



Pôle Alpin d'études et de
recherche pour la prévention
des Risques Naturels



Emploi de méthodes géophysiques calibrées par des forages pour l'étude du permafrost sur la station des Deux Alpes

Programme de recherche 2010
Projet coordonné par H. Cadet et O. Leroux



Plan

- Introduction et contexte général
 - Bilan sur l'analyse des mesures précédentes (MAIF et Permanet)
 - Électrique
 - Sismique
 - Forage
 - Analyse des mesures récentes (PARN)
 - Ondes de surface
 - géoradar
 - Conclusion
-

Introduction et contexte général

■ Enjeux:

Enjeux général :

Changements climatiques

⇒ Dégradation de la glace
dont le permafrost

⇒ Augmentation des instabilités (aléa)

Enjeux particulier:

⇒ Cibler les zones de permafrost (2300-3200m) dans
les secteurs sensibles (enjeux/vulnérabilité)

⇒ Exemple: les stations de ski



Introduction et contexte général

■ Contexte:

Projets précédents:

- projet MAIF
- PermaNET

en collaboration avec l'IGA/PACTE, le LGGE, gipsa-lab et le cnam.

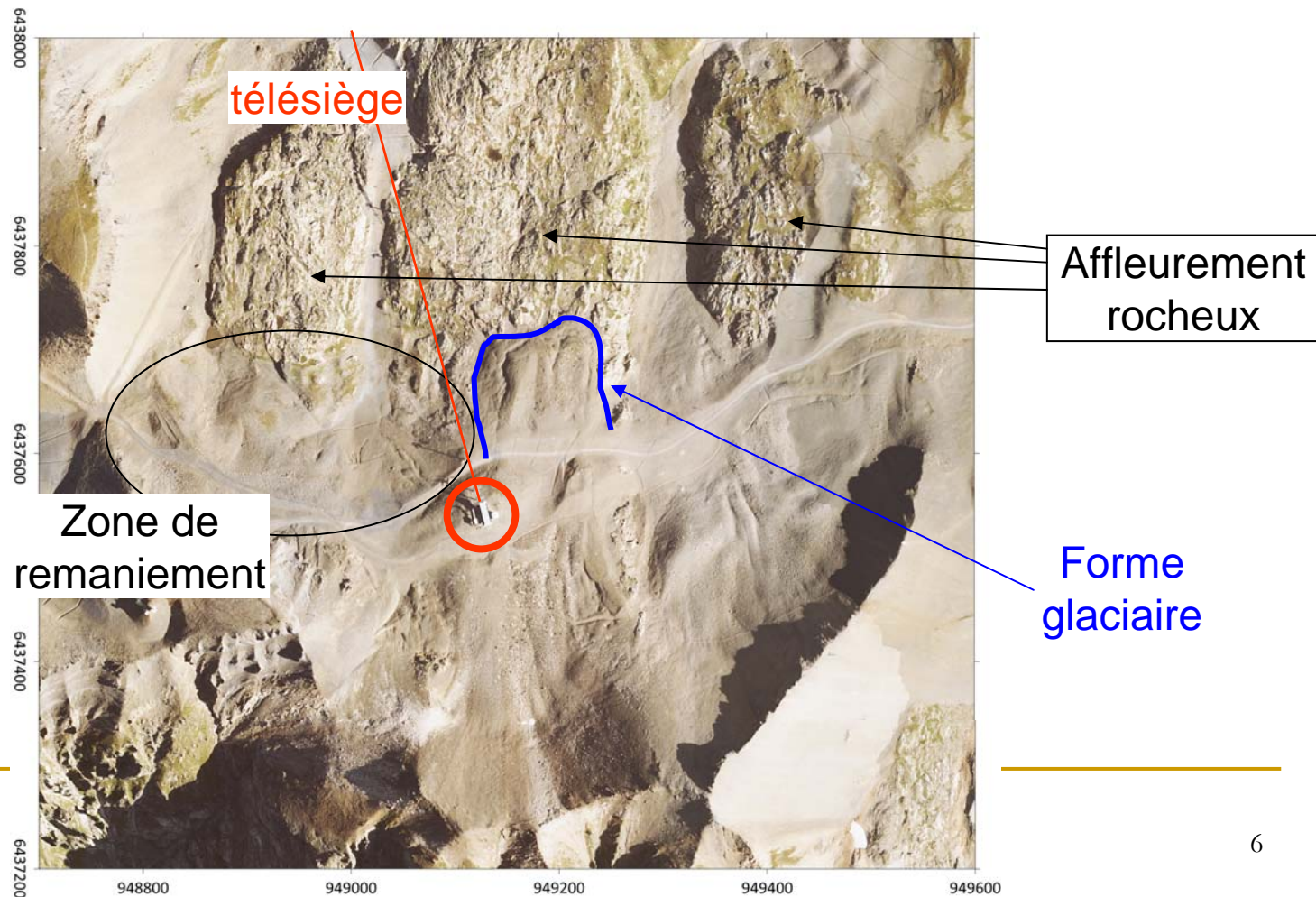
Introduction et contexte général

- Site: Station de ski des Deux Alpes
Glacier rocheux des Bellecombes (télésiège) ~2700 m



Introduction et contexte général

- **Site:** Station de ski des Deux Alpes ~2700 m
Glacier rocheux des Bellecombes



Introduction et contexte général

- But

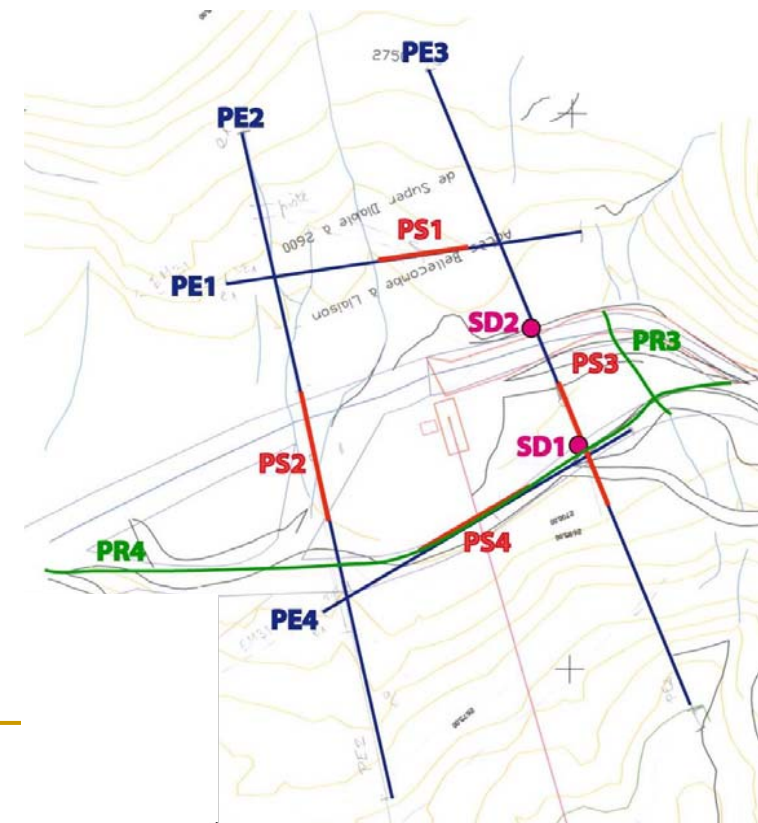
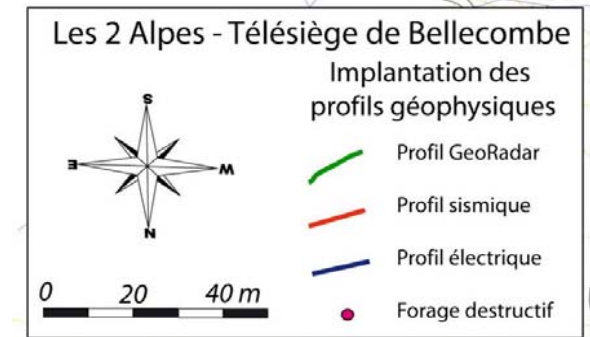
En complément des études précédentes (MAIF):
Définir les limites en profondeur du glacier rocheux
et
Proposer une méthodologie adaptée pour ce but

Introduction et contexte général

Mesures réalisées:

<2009=MAIF; >2010=PARN

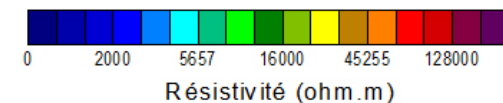
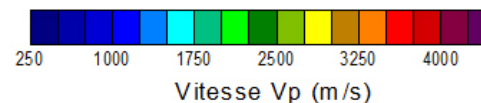
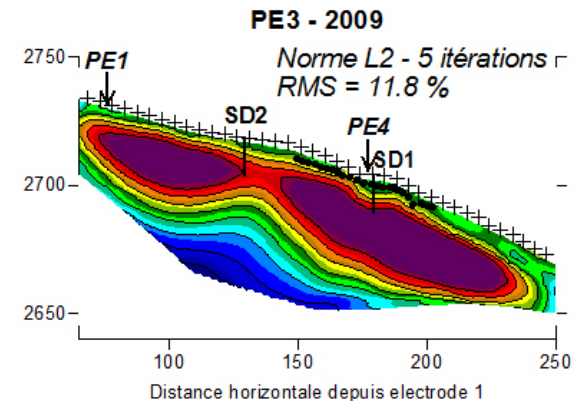
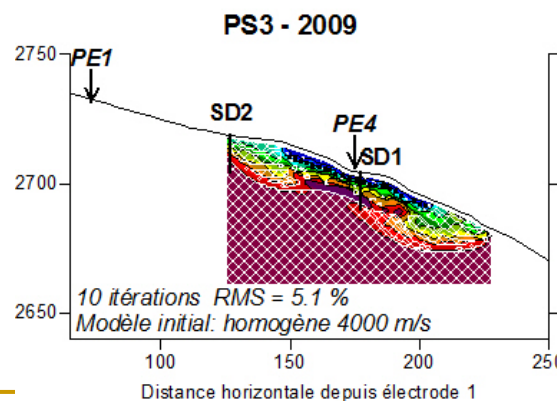
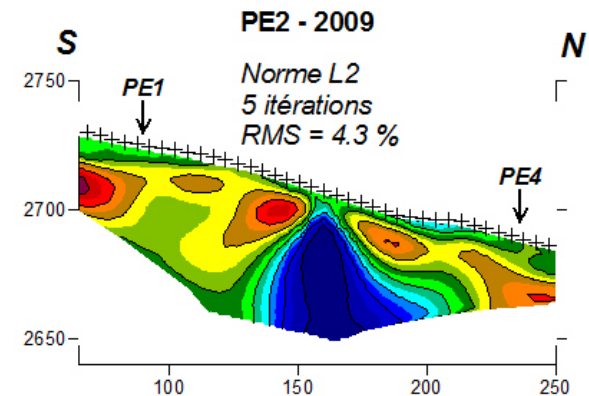
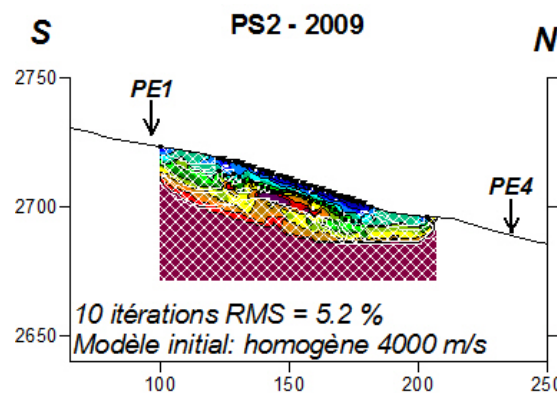
- ❑ 4 Panneaux électriques (2007, 2009, 2010-PE4)
- ❑ 4 Tomographies sismiques (2007, 2009)
- ❑ 2 Forages destructifs (2009) les 1ers sur le permafrost en France
- ❑ Ondes de surface: source active et passive (2010)
- ❑ Géoradar (2010, 2011)



Analyse des mesures précédentes (MAIF)

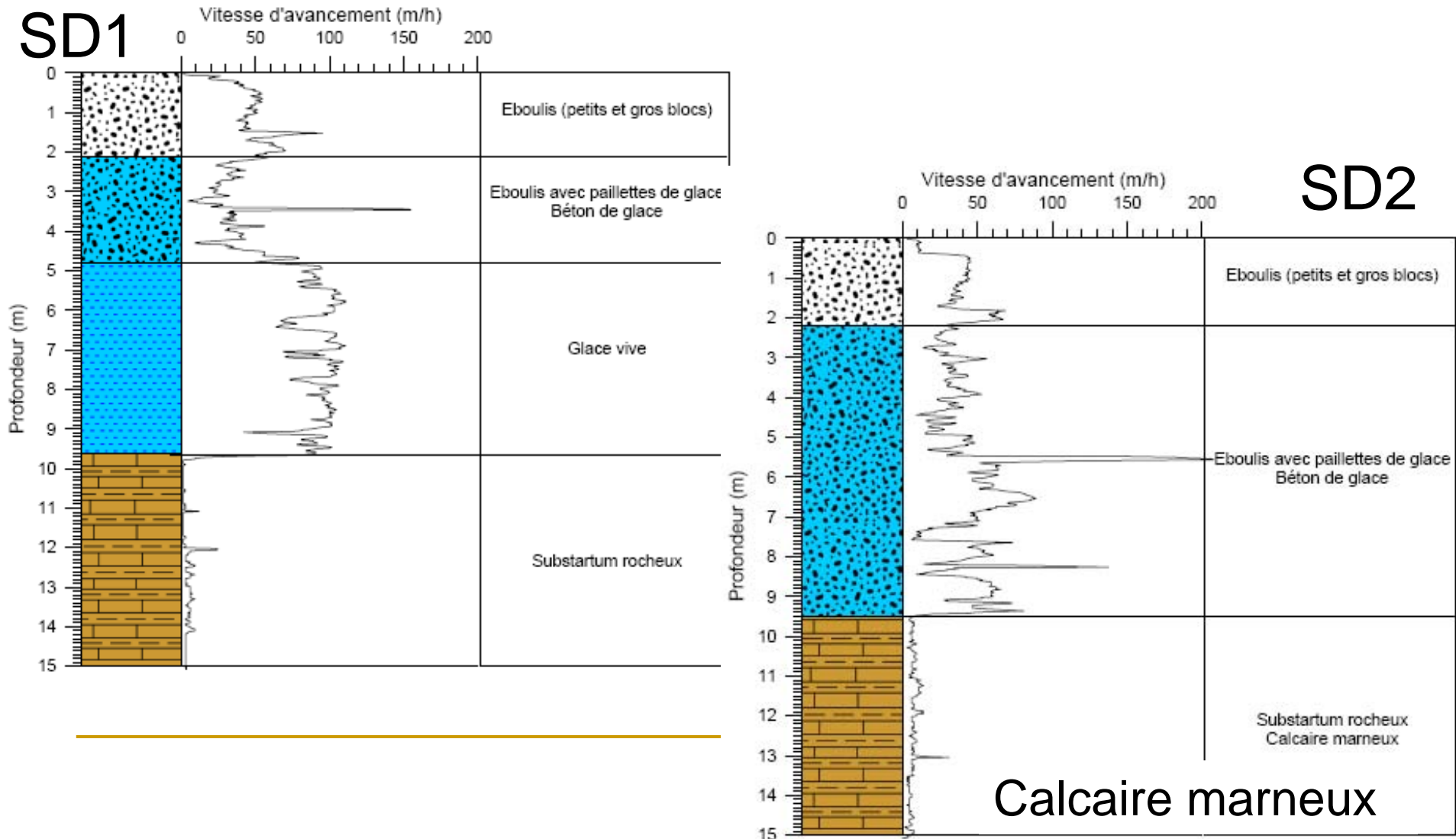
■ Électrique et sismique: Profils 2 et 3:

- ❑ Présence de glace évidente
- ❑ P2: peu exploitable (canalisation électrique). glace à l'amont.
- ❑ P3: limites amont et aval du glacier rocheux.
- ❑ épaisseur mal définie (30 à 55 m) car résistivités extrêmement importantes et principe d'équivalence de la méthode.



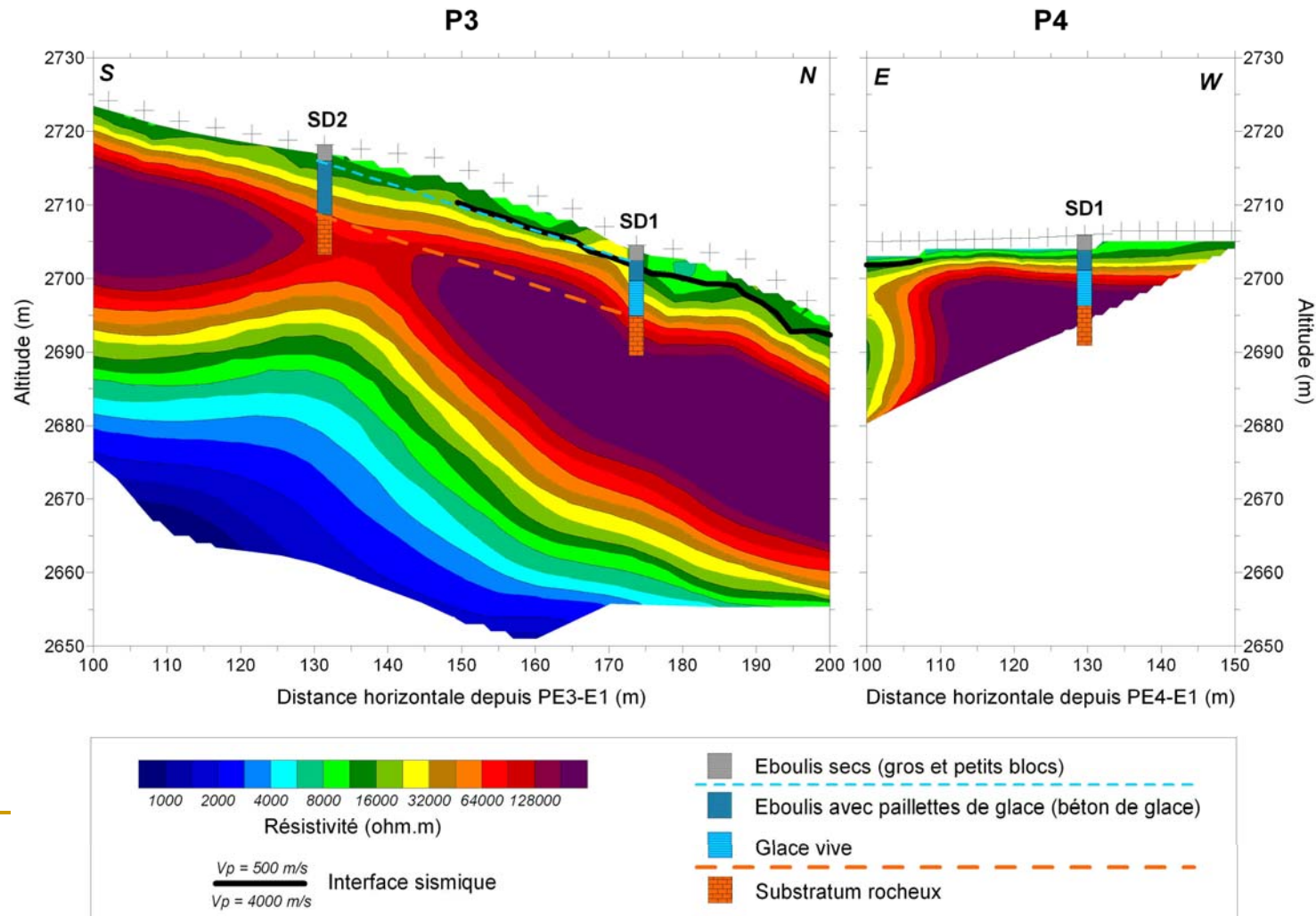
Analyse des mesures précédentes

- Forages PermaNET instrumentés (température)



Analyse des mesures précédentes (MAIF)

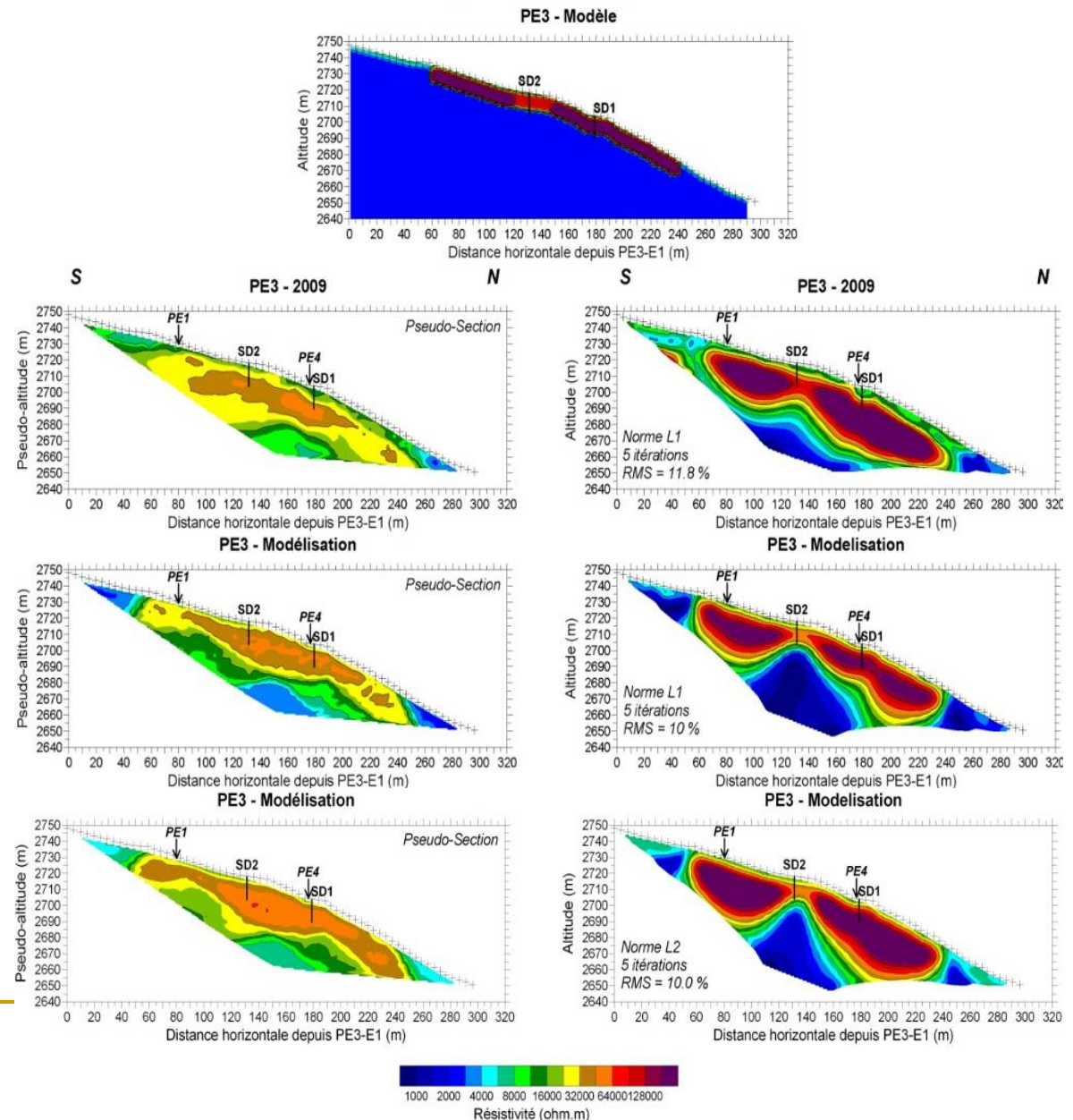
- Électrique et sismique: Profils 4 et 3:
 - épaisseur non confirmée par les sondages destructifs



Analyse des mesures précédentes (MAIF)

■ Modélisation sur P3:

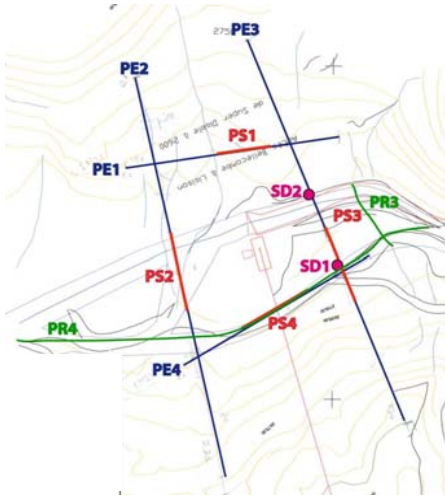
- ✓ Eboulis sec : $\rho = 7500 \Omega.m$ sur 2.1 m
- ✓ Béton de glace: $\rho = 100 k\Omega.m$ de 2.1 à 4.8 m de profondeur
- ✓ Glace vive: $\rho = 500 k\Omega.m$ (M1) et $1 M\Omega.m$ (M2) de 4.8 à 9.1 m de profondeur
- ✓ Substratum rocheux : $\rho = 2500 \Omega.m$ à partir de 9.1 m de profondeur



Mesures précédentes BILAN (MAIF)

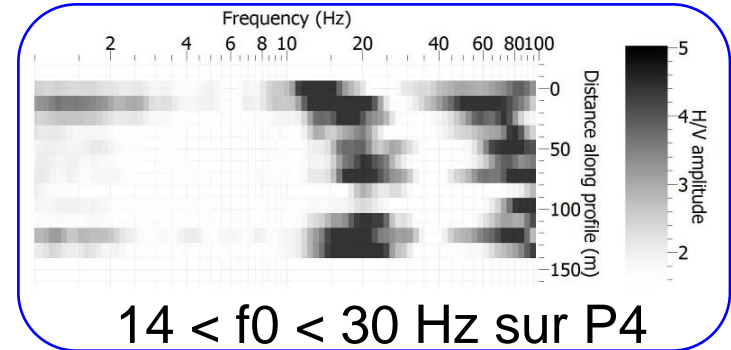
- tomographies sismiques et électriques:
 - + confirmation de la présence de glace
 - + identification du toit de la zone englacée
 - - **pas de détermination de l'épaisseur du niveau englacé donc de la profondeur du substratum**
 - Pas d'évolution notable entre 2007 et 2009

Terrains	Vp (m/s)	ρ (K Ω .m)
Éboulis aérés	~ 400	5 à 10
Permafrost riche en glace	3000 à 3700	> 100
Glace vive	3000 à 3700	500 à 1000
Substratum	3500 à 3900	1 à 3

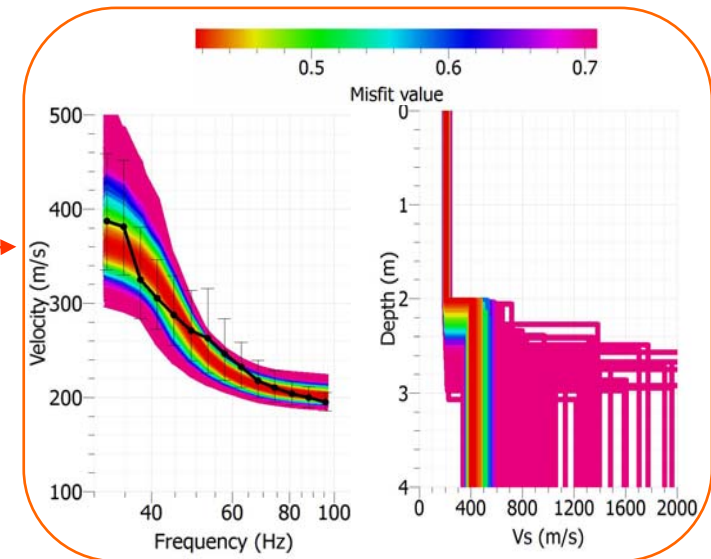


Analyse des mesures récentes

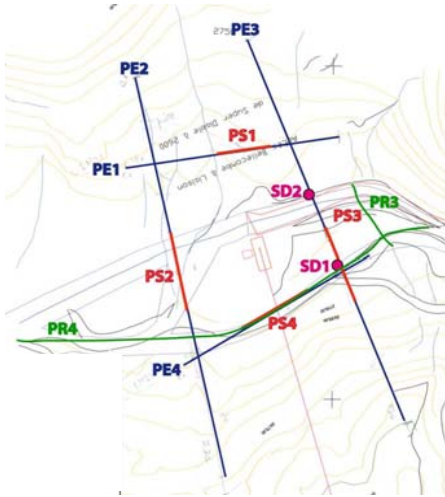
- Réfraction en ondes S
sur P4:
2.5 m d'épaisseur
 $V_s \sim 225$ m/s



- Ondes de surface:
 - Méthode H/V (source passive)
 - Source active:
 $V_s \sim 220$ m/s

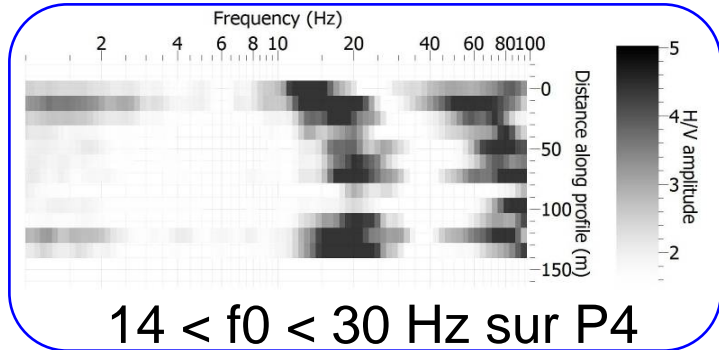


Analyse des mesures récentes



■ Réfraction en ondes S sur P4:

2.5 m d'épaisseur
 $V_s \sim 225 \text{ m/s} \Rightarrow f_0 \sim 22 \text{ Hz}$



■ Ondes de surface:

- Méthode H/V (source passive)

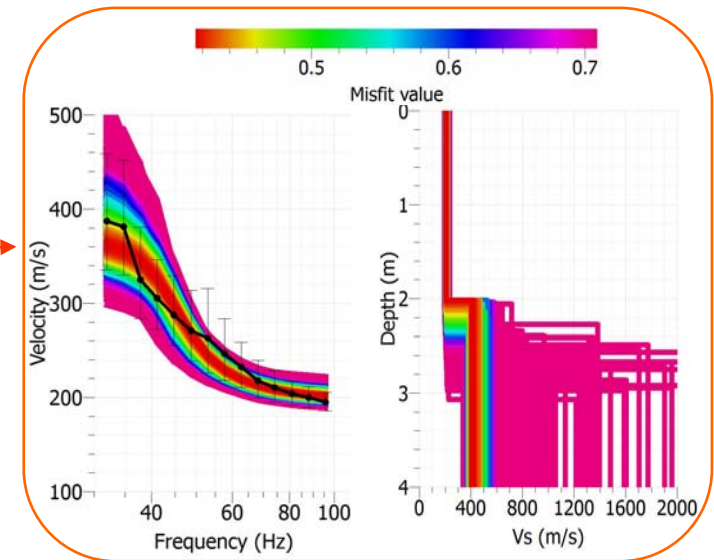
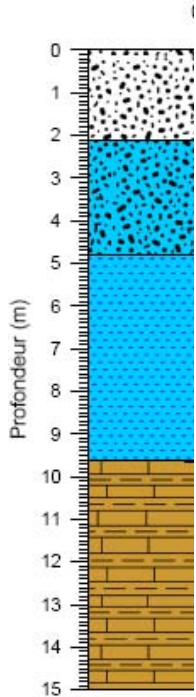
- Source active:

$V_s \sim 220 \text{ m/s}$

- Combinaison des méthodes:

$$E = V_s * 4f_0 \Rightarrow 1.8 < E < 3.9 \text{ m}$$

⇒ Couche active



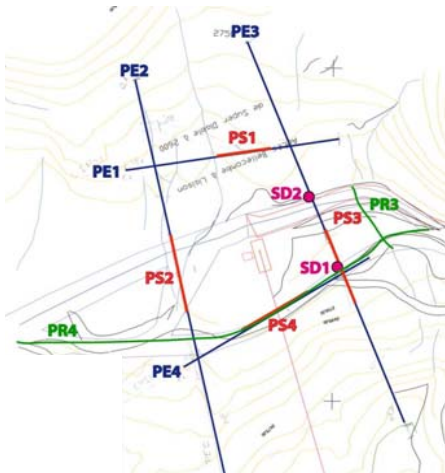
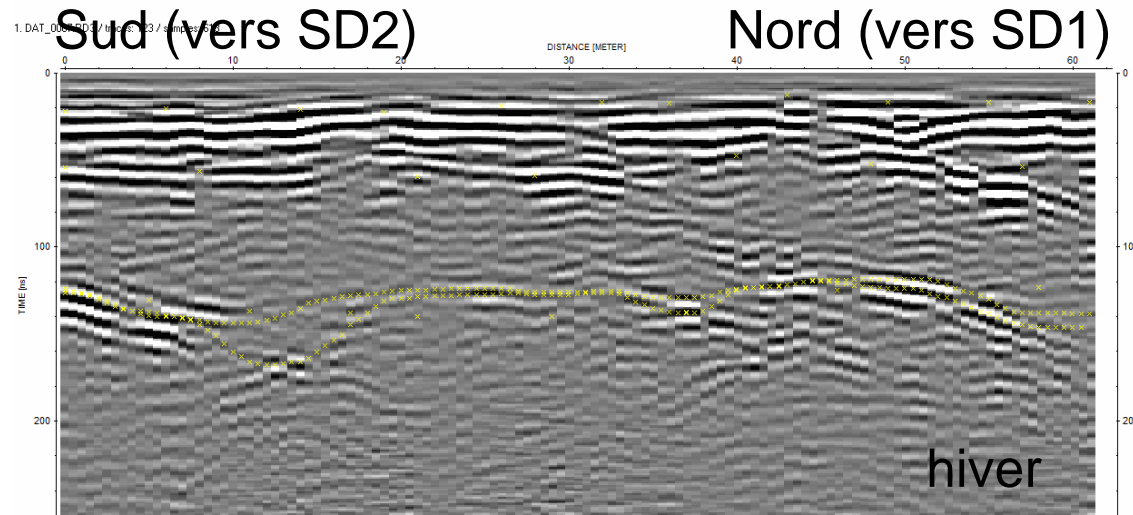
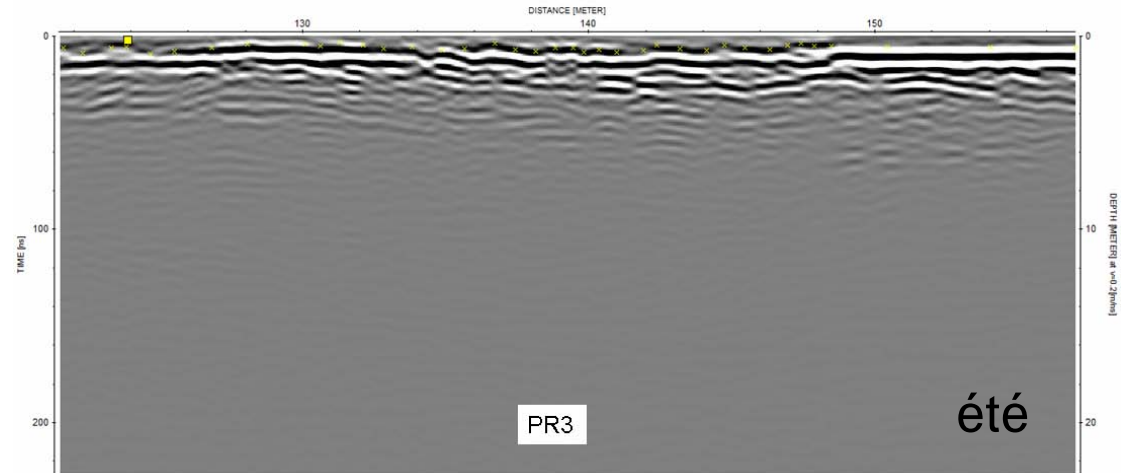
- Source passive, enregistrement en réseau: non exploitable 15

Analyse des mesures récentes

Géoradar:

+ détecte:

- couche active (été)
- Couche de neige
- contact débris+glace /
glace pure (hiver)
- contact glace pure /
rocher (hiver)

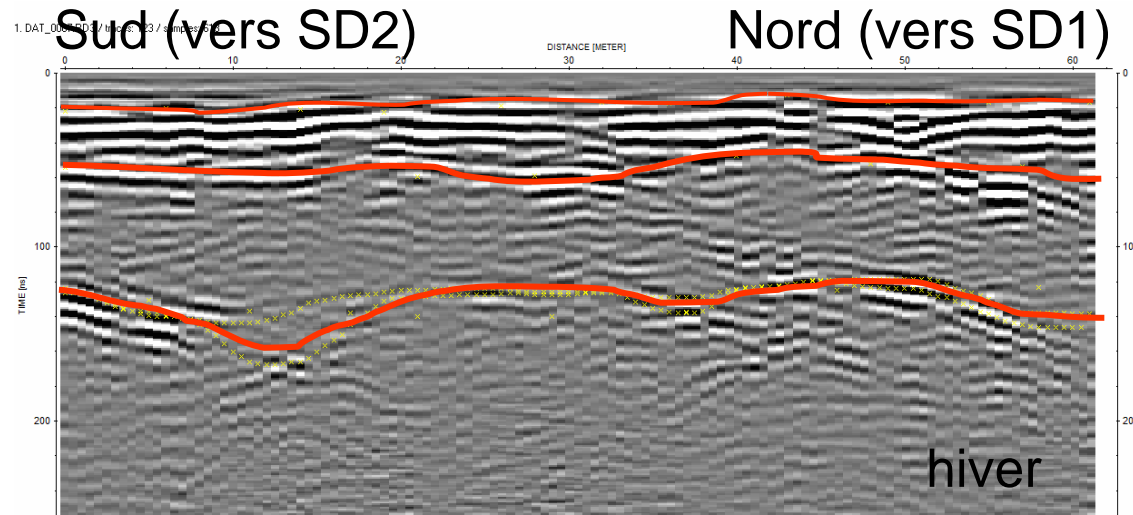
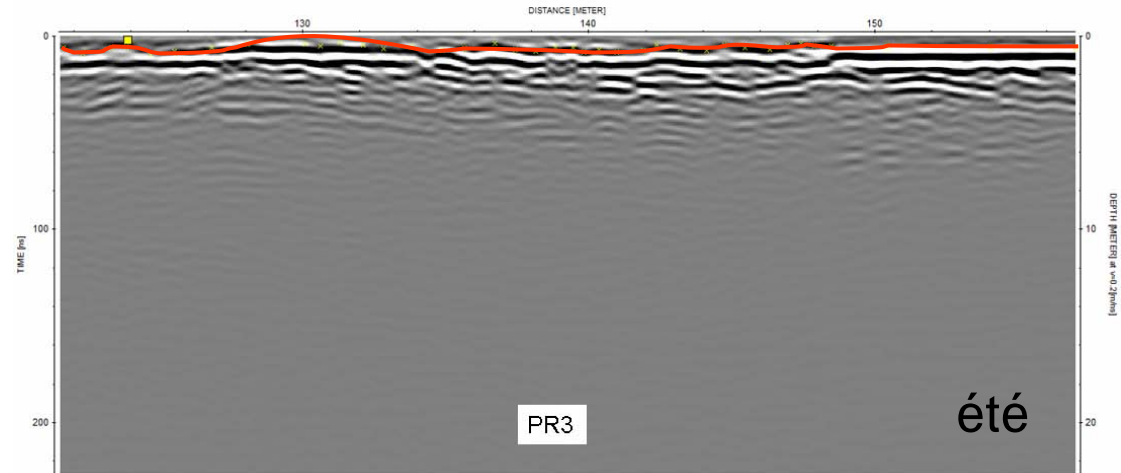


Analyse des mesures récentes

Géoradar:

+ détecte:

- ❑ couche active (été)
- ❑ Couche de neige
- ❑ contact débris+glace / glace pure (hiver)
- ❑ contact glace pure / rocher (hiver)

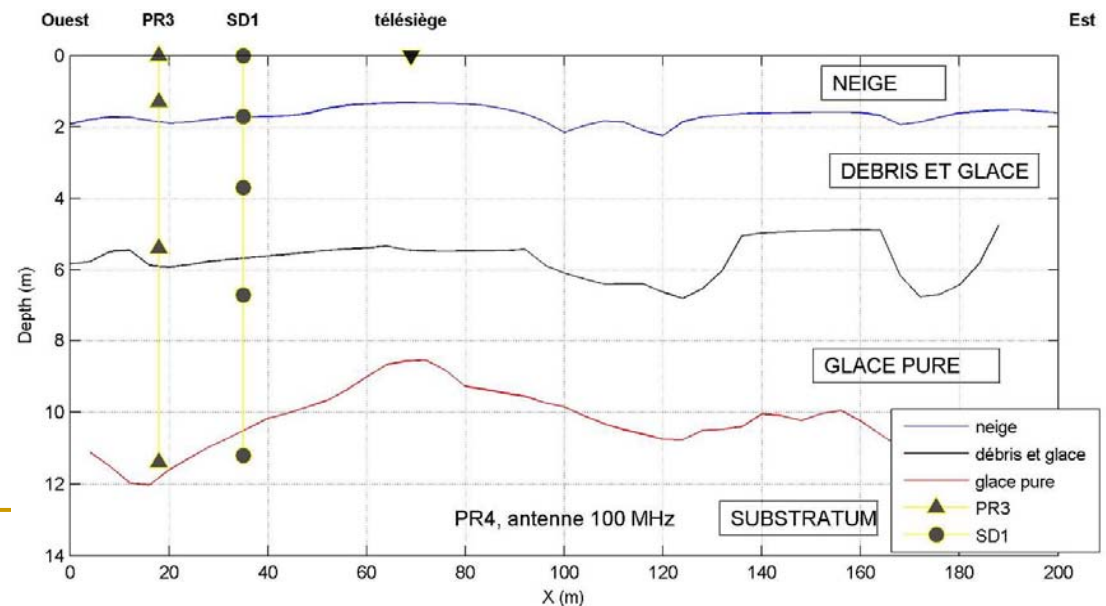
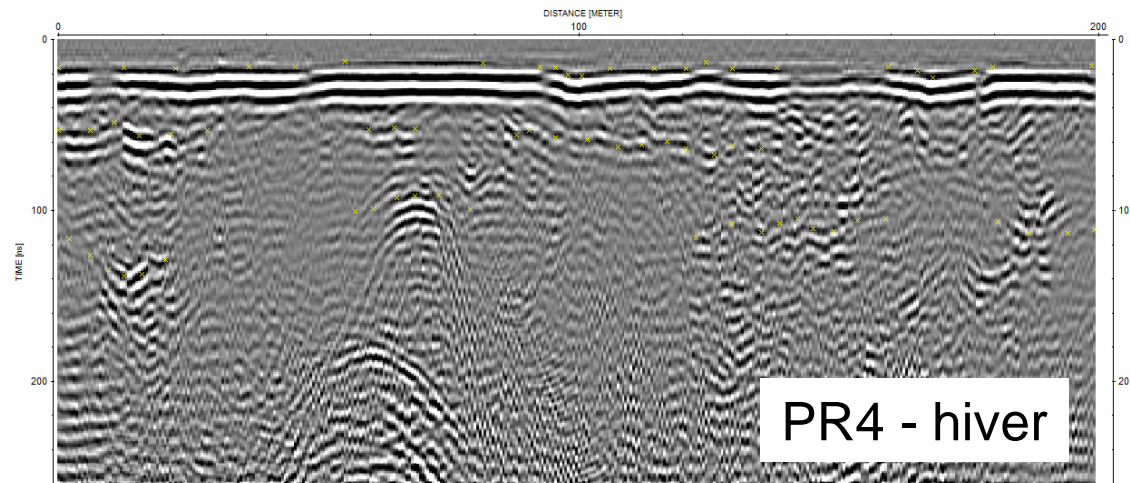


Analyse des mesures récentes

Géoradar:

+ détecte:

- ❑ couche active (été)
- ❑ Couche de neige
- ❑ contact débris+glace /
glace pure (hiver)
- ❑ contact glace pure /
rocher (hiver)

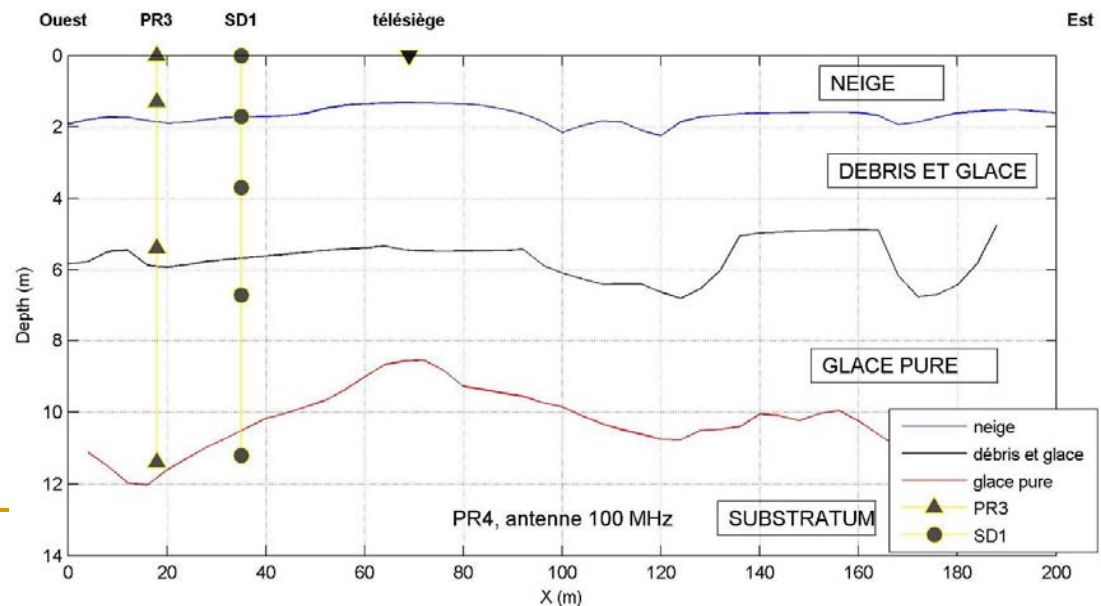
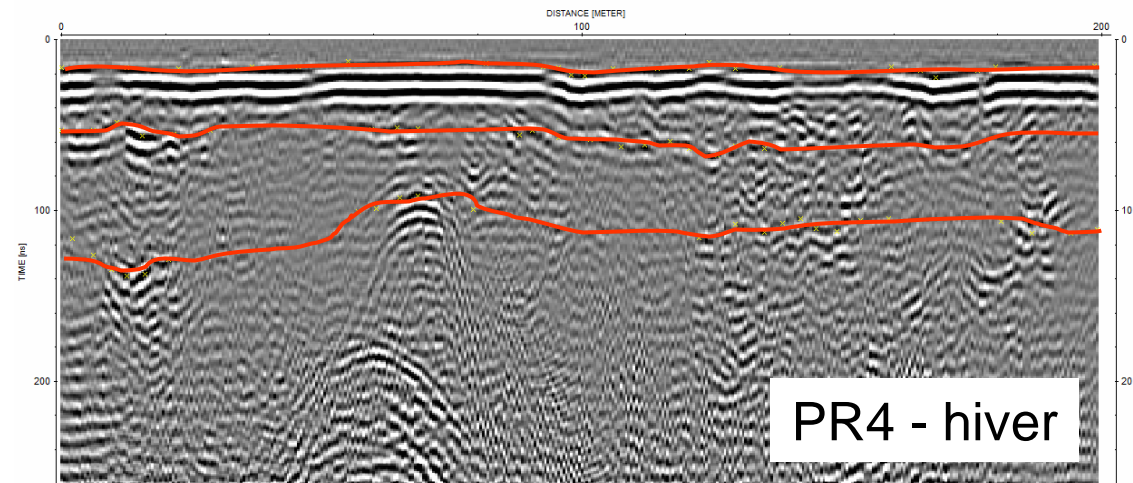


Analyse des mesures récentes

Géoradar:

+ détecte:

- ❑ couche active (été)
- ❑ Couche de neige
- ❑ contact débris+glace /
glace pure (hiver)
- ❑ contact glace pure /
rocher (hiver)



Méthodologie proposée

1. étude géomorphologique pour déterminer la présence et l'étendue du glacier rocheux et pour déterminer la position des différents profils à réaliser
2. profils sismiques et électriques pour valider ou non la présence de glace
3. combiner profils GPR avec une antenne adaptée et forages ponctuels pour déterminer précisément l'épaisseur du glacier rocheux.

Conclusion

- Caractérisation de la couche active: 3 méthodes :
 - H/V combiné avec ondes de surface (source active)
 - réfraction en ondes P
 - réfraction en ondes S
- Profils électrique et sismique: confirment la présence de glace mais ne définissent pas l'épaisseur.
- Caractérisation de la profondeur du rocher: forages + GPR
- Caractériser un glacier rocheux en suivant la méthodologie proposée
- Suivi thermique et suivi de déplacement en parallèle du suivi géophysique (en cours aux Bellecombes)

Merci

Questions ?