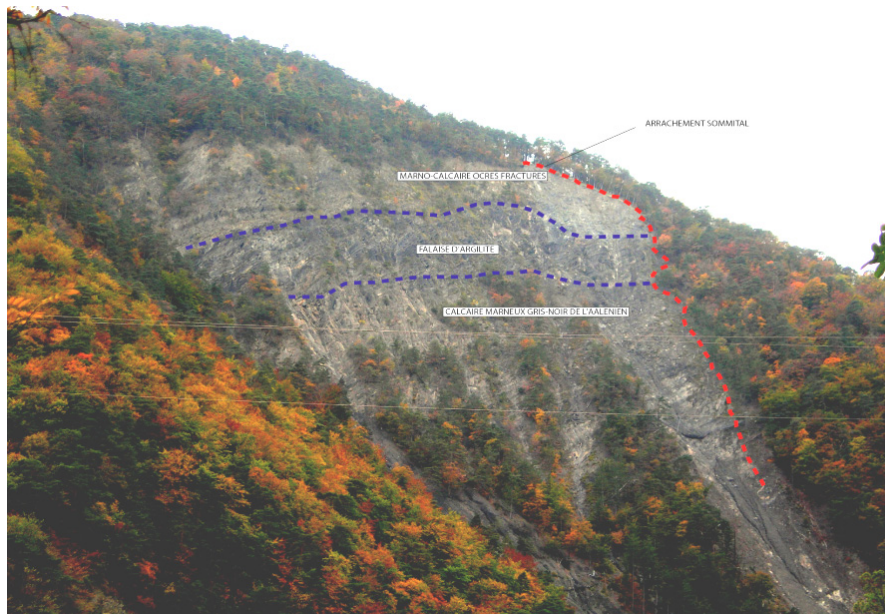
a. Présentation du site d'étude

- ✓ Site des Echarennas (Sud Isère, Trièves)



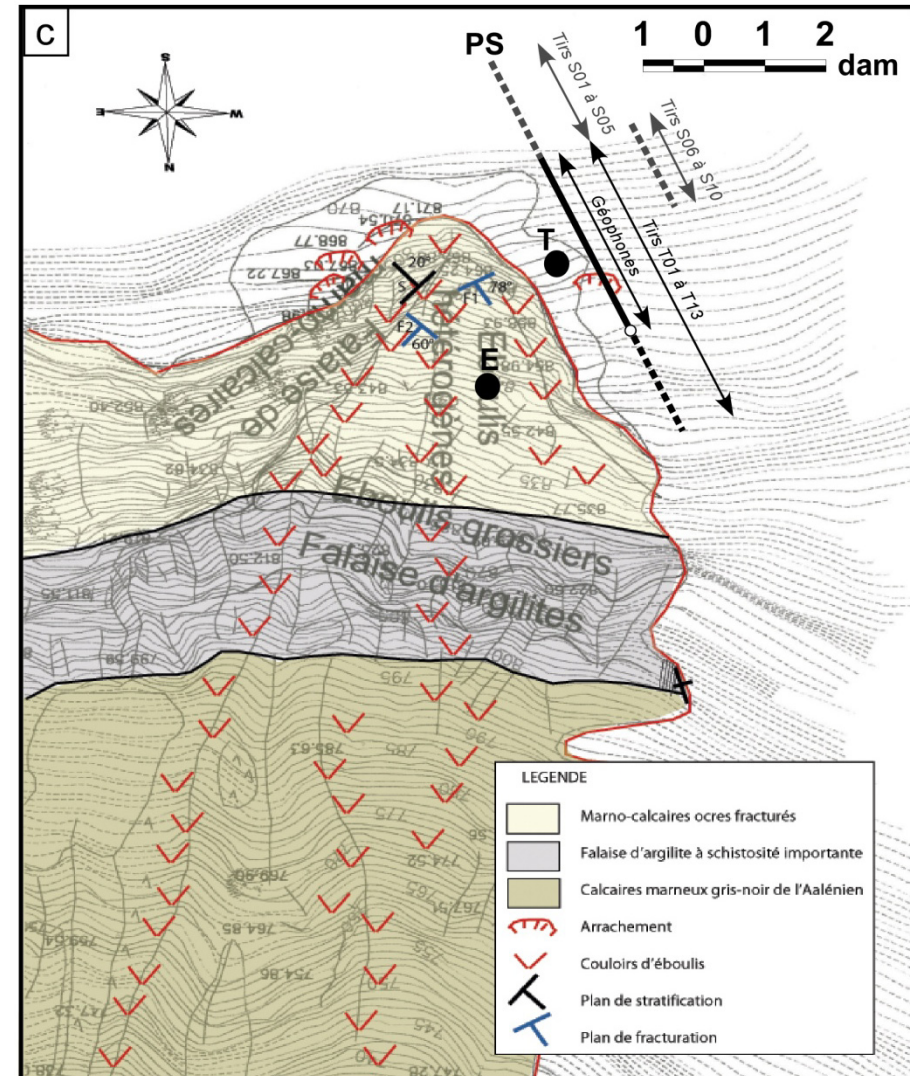
a. Présentation du site d'étude

- ✓ Site des Echarennas (Sud Isère, Trièves)
- ✓ Massif constitué de calcaires marneux et schistes fracturés
- ✓ Pente de 45° vers le Nord
- ✓ Eboulement de plusieurs centaines de m³ 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

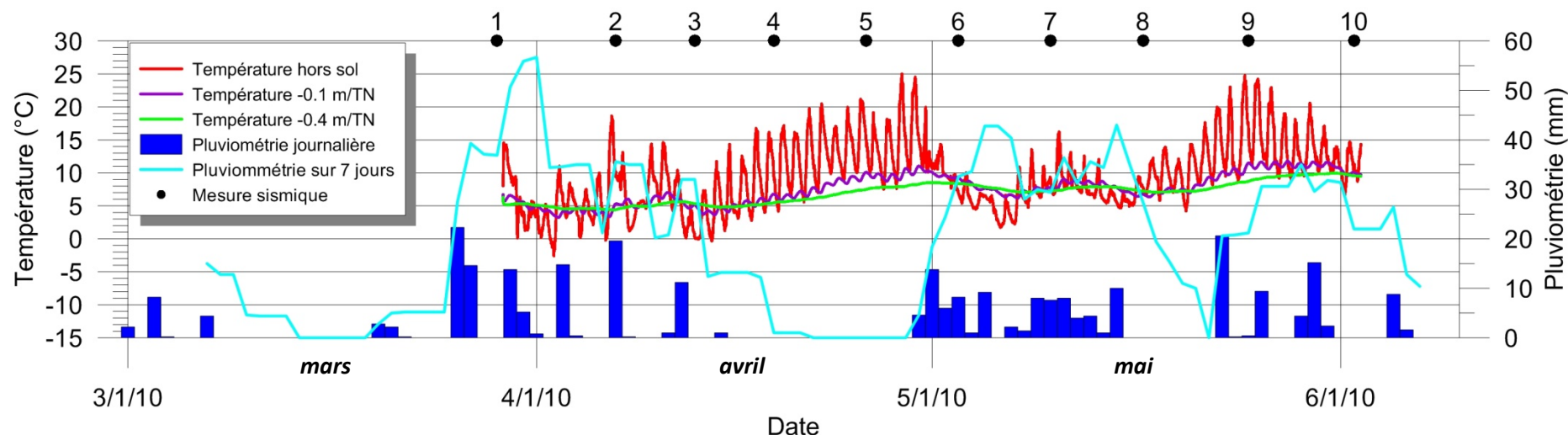
2. Sismique active

3. Sismique semi-active

Conclusions - Perspectives

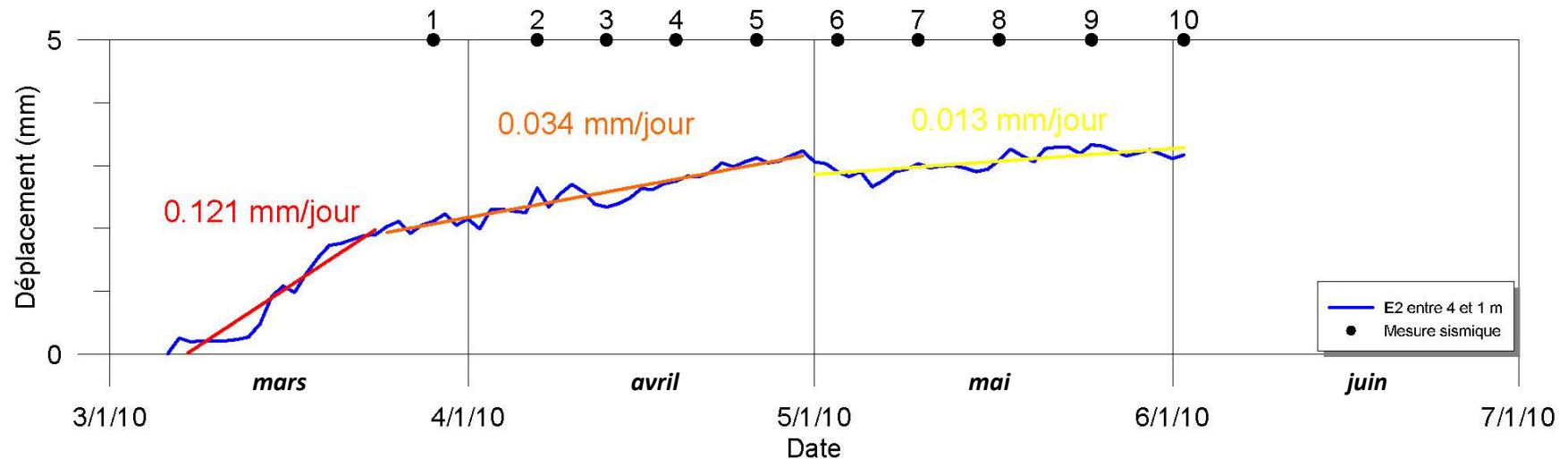
a. Données climatiques

- ✓ 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

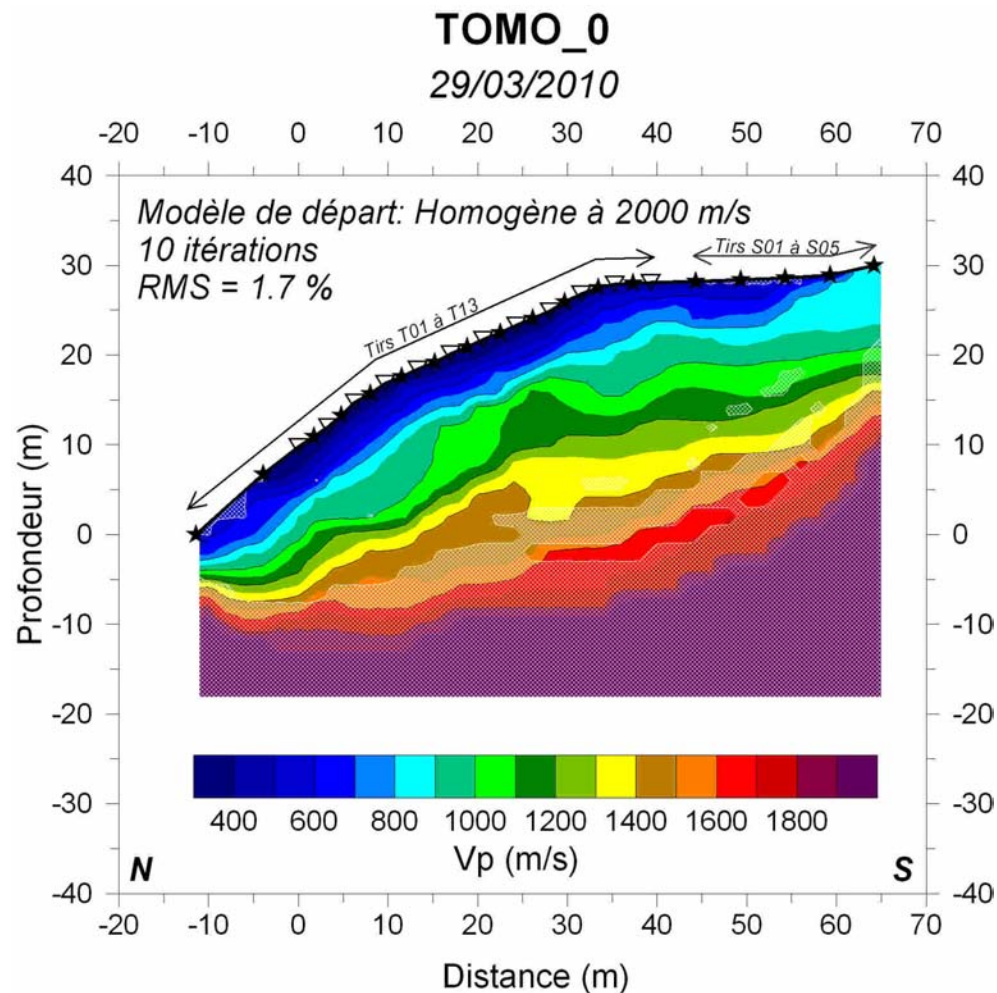
✓ Vitesses très faible ($V_p = 300 - 800$ m/s) sur 5 mètres d'épaisseur dans la partie aval du profil

➤ zone très altérée et très décomprimée du substratum rocheux

➤ cette couche s'approfondit légèrement dans la partie amont pour atteindre 6 - 7 m

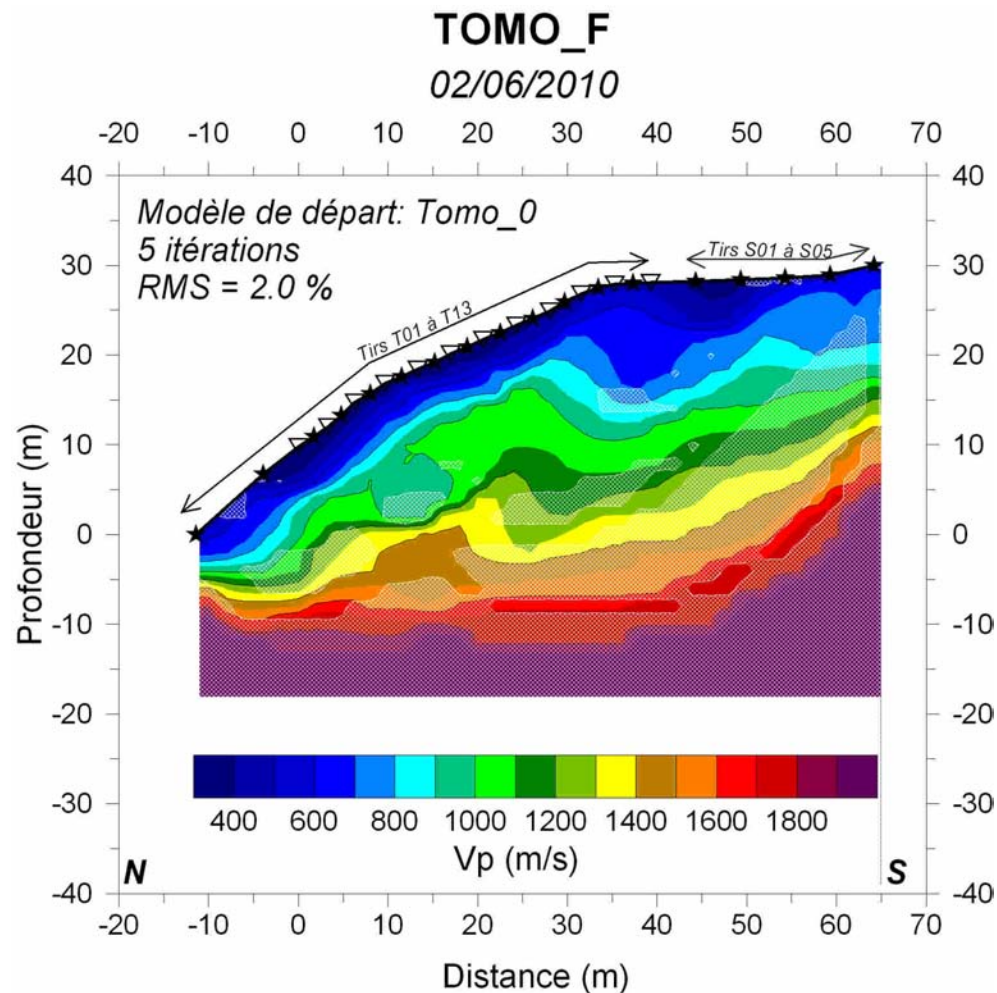
✓ Vitesses augmentent de manière progressive en profondeur ($V_p = 1500$ m/s vers 25 à 30 m de profondeur)

➤ 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



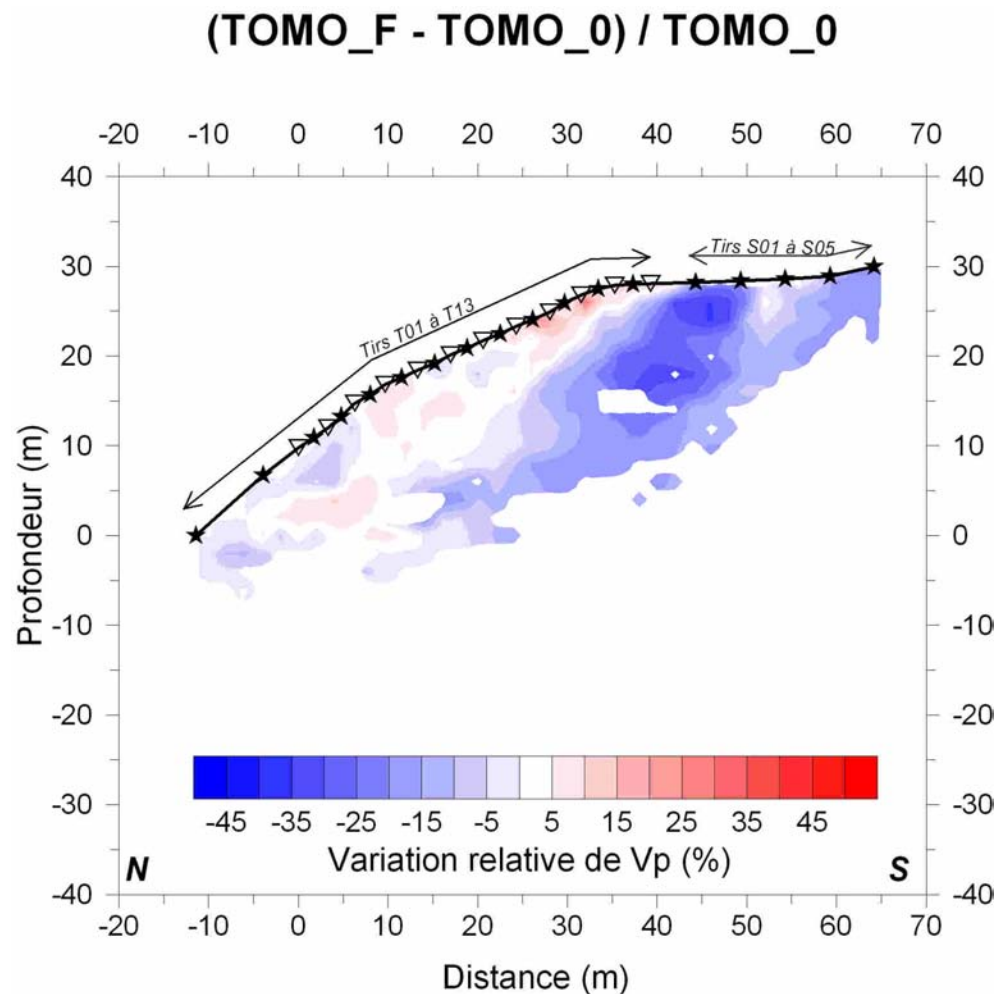
b. Variation relative de vitesses

✓ 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

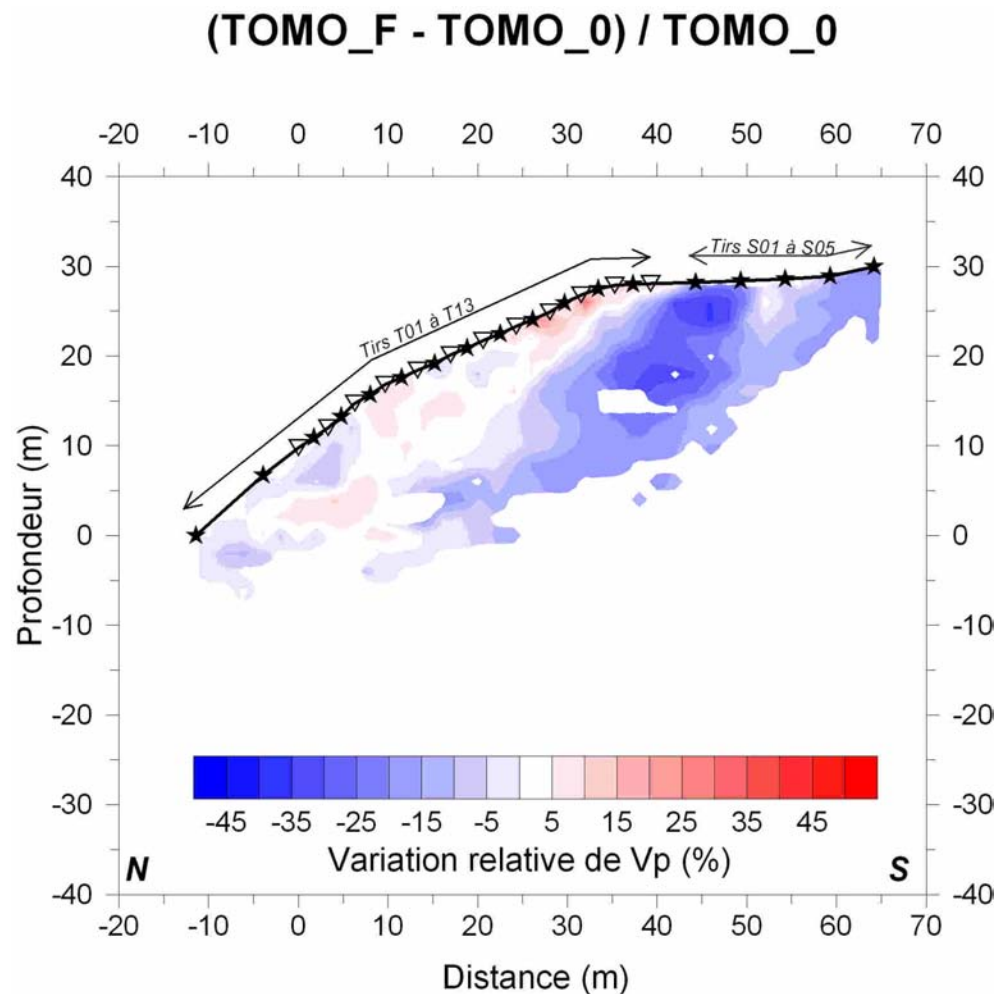
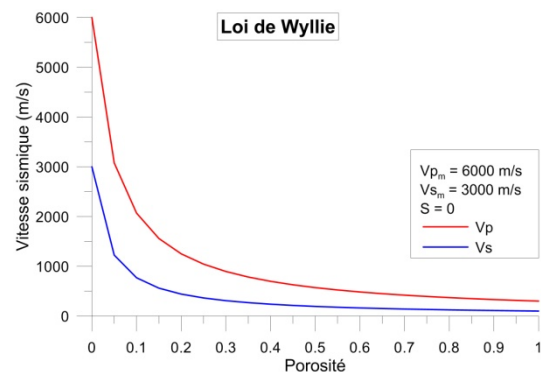


b. Variation relative de vitesses

✓ 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

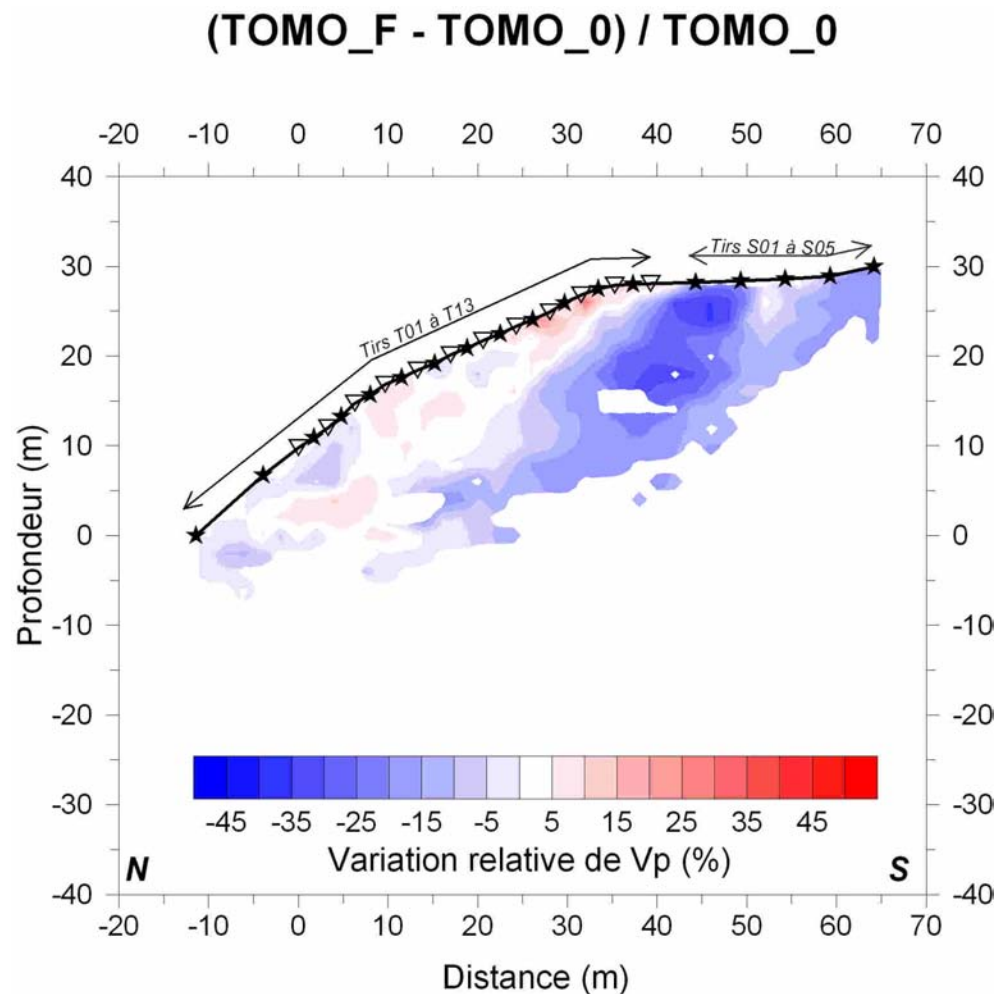
✓ Diminution relative des vitesses sismiques significative (- 30 %) dans la zone amont sur une dizaine de mètres d'épaisseur

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



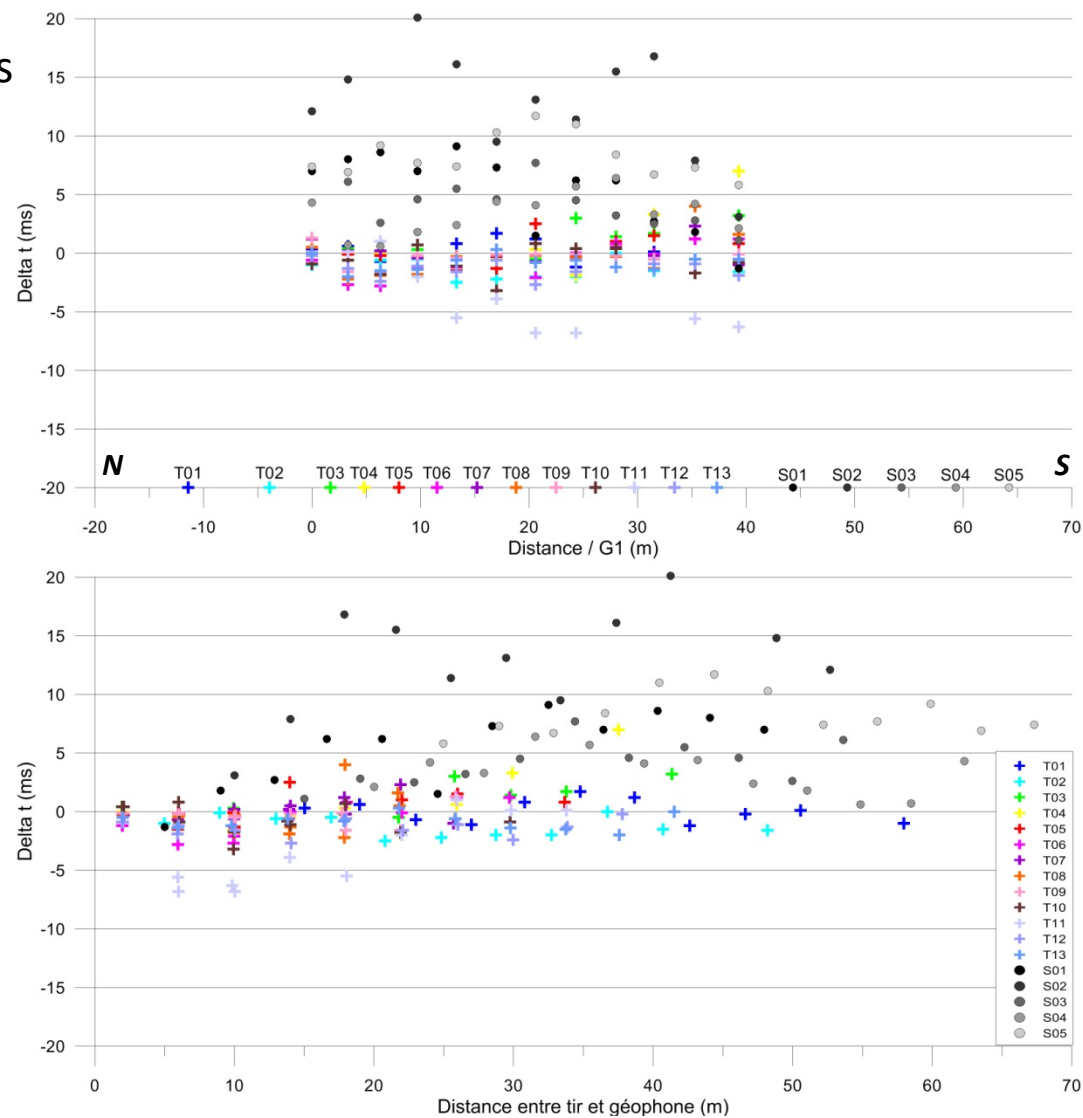
b. Variation relative de vitesses

- ✓ 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

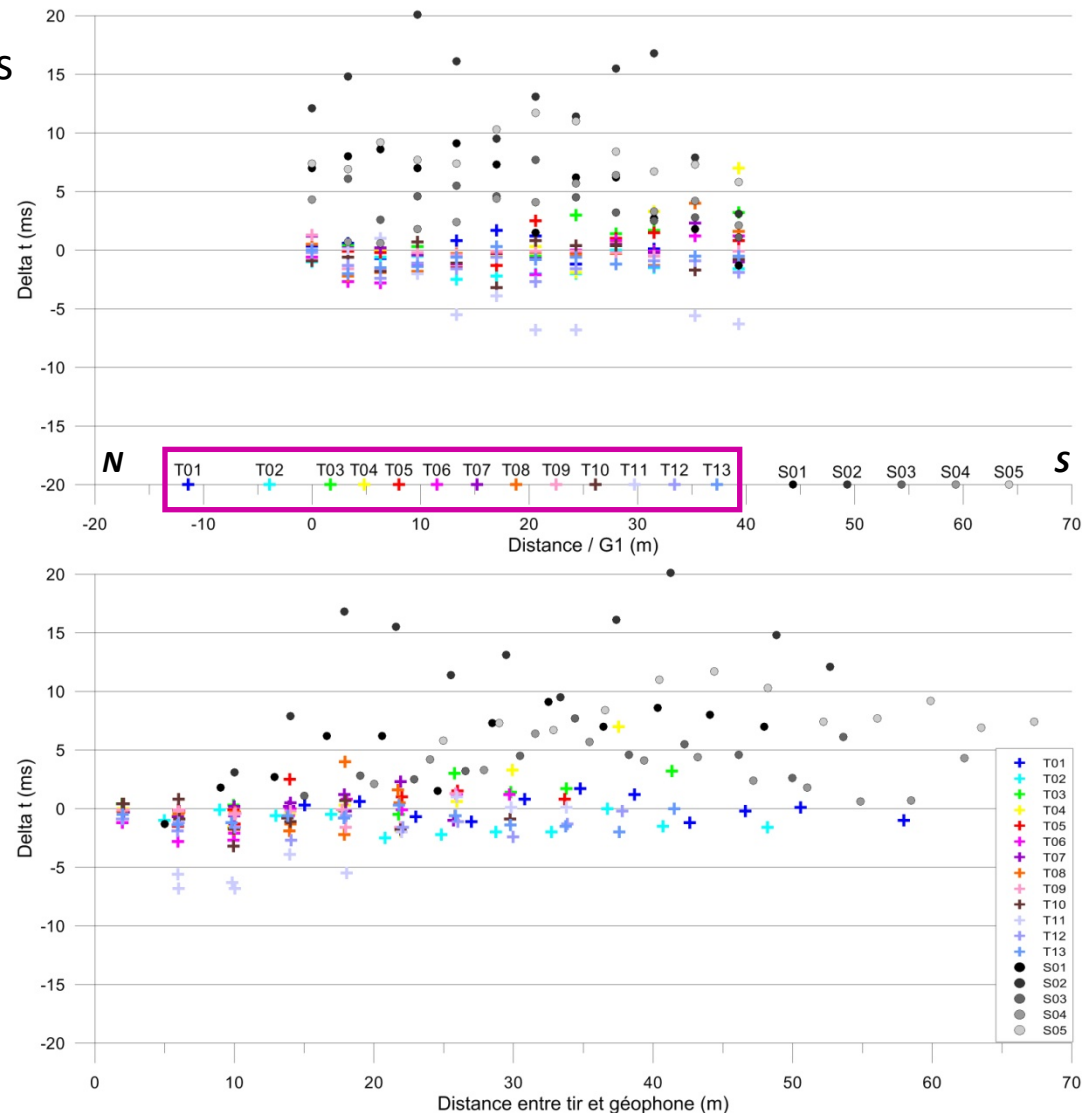
✓ Différence absolue des temps d'arrivées entre les acquisitions 10 et 1



c. Discussion sur les résultats

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

➤ Tirs T01 à T13

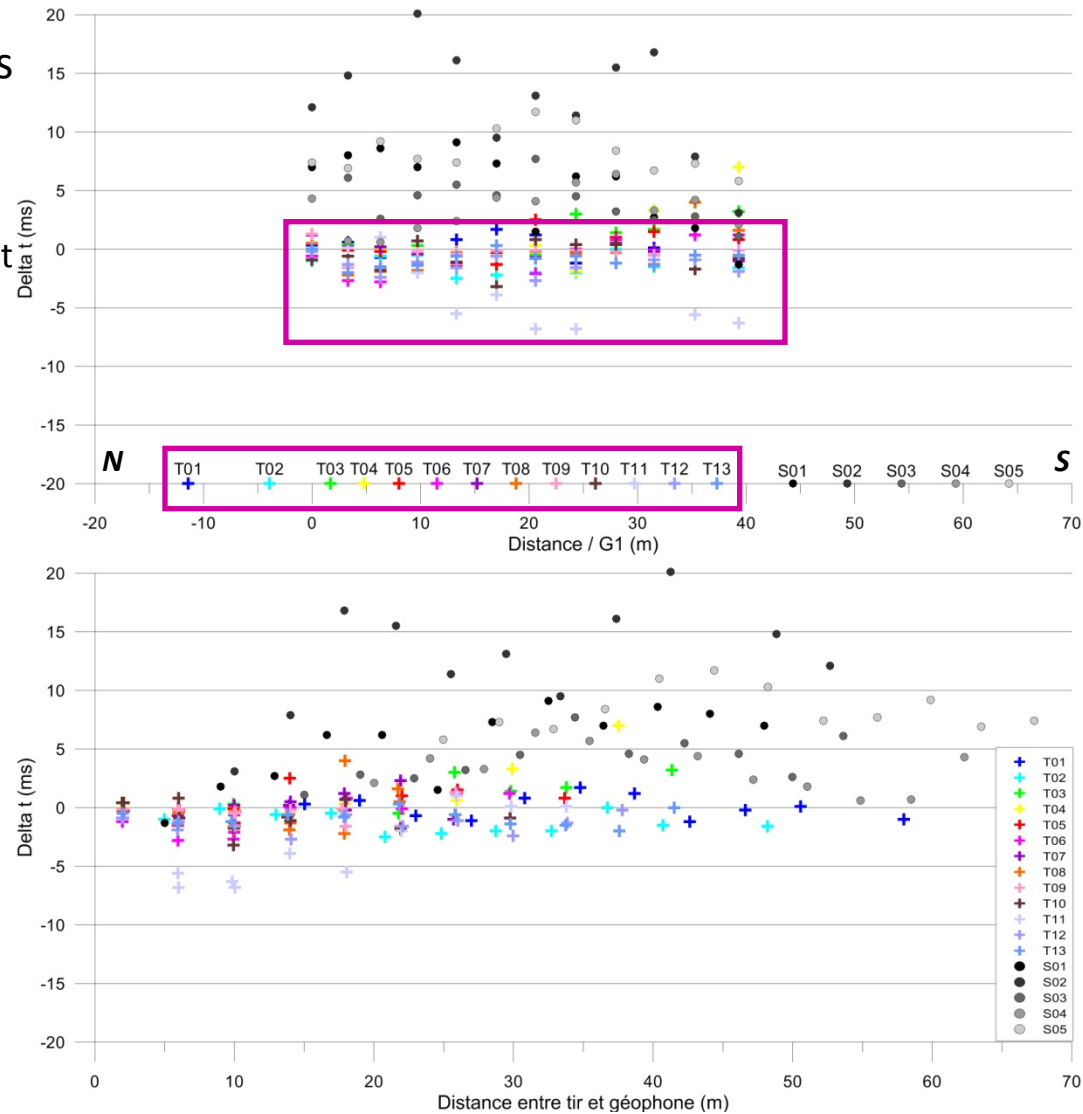


c. Discussion sur les résultats

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

➤ Tirs T01 à T13

▪ différences faibles et globalement négatives

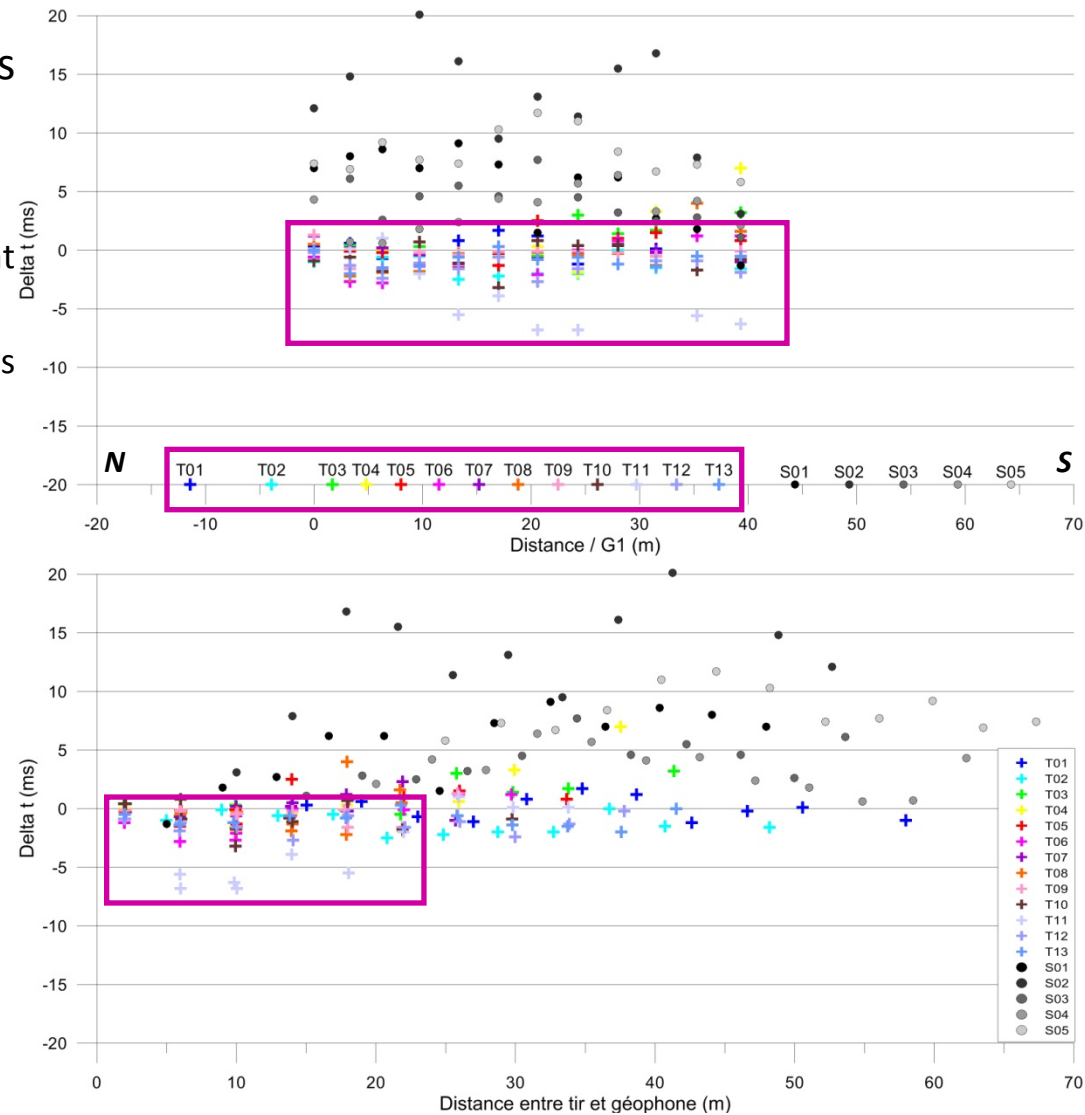


c. Discussion sur les résultats

✓ 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



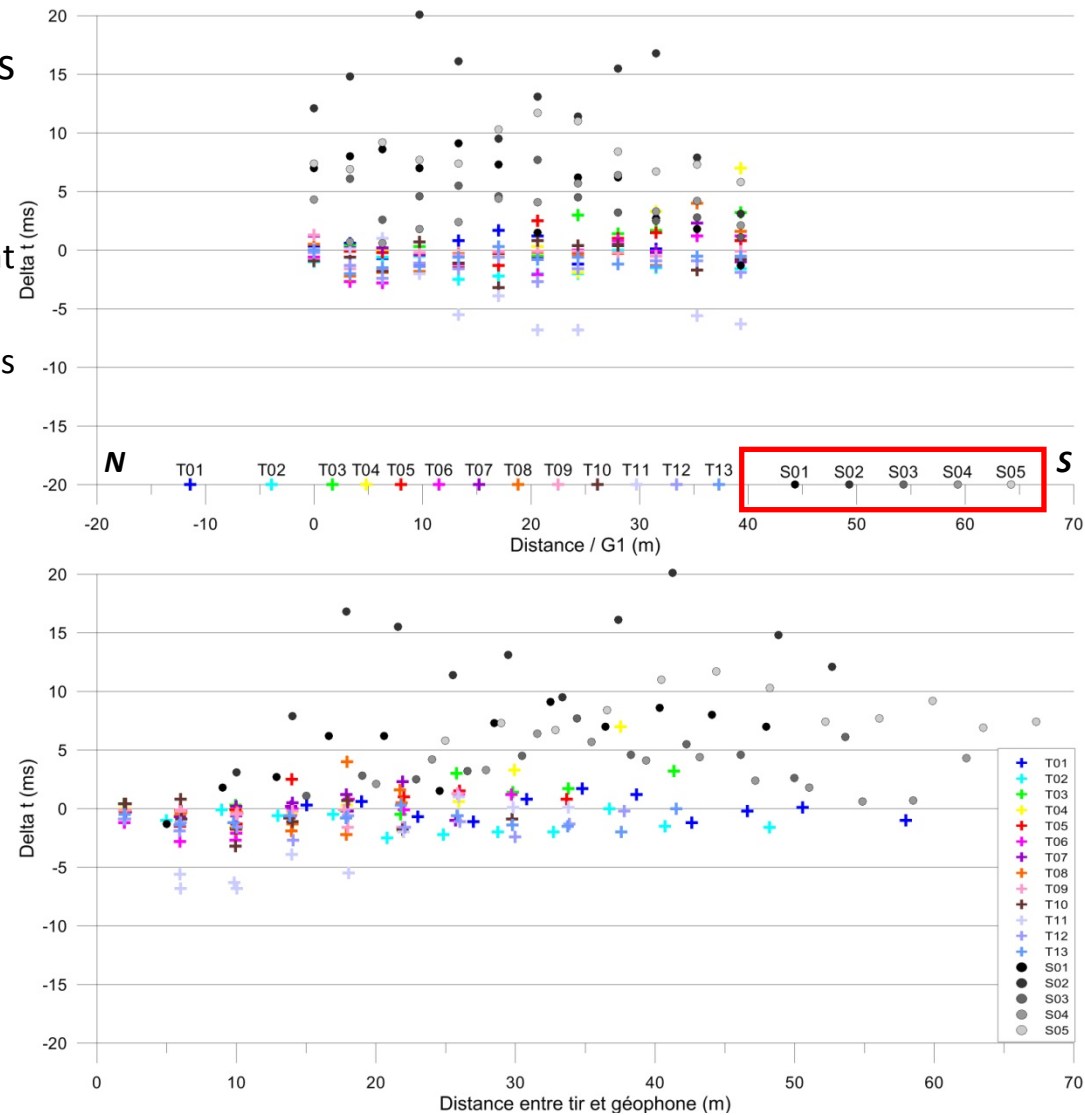
c. Discussion sur les résultats

✓ 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

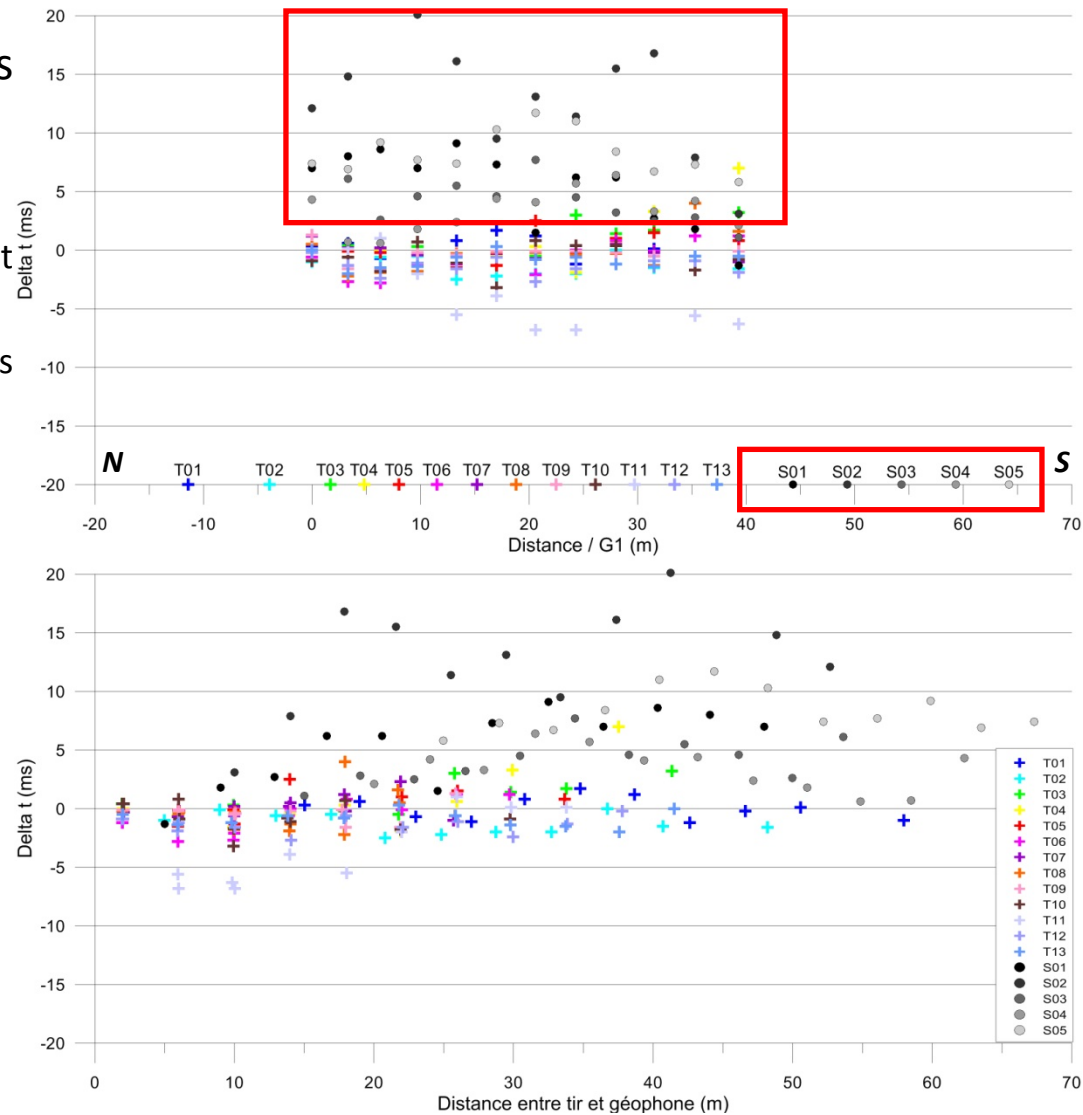
✓ Différence absolue des temps d'arrivées entre les acquisitions 10 et 1

➤ 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

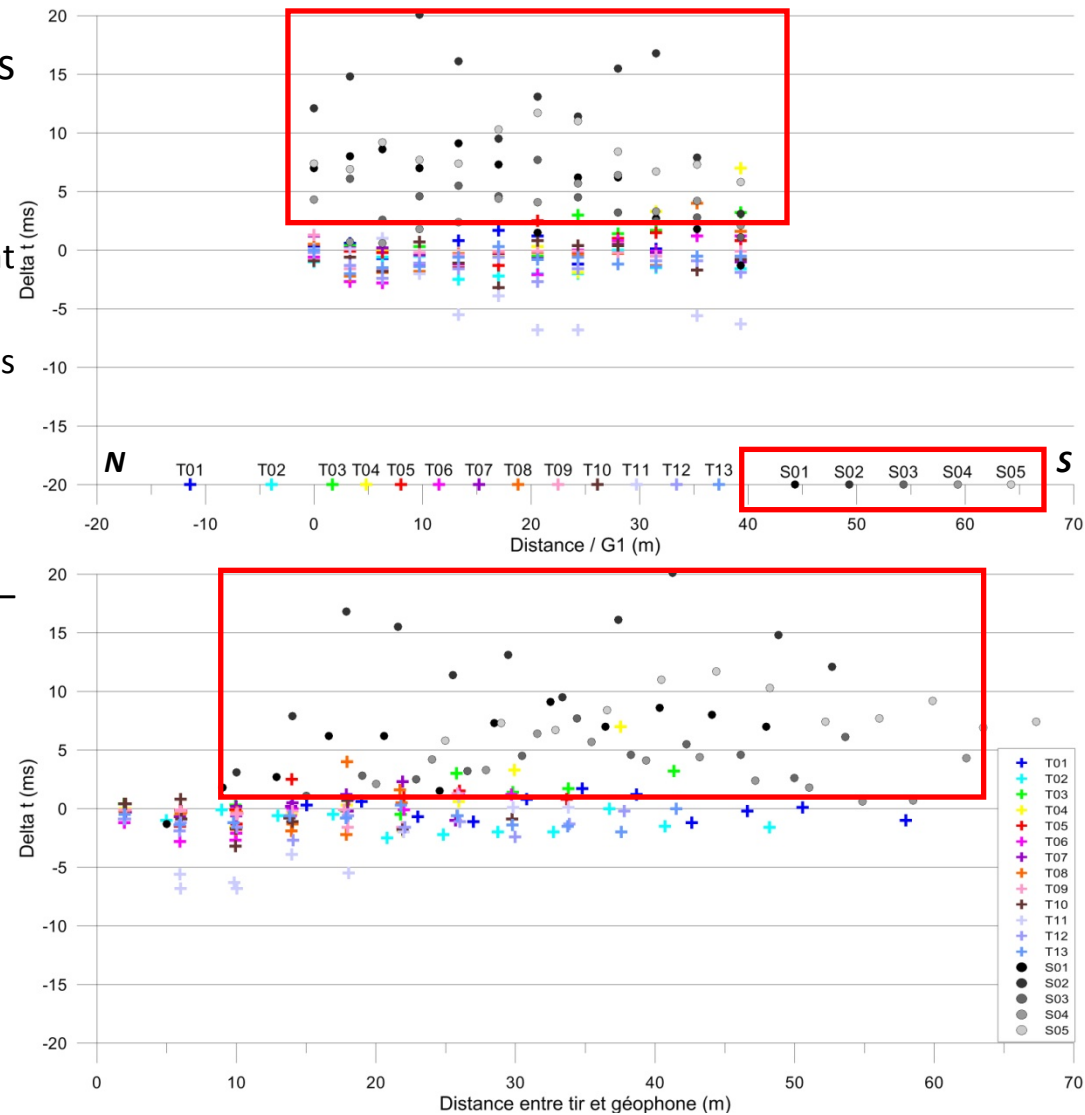
✓ Différence absolue des temps d'arrivées entre les acquisitions 10 et 1

➤ 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

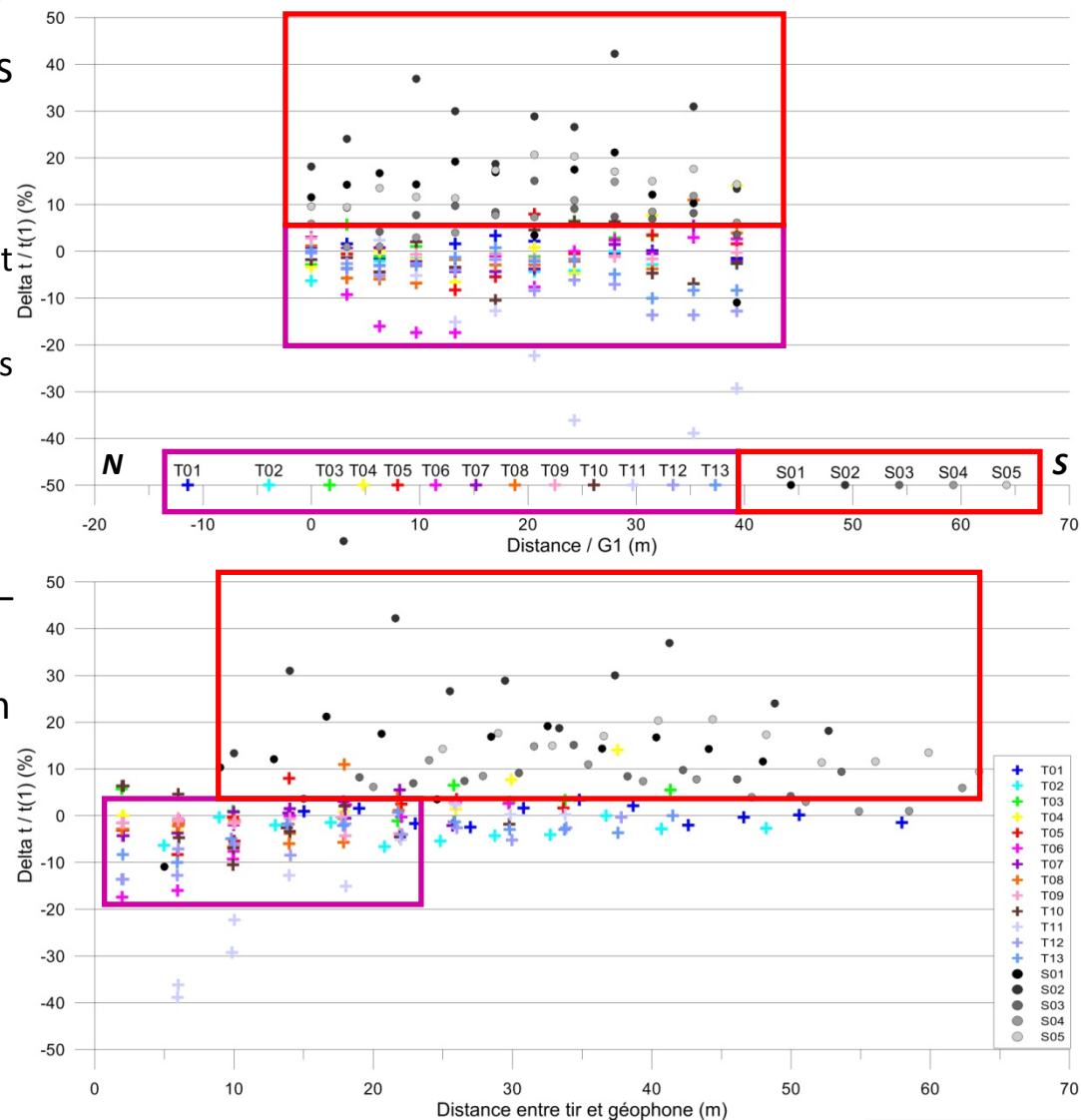
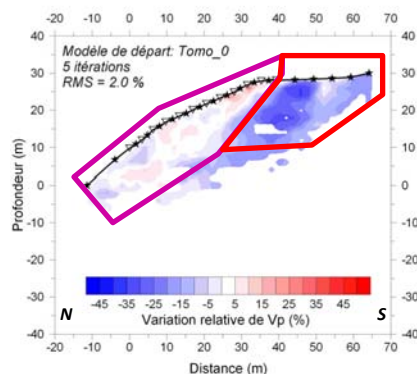
➤ Tirs T01 à T13

- 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

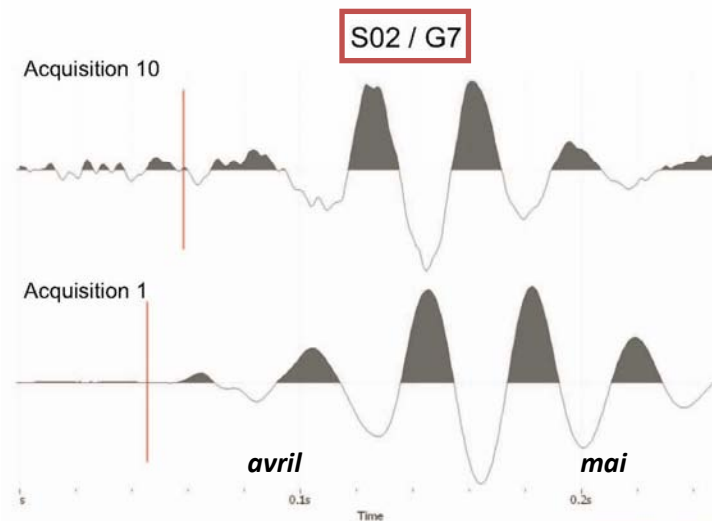
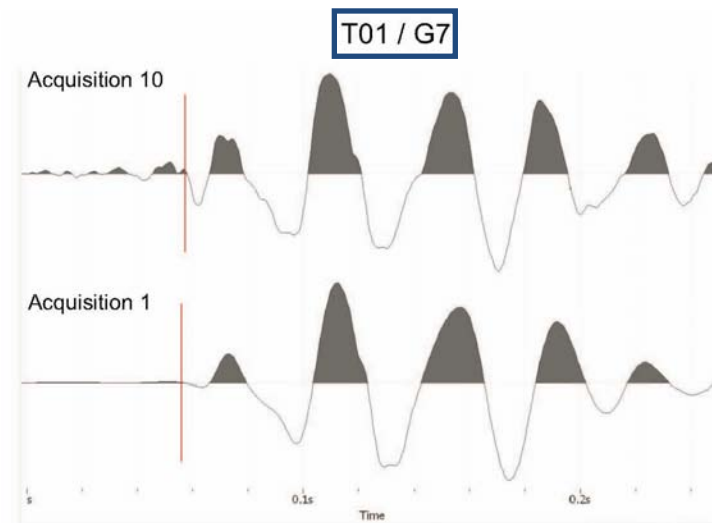
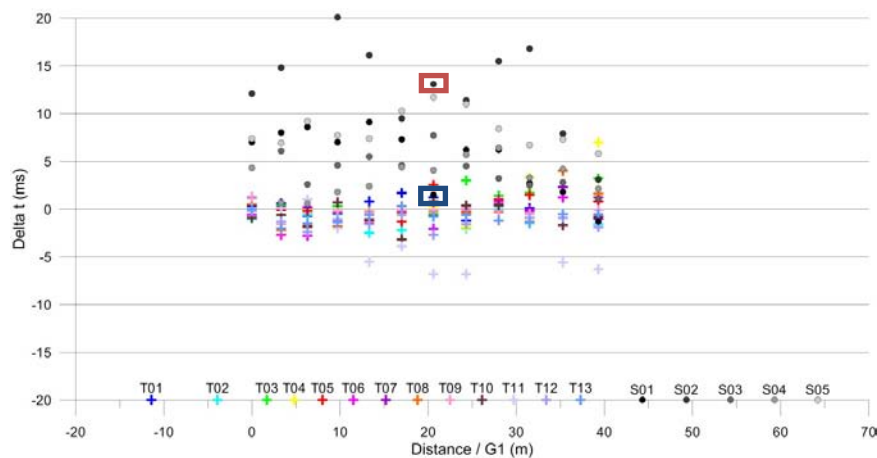
⇒ Explique bien les résultats de l'inversion



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)

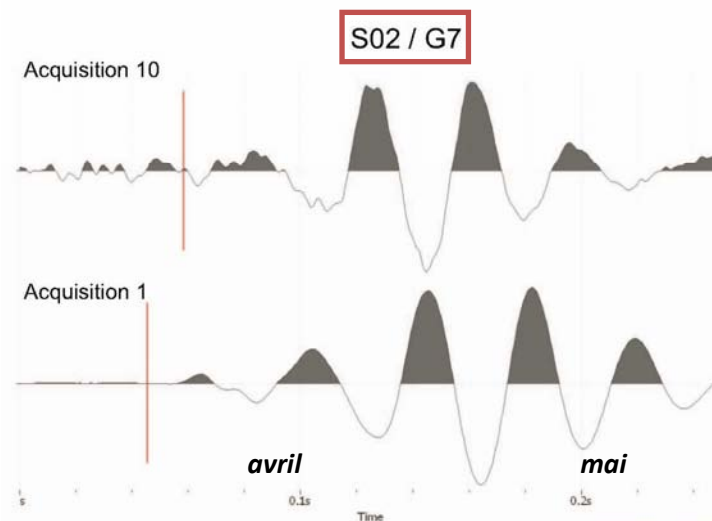
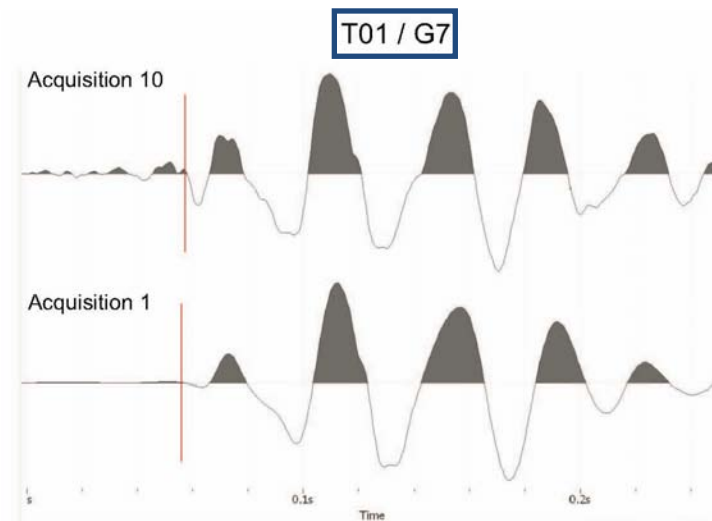
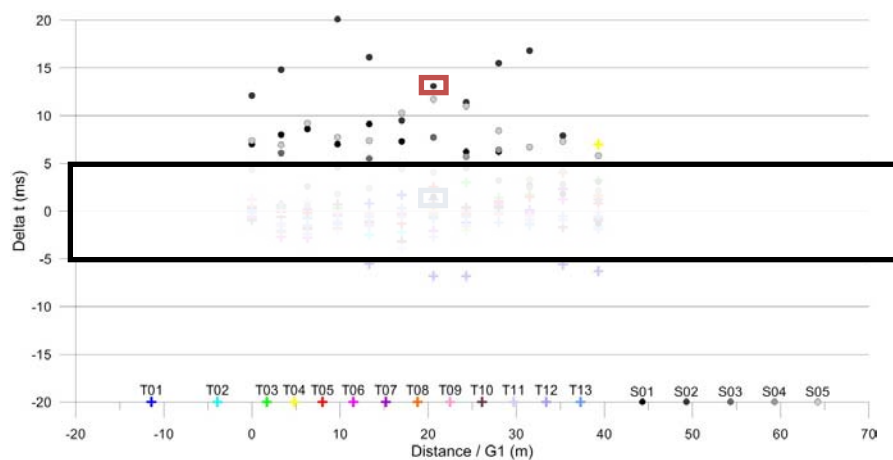


c. Discussion des résultats

✓ 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)



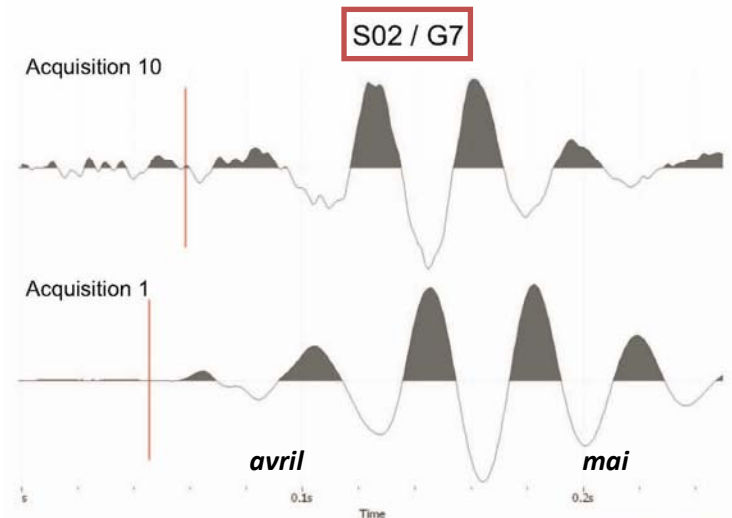
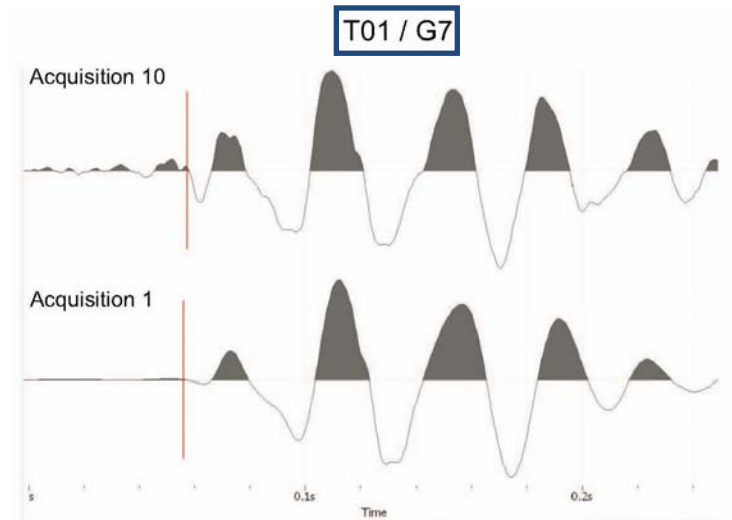
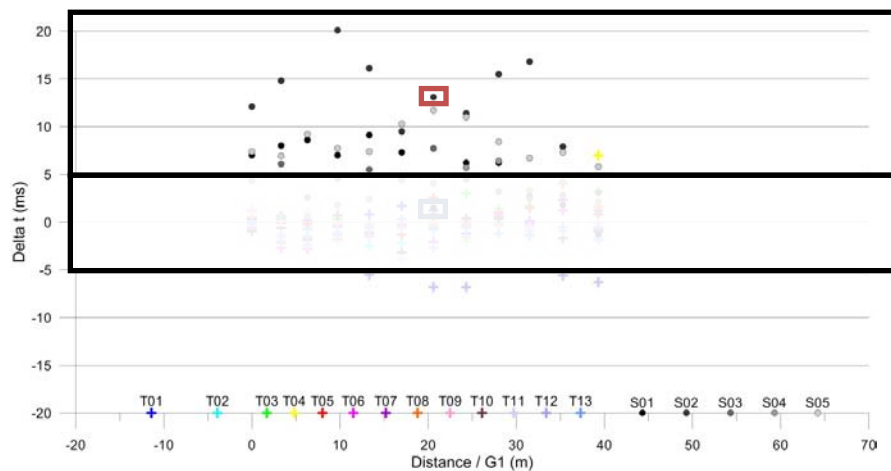
c. Discussion des résultats

✓ 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

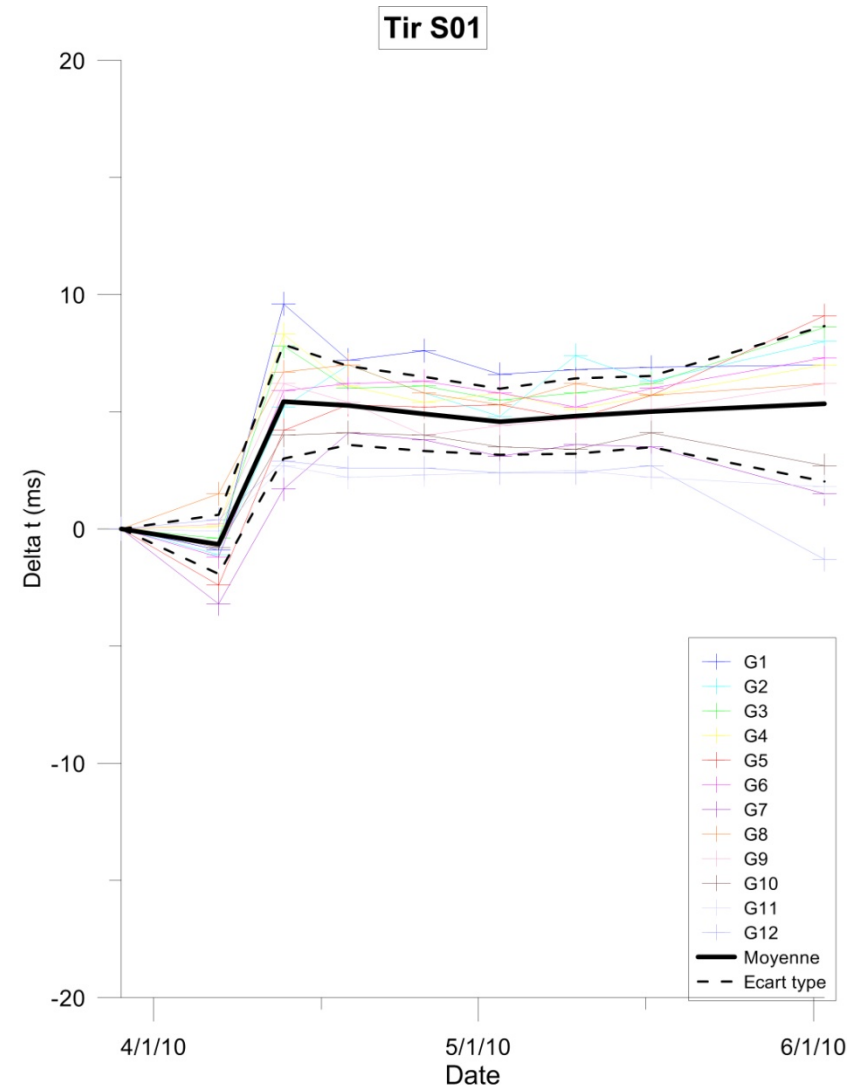
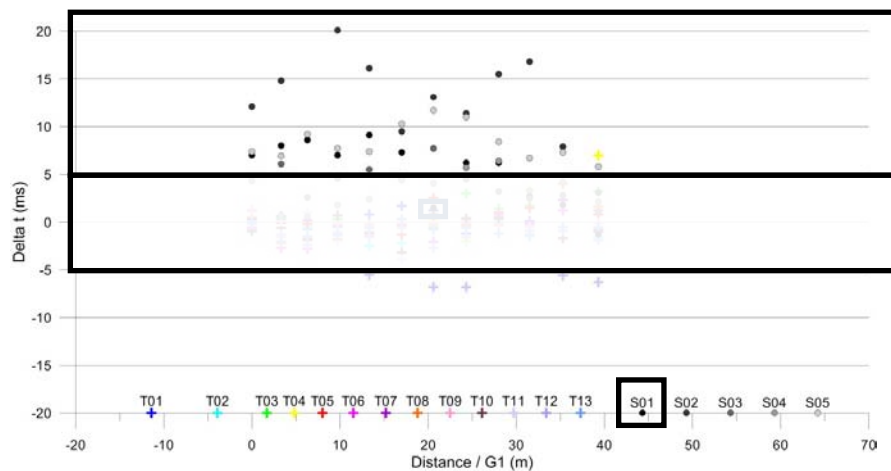
✓ Visualisation de l'incertitude sur les pointés et réalité de l'augmentation des temps pour les tirs S01 à S05

➤ 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

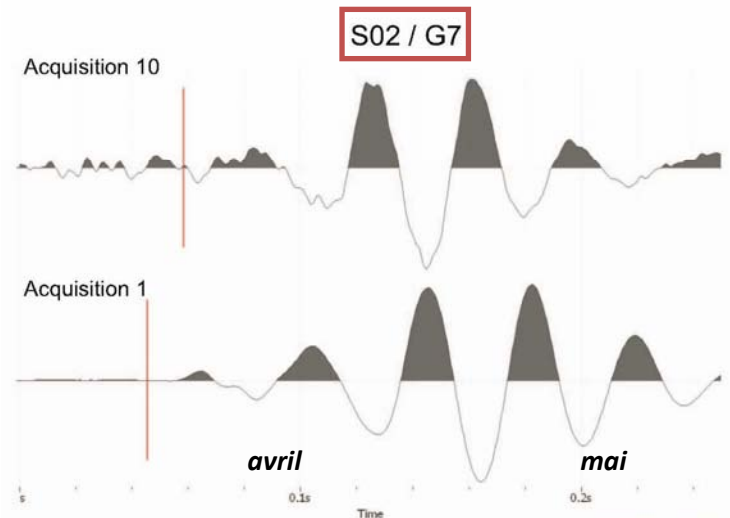
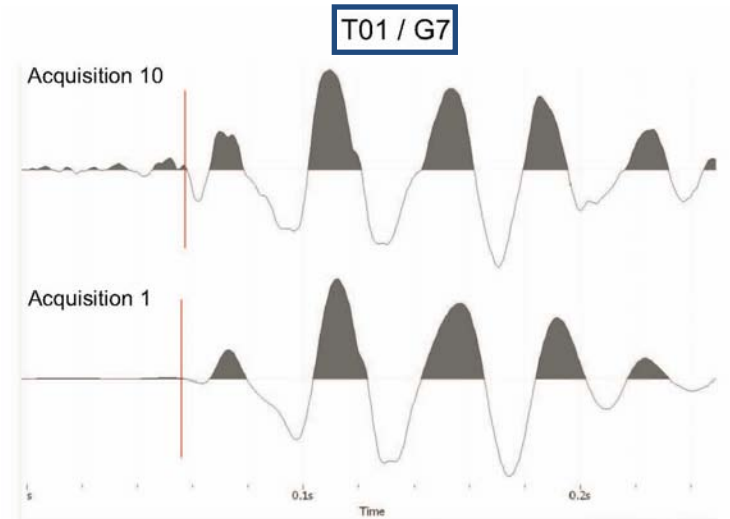
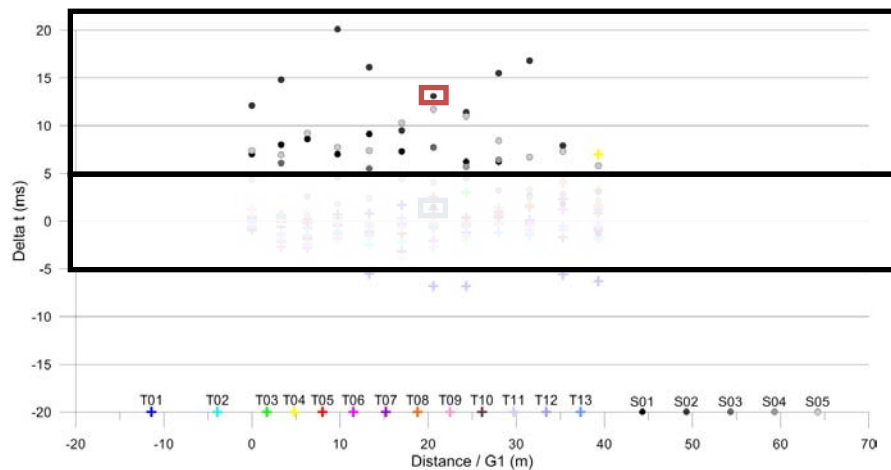
➤ Acquisition 10 bruitée (vent)

↪ 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

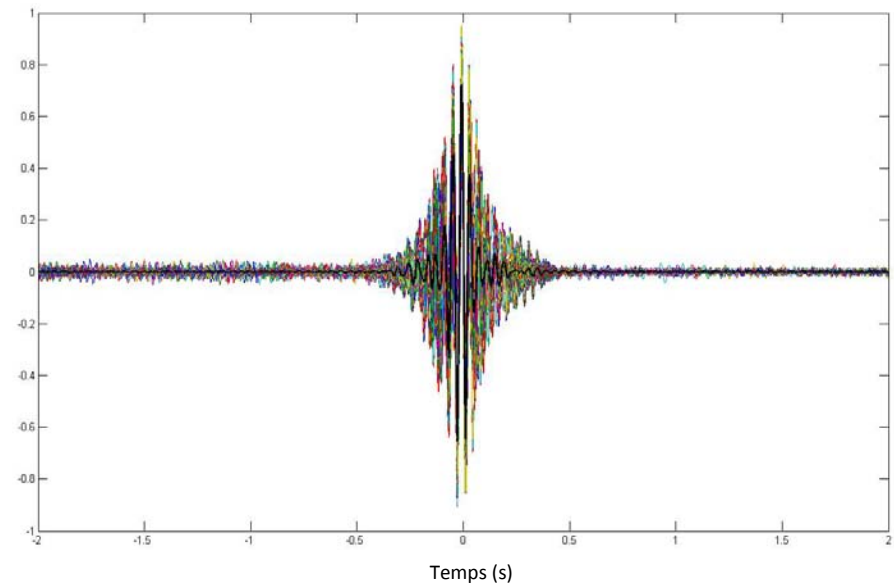
Conclusions - Perspectives

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)

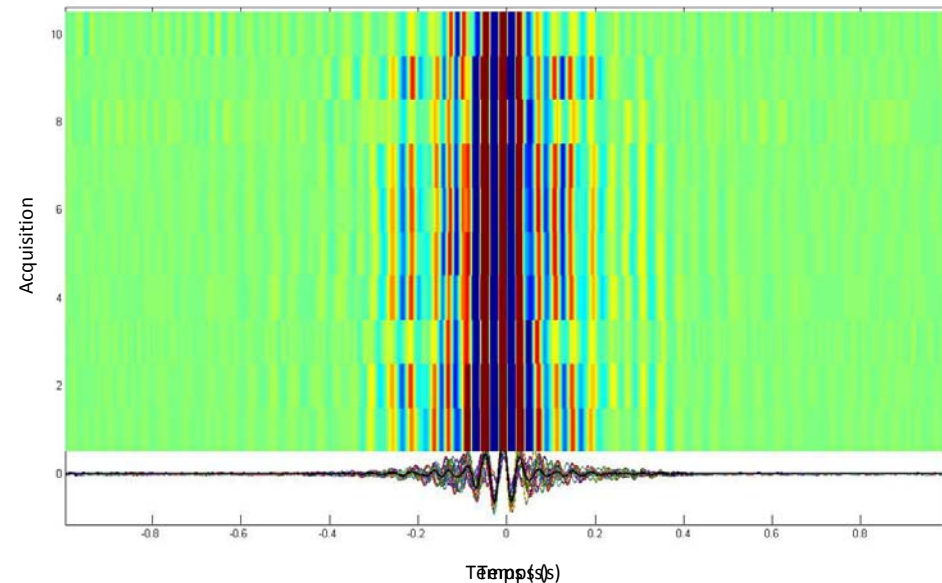


a. Principe

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

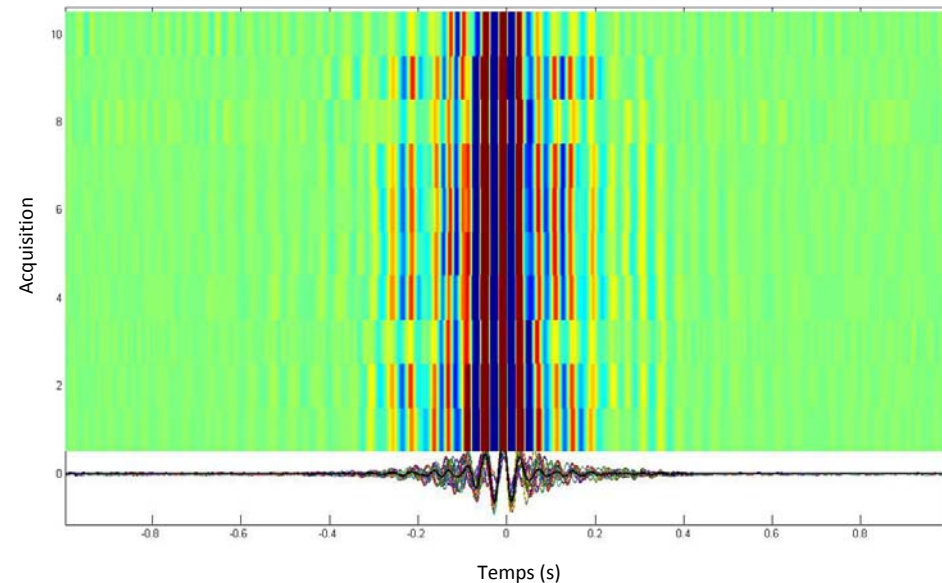
Deux étapes :

✓ 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 :

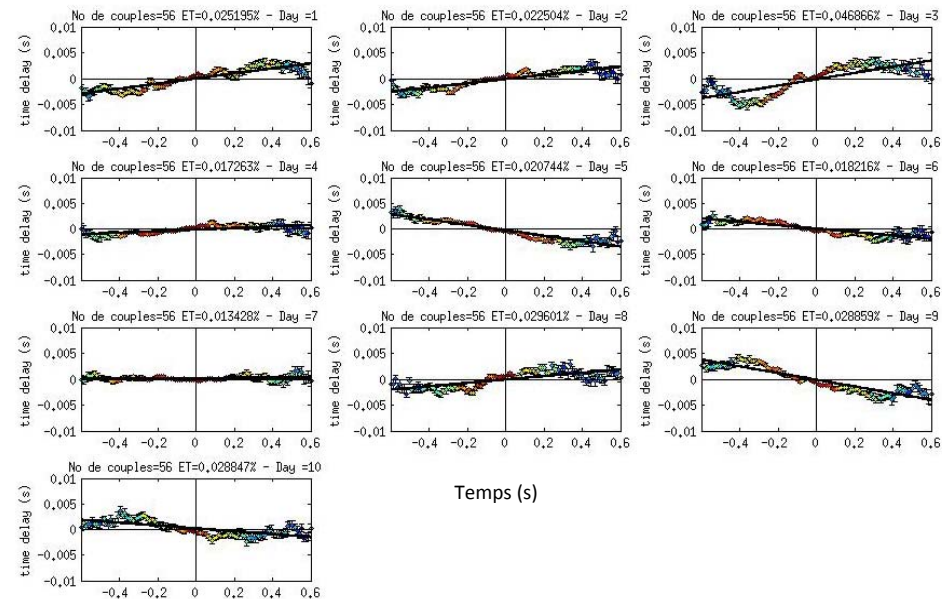
✓ Première étape: construction des fonctions de corrélation moyennes pour chaque acquisition (10*10 tirs par acquisition) entre tous les capteurs (fonction de Green)

➤ 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)



Temps (s)

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)

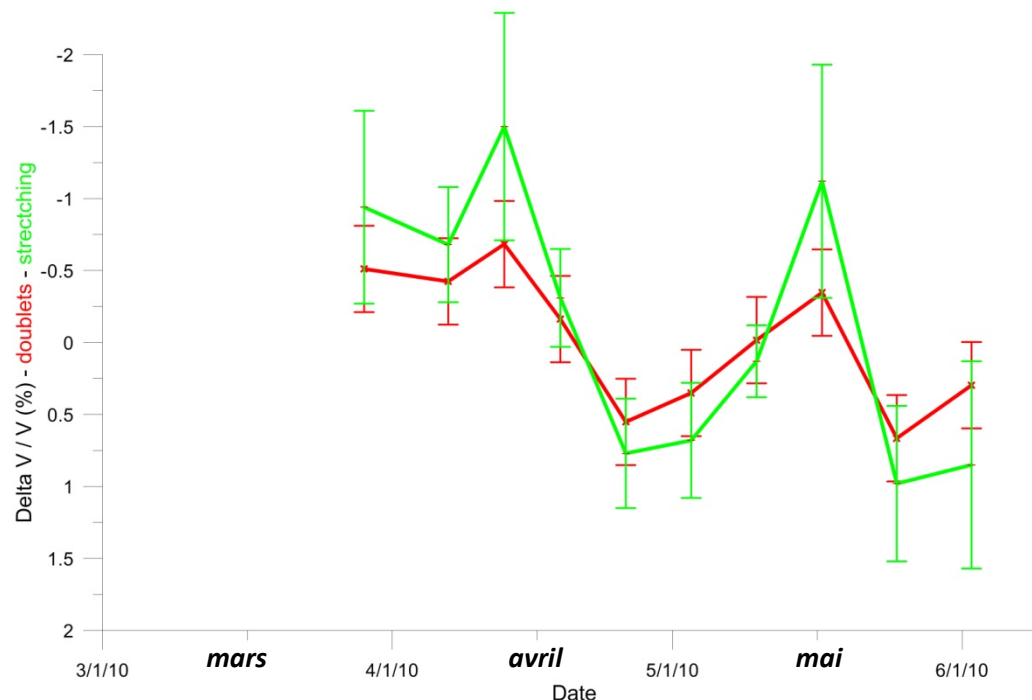
➤ méthode des doublets (entre 20 et 50 Hz)

➤ 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

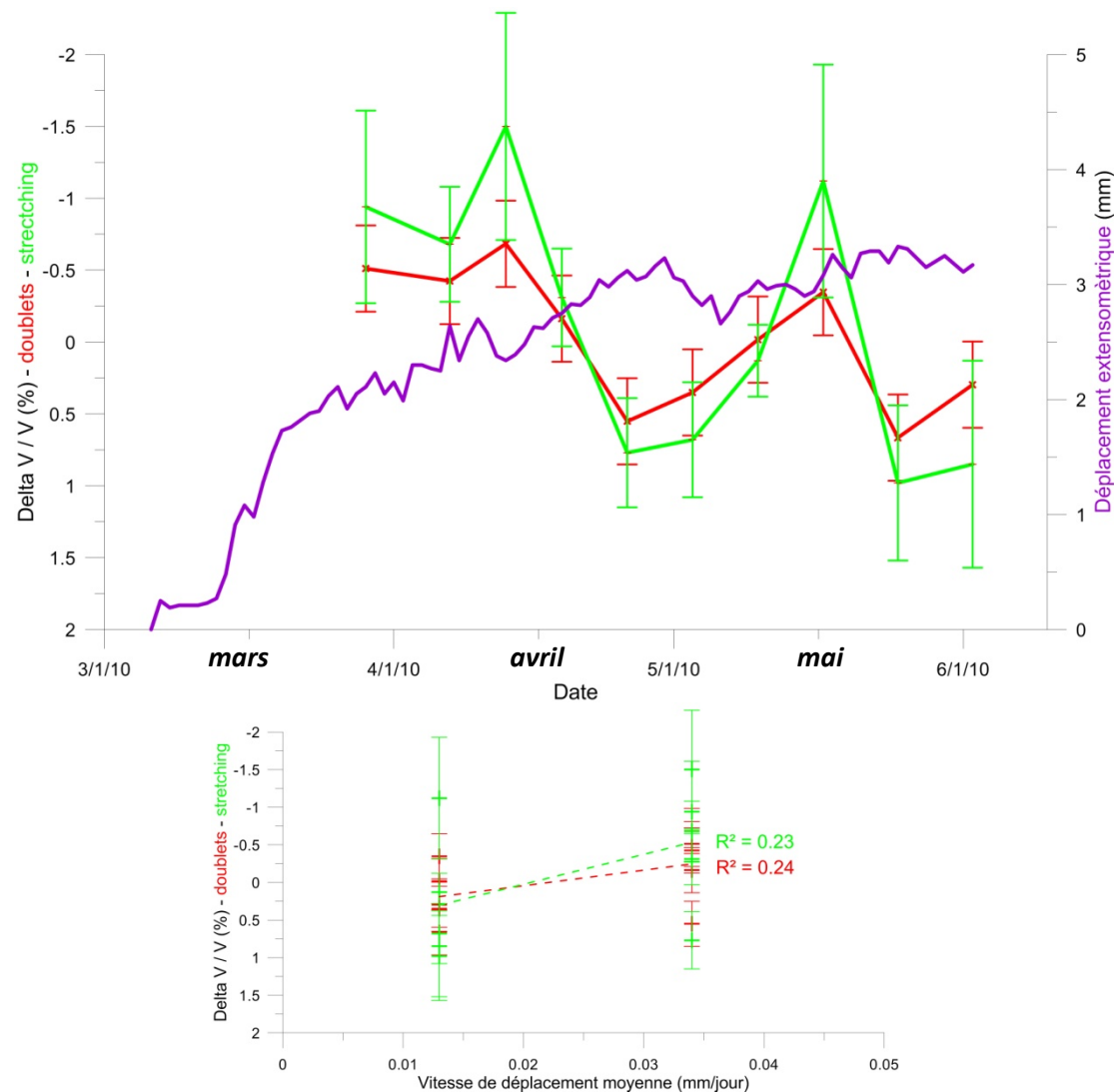
↪ corrélation avec déformation



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

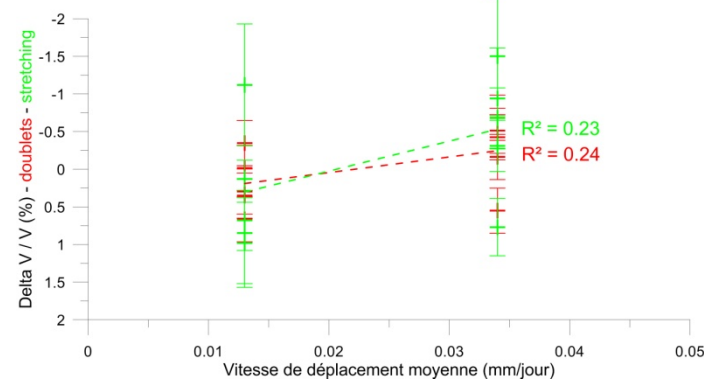
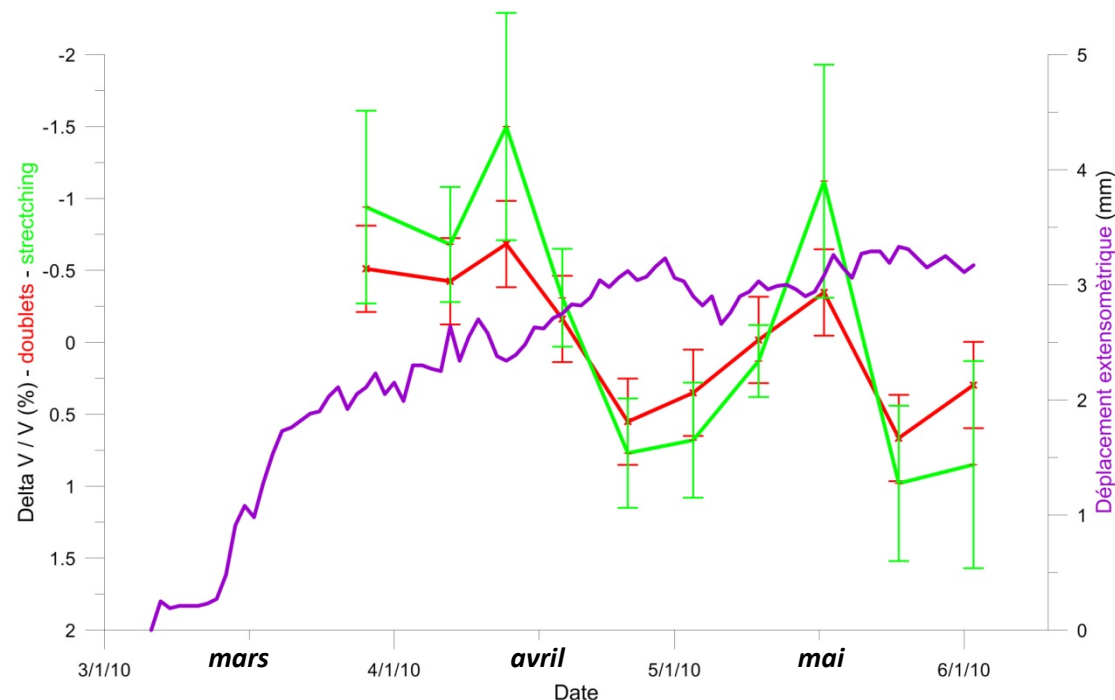
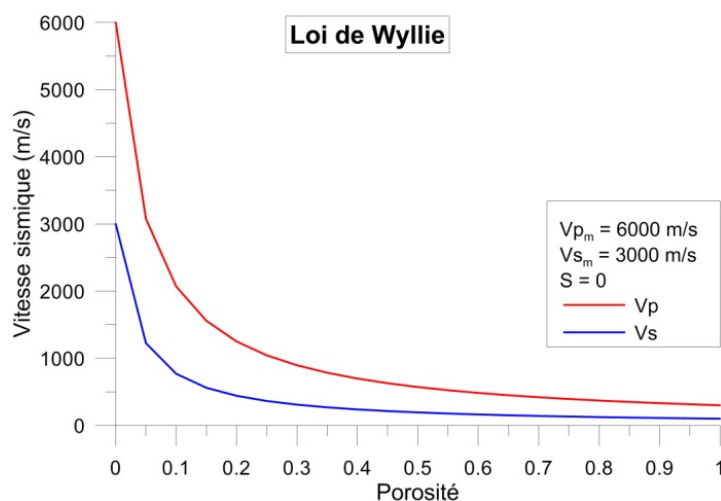


b. Résultats et interprétation

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

⇒ corrélation avec déformation

⇒ Non

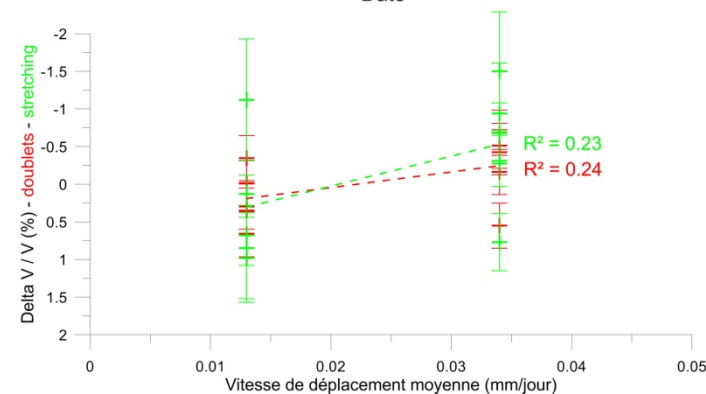
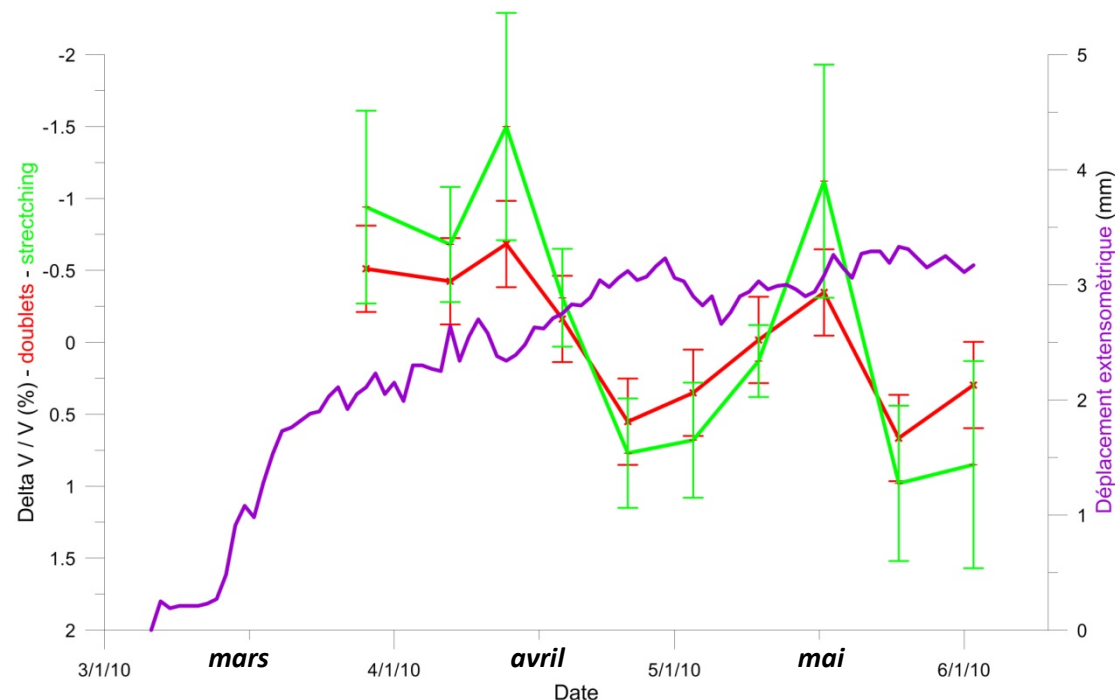
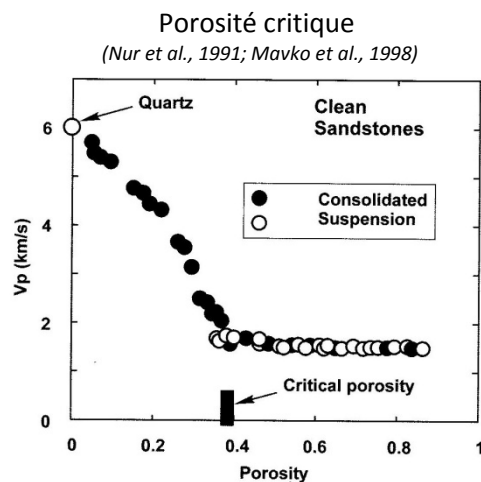


b. Résultats et interprétation

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

⇒ corrélation avec déformation

⇒ Non



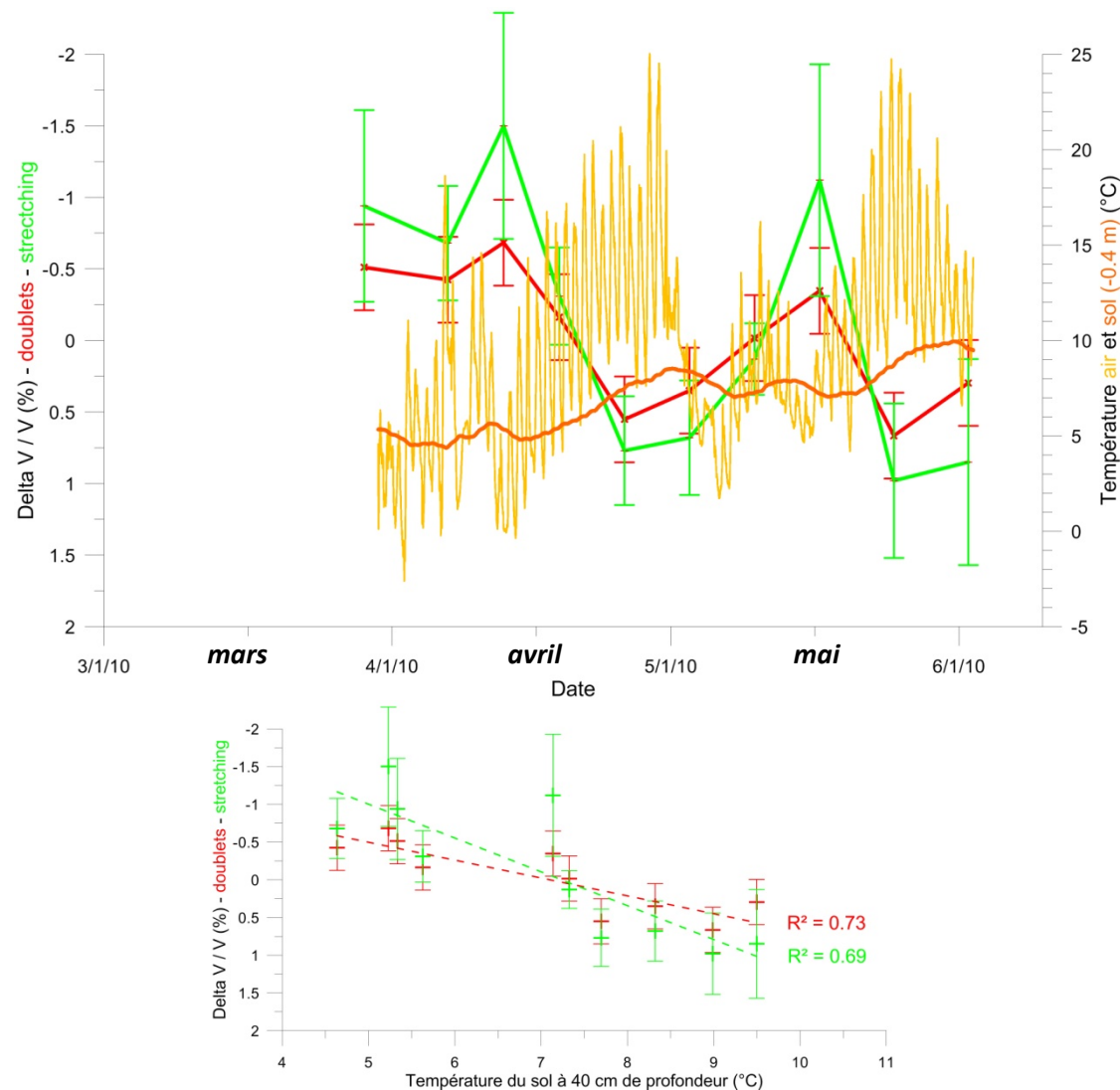
b. Résultats et interprétation

⇒ 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

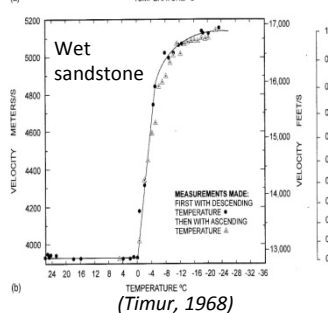
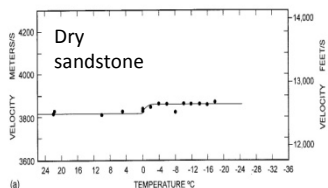
⇒ Estimer la différence de temps relative, inversement reliée aux variations de vitesse dans le milieu sur quelques mètres d'épaisseurs

⇒ corrélation avec déformation

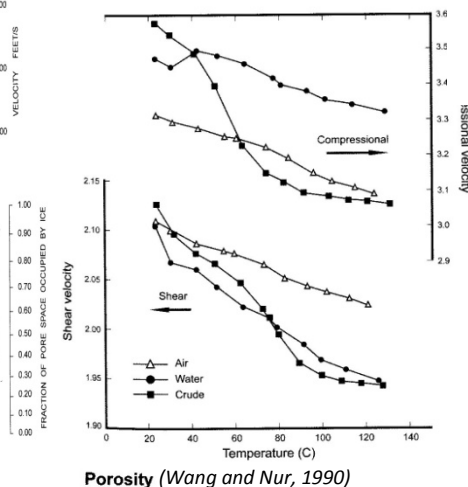
⇒ Non

⇒ corrélation avec température

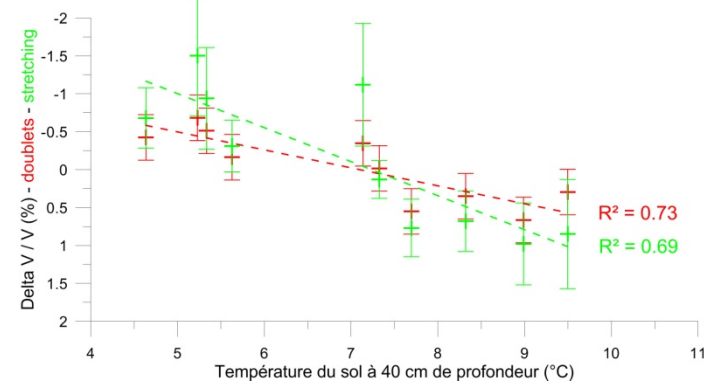
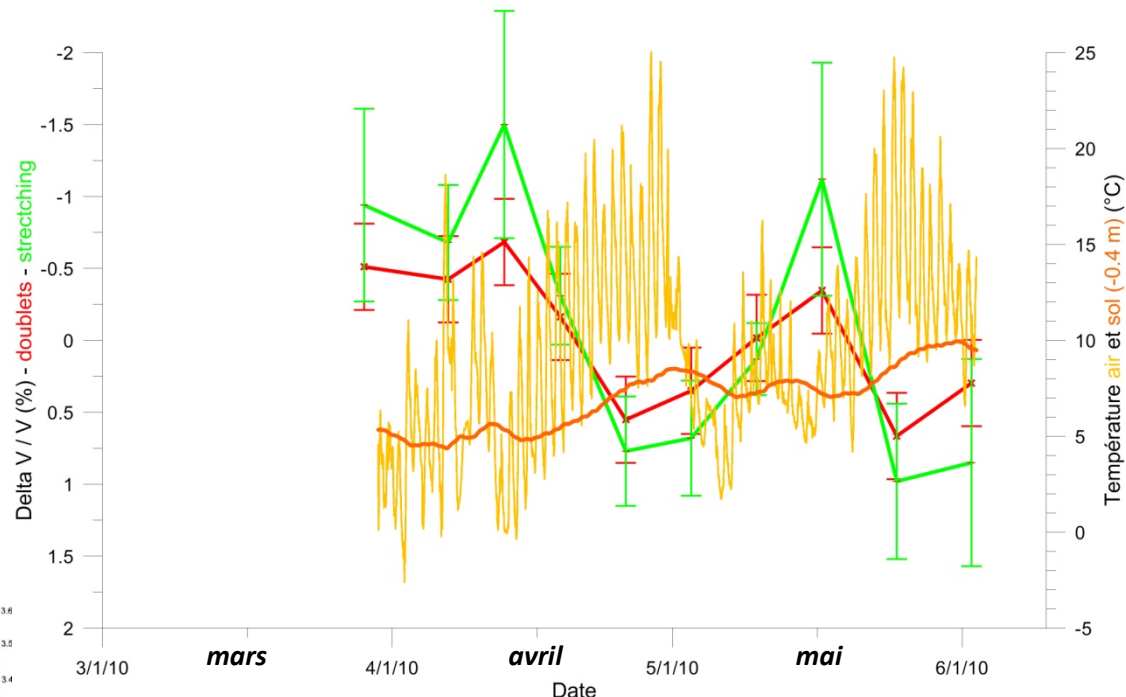
⇒ ↗ température ⇒ ↗ vitesse ?



(Timur, 1968)



Porosity (Wang and Nur, 1990)



b. Résultats et interprétation

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

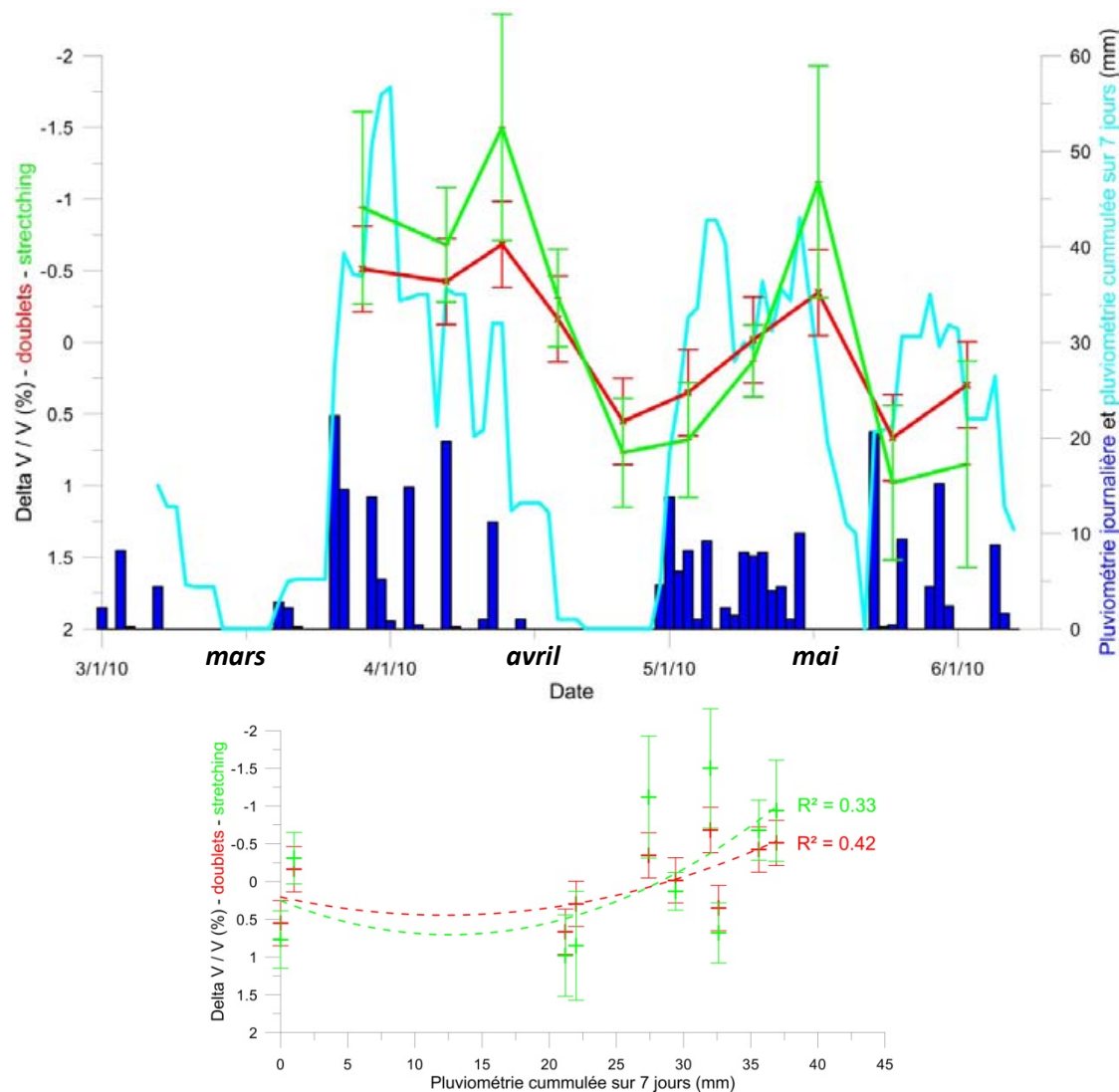
⇒ corrélation avec déformation

⇒ 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

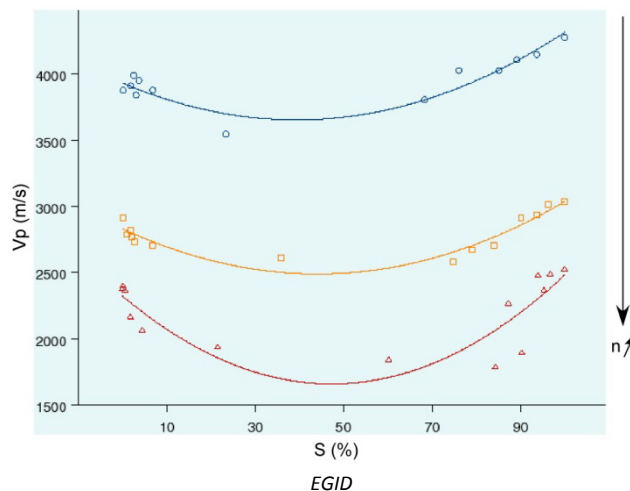
⇒ Non

⇒ corrélation avec température

⇒ ↗ température ⇒ ↗ vitesse ?

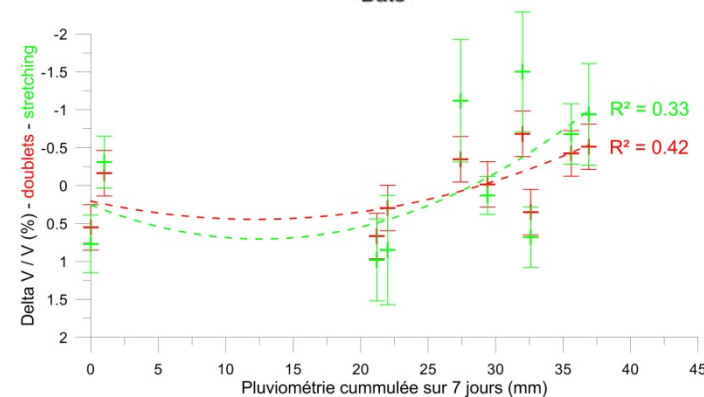
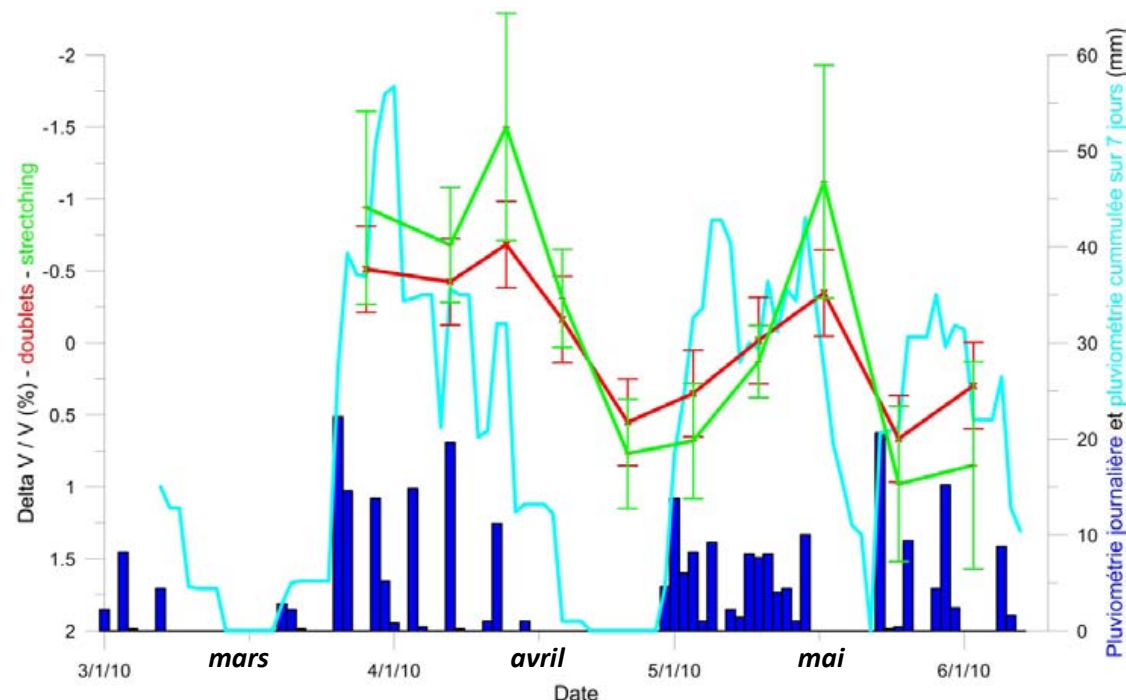
⇒ corrélation avec pluviométrie

⇒ ↗ pluviométrie ⇒ ↘ vitesse



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

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



Introduction

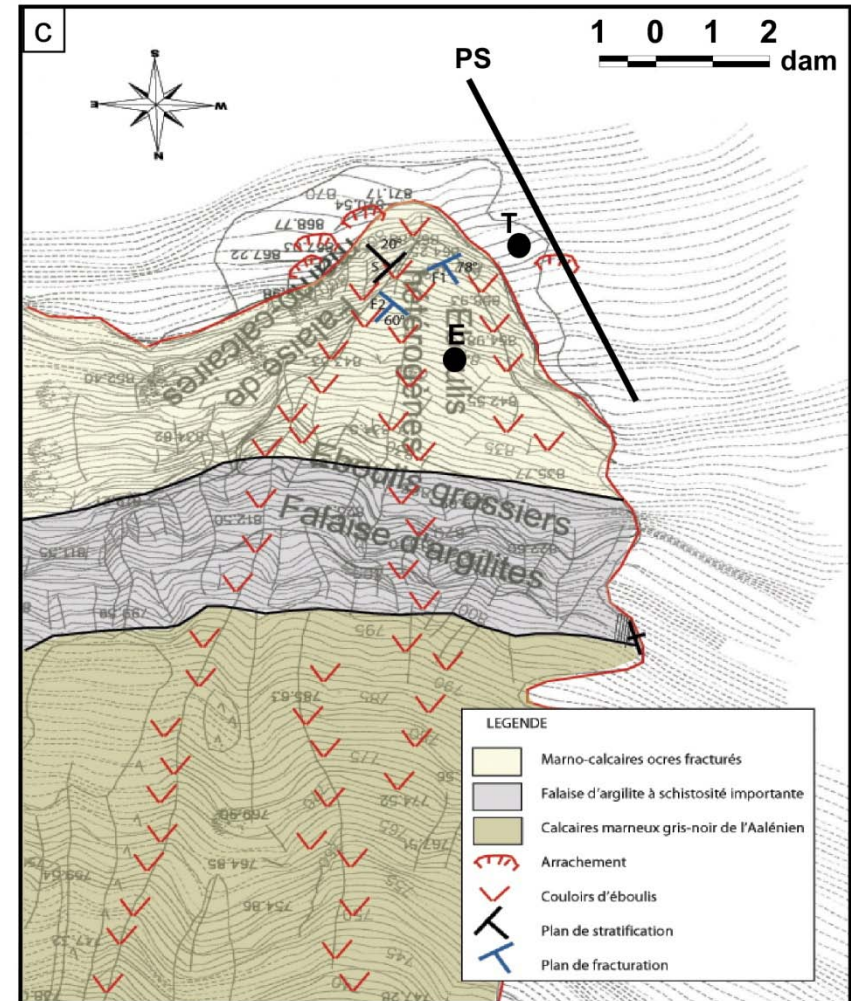
1. Données climatiques et de déformation
2. Sismique active
3. Sismique semi-active

Conclusions – Perspectives

- a. Conclusions
- b. Perspectives

- ✓ Tomographies sismiques

- ✓ Expériences de sismique semi-active



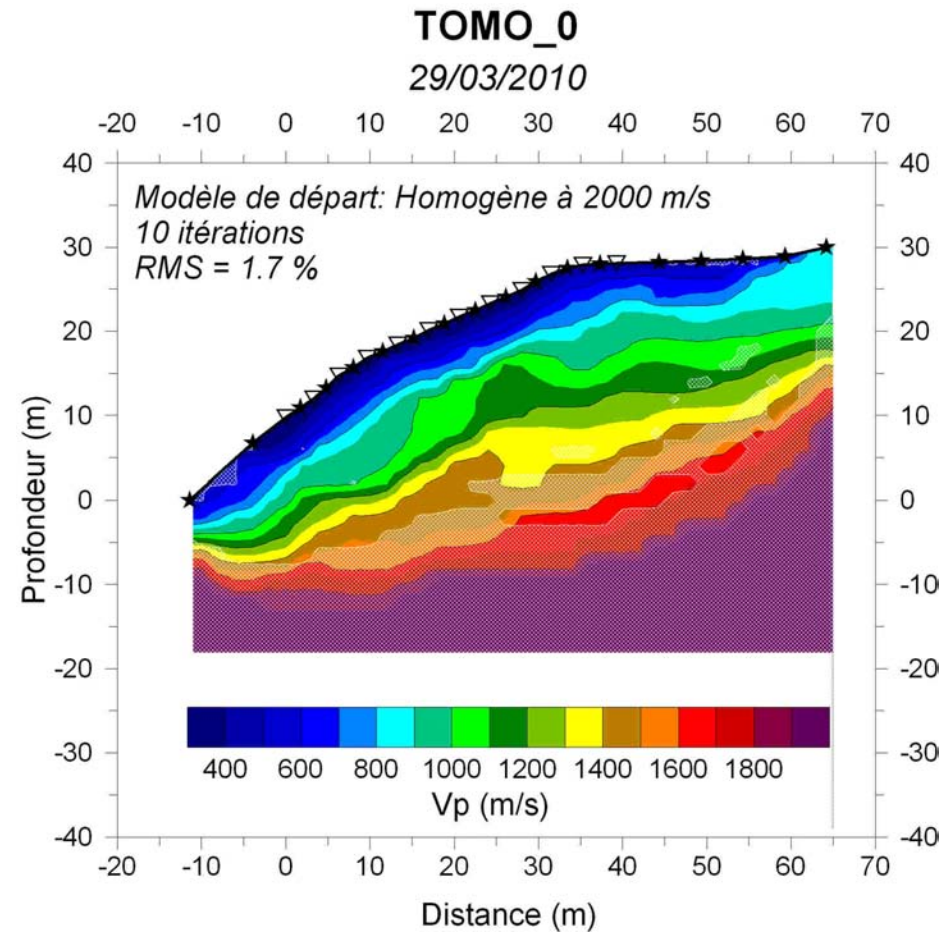
a. Conclusions

✓ Tomographies sismiques

➤ Caractérisation du milieu : V_p très faible

⇒ milieu très fracturé et décomprimé

✓ Expériences de sismique semi-active

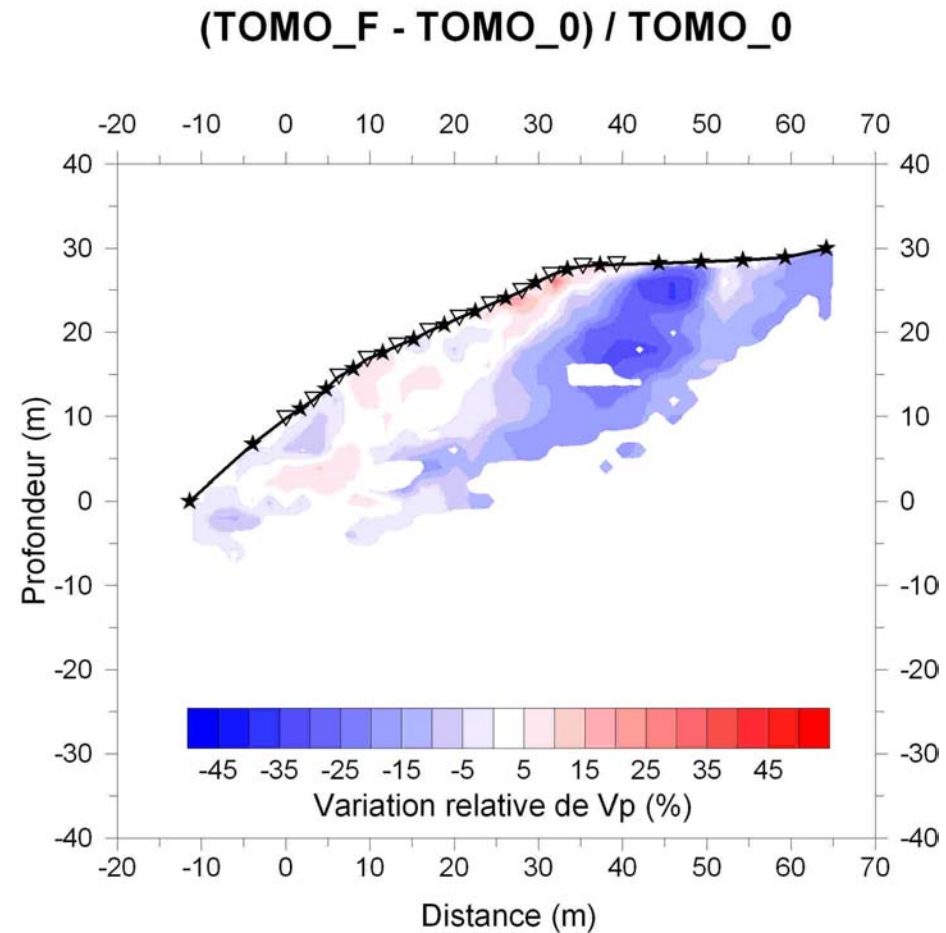


a. Conclusions

✓ 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



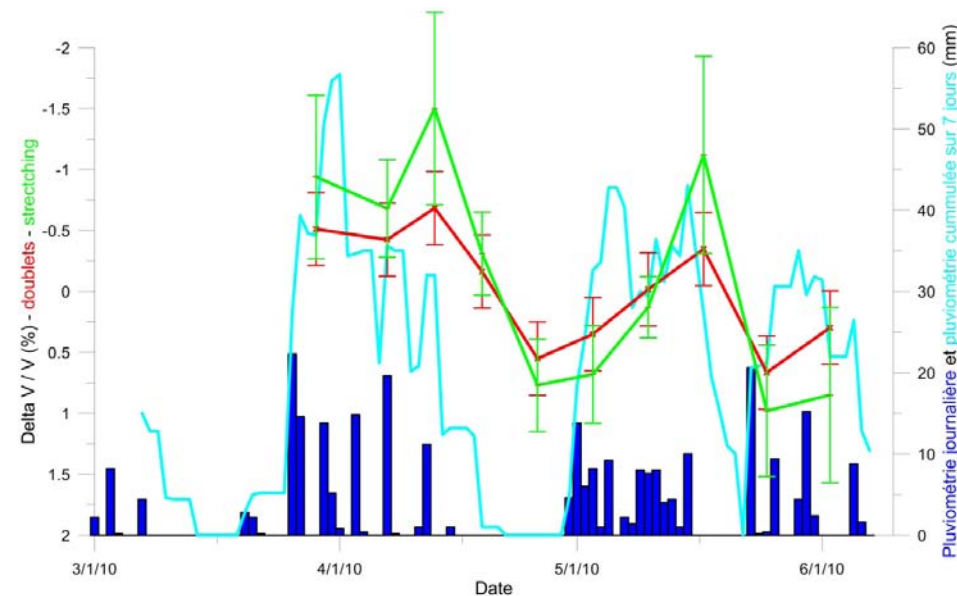
a. Conclusions

✓ 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

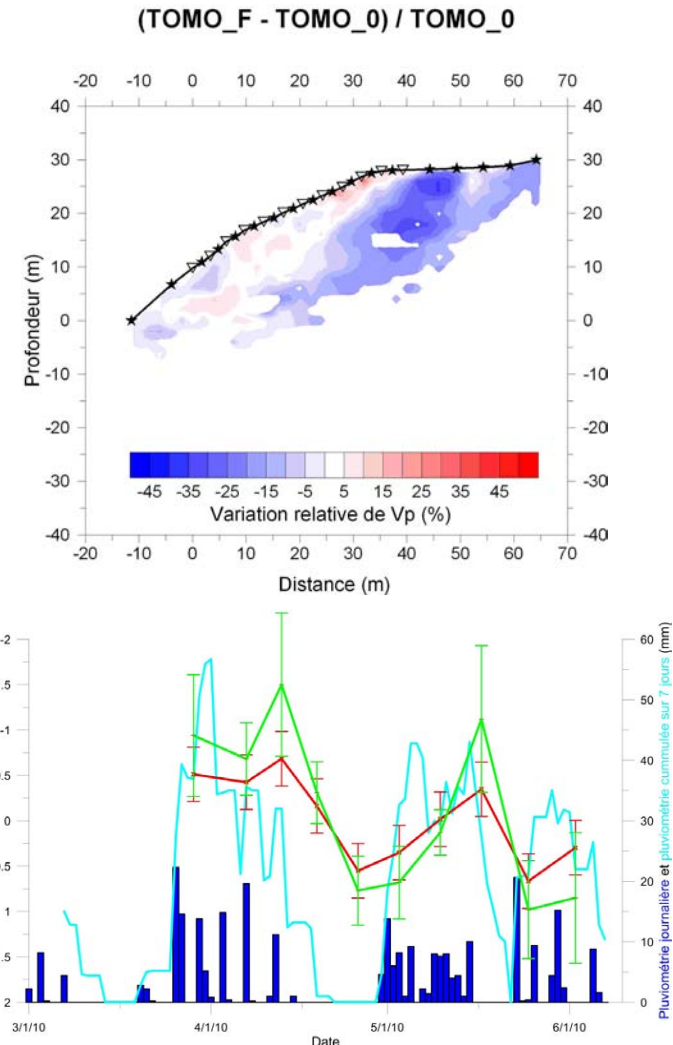
✓ Expériences de sismique semi-active

- 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

