



CE GLACIER SOUS NOS PIEDS



Unil

UNIL | Université de Lausanne



~130 milliards
de m³ de glace¹

~114 millions
de m³ de glace²



¹ Farinotti, D., Huss, M., Fürst, J.J. *et al.* A consensus estimate for the ice thickness distribution of all glaciers on Earth. *Nat. Geosci.* **12**, 168–173 (2019)

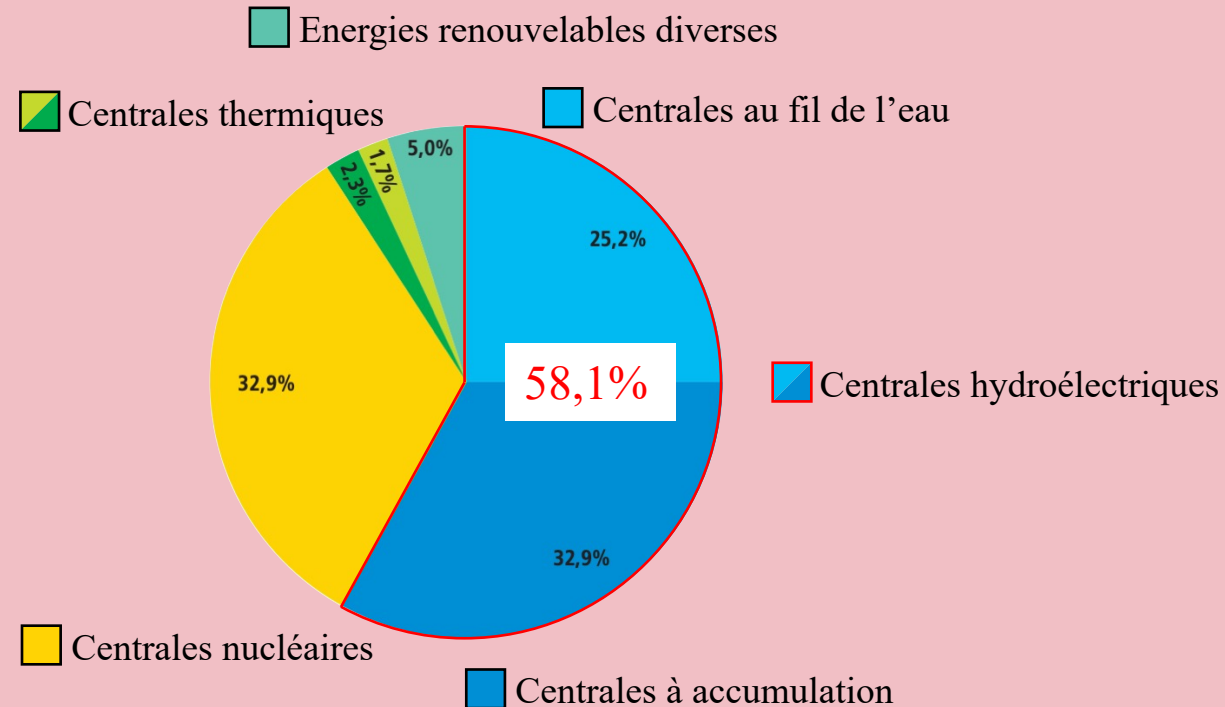
² Neven, A., Dall’Alba, V., Juda, P., Straubhaar, J., & Renard, P. (2021). Ice volume and basal topography estimation using geostatistical methods and ground-penetrating radar measurements: application to the Tsanfleuron and Scex Rouge glaciers, Swiss Alps. *The Cryosphere*, *15*(11), 5169–5186 (2021)



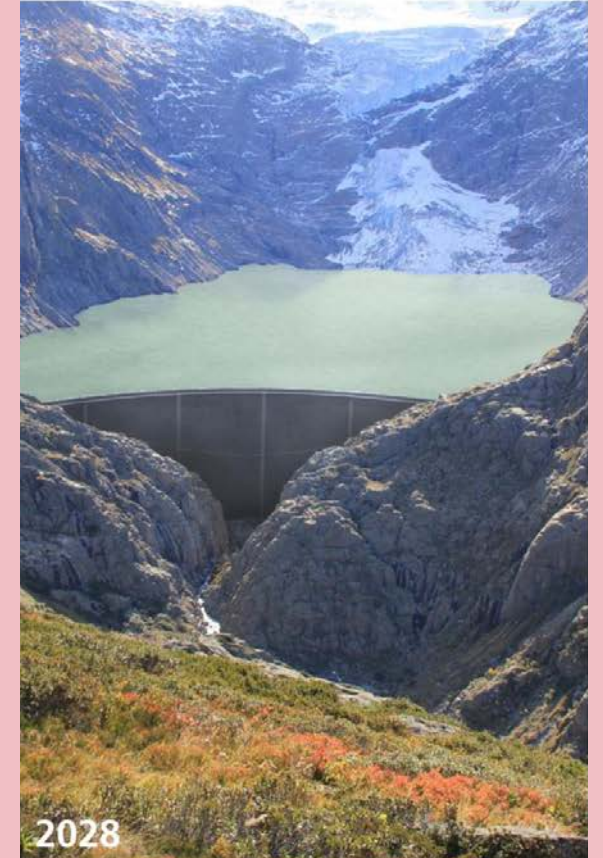
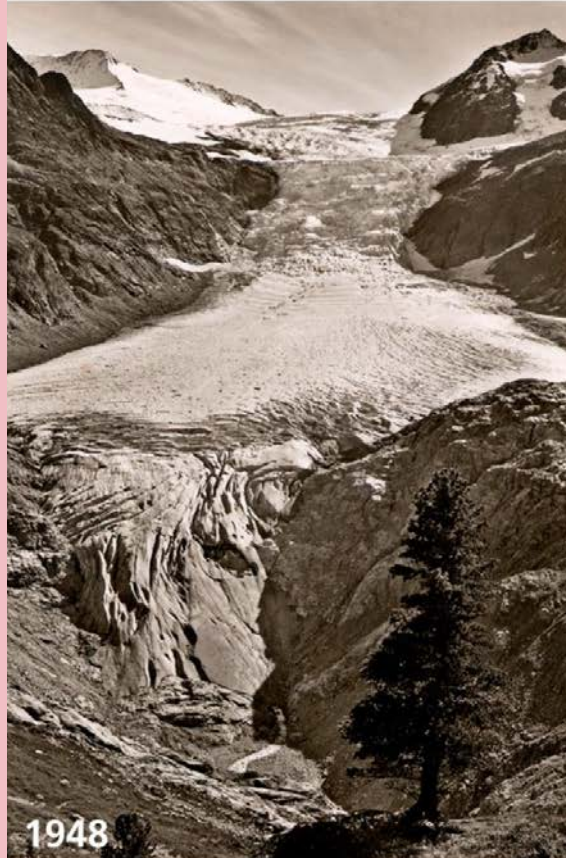
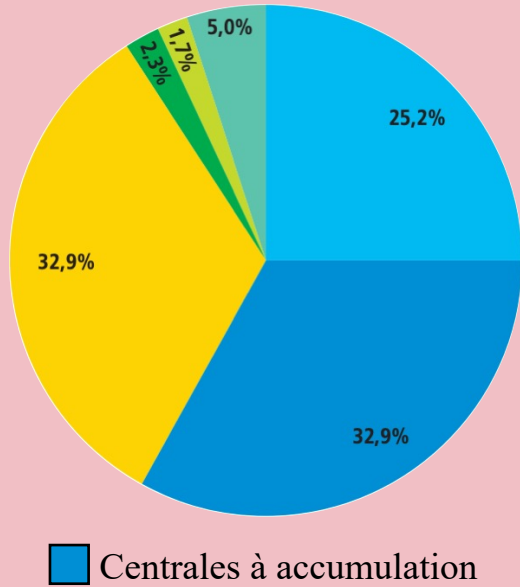
~13L d'eau par
habitant de la
Terre



Production d'électricité



Production d'électricité



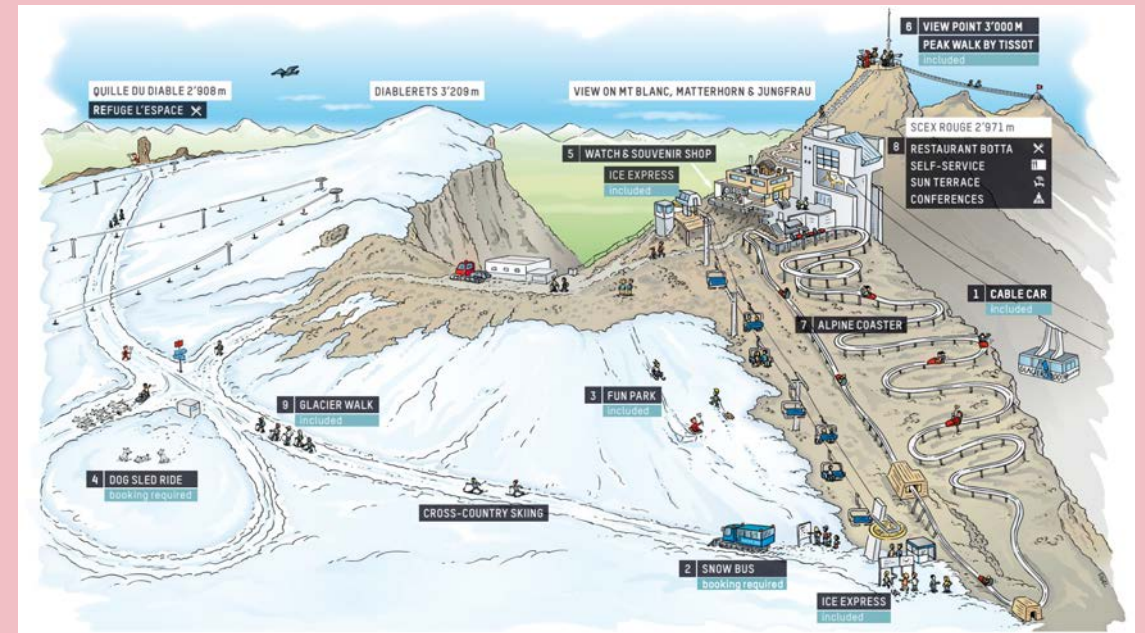
Trift glacier

Source : Kraftwerke Oberhasli AG

Tourisme



Glacier 3000 in winter



Glacier 3000 in summer

Culture



Glacier Express



Patrouille des Glaciers

Sources : <https://www.glacierexpress.ch/fr/> and <https://www.pdg.ch/>

Les glaciers sont dynamiques



Les glaciers sont dynamiques



Creep – Exit glacier, Alaska

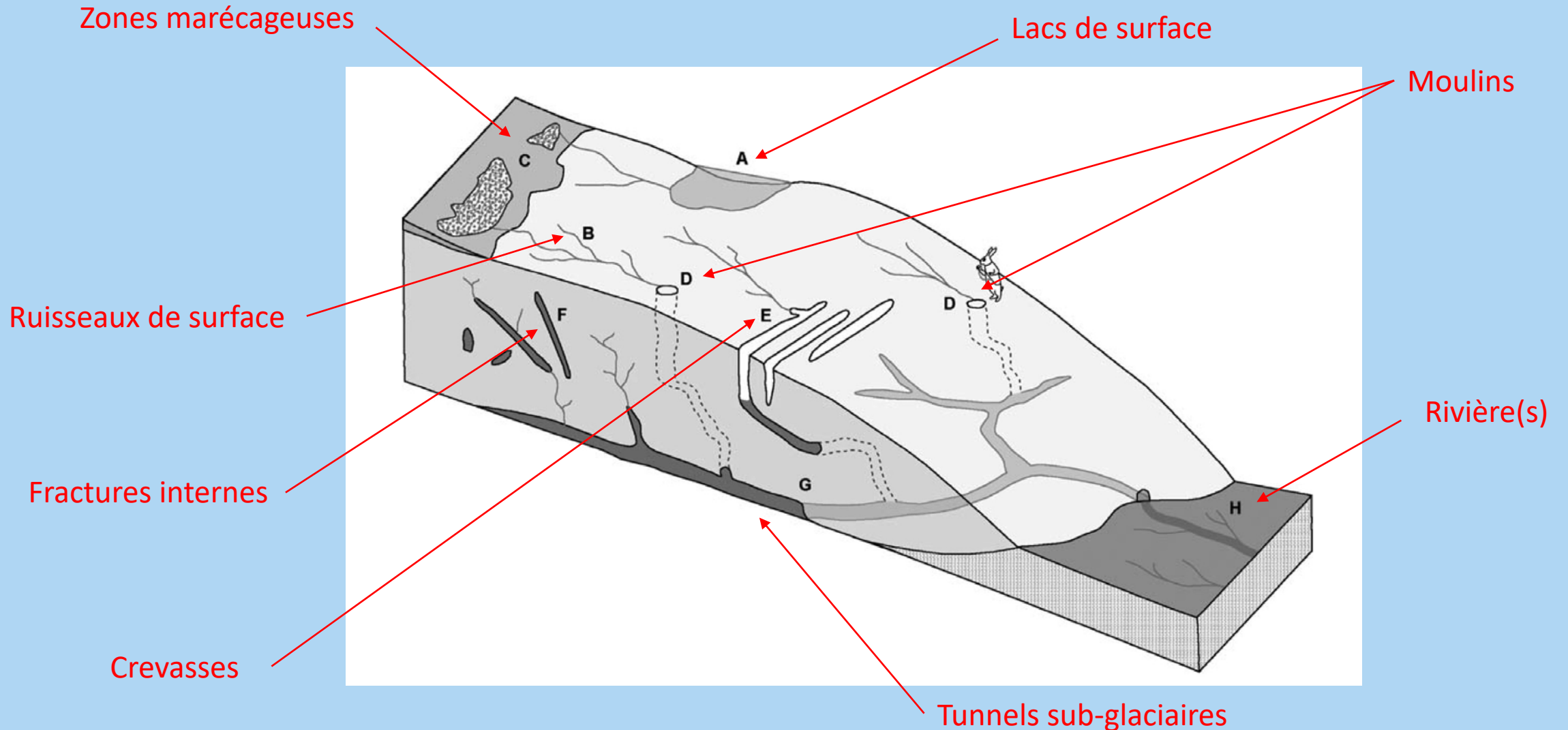
Source : https://www.youtube.com/watch?v=1ai9Q27J2vc&ab_channel=KenaiFjordsNPS



Basal Sliding – Argentière glacier, France

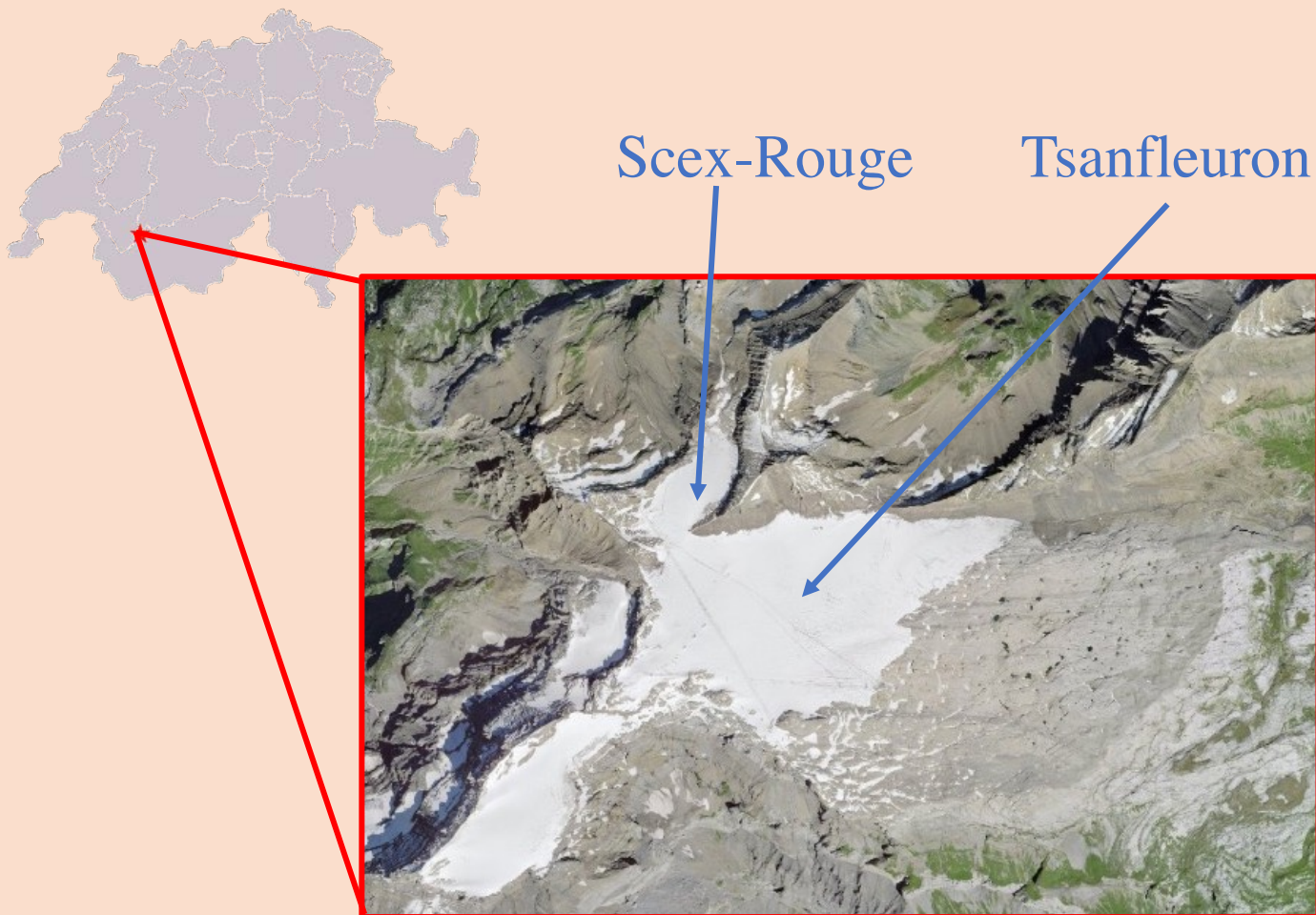
Source : <https://www.moreauluc.com/>

L'hydrologie des glaciers



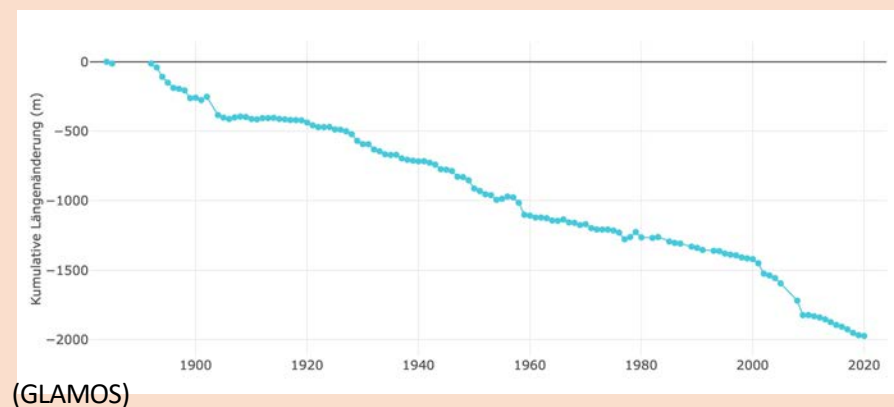
Source : Alley, R. (2011). K.M. Cuffey and W.S.B. Paterson. 2010. The physics of glaciers. Fourth edition. Amsterdam, etc., Academic Press. 704pp. ISBN-10: 0-123694-61-2, ISBN-13: 978-0-123-69461-4, hardback, £60.99/€71.95/US\$99.95. *Journal of Glaciology*, 57(202), 383-384.

Les glaciers de Tsanfleuron et de Scex-Rouge



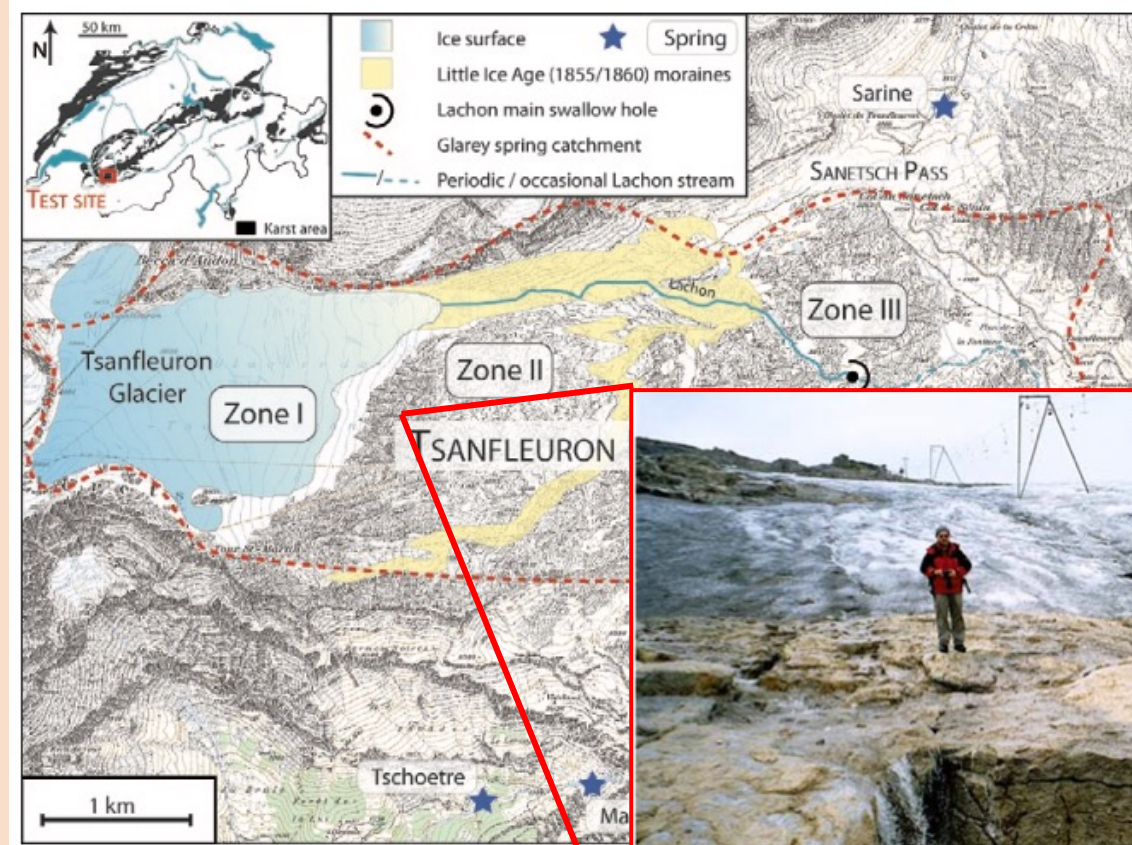
Quelques chiffres:

- Volume de glace: ~114 millions de m³
- Glacier de plateau, altitude ~2500-3000 m.a.s.l.
- Pentes plutôt douces → peu dynamique
- **Environ 1.5/2 mètres d'épaisseur de glace par an**
- Tsanfleuron: aire ~ 2.4 km², longueur ~ 3 km
- **1884-2020: la longueur de glacier a été réduite de presque 2km!**



Les glaciers de Tsanfleuron et de Scex-Rouge

- les deux glaciers reposent sur des formations carbonatées fortement **karstifiées** (système de drainage souterrain avec gouffres et grottes)
- le glacier est l'une des principales sources d'alimentation du système karstique sous-jacent, qui est une source importante **d'approvisionnement en eau potable**
- le débit d'eau à la langue du glacier est faible, l'eau rejoint le Rhône dans la vallée
- l'eau provenant du système karstique ressurgit au niveau du col de Sanetsch, et est la source de la Sarine



(Gremaud & Goldscheider 2010)

(Gremaud et al. 2009)

Les glaciers de Tsanfleuron et de Scex-Rouge

- Glacier3000 exploite les glaciers avec des télécabines depuis 1993...
- ... ainsi que de nombreuses autres attractions.



Notre travail à l'UNIL

- Nous voulons mieux **comprendre** les glaciers alpins!
 - e.g. mieux connaître leurs épaisseurs, comprendre leurs dynamismes et où l'eau s'écoule.
- Il y a de nombreuses **méthodes** pour l'étude des glaciers
 - e.g. traçage de colorant, mesures d'équilibre de mass, forages,...



(D. Finger)



(M. Huss)

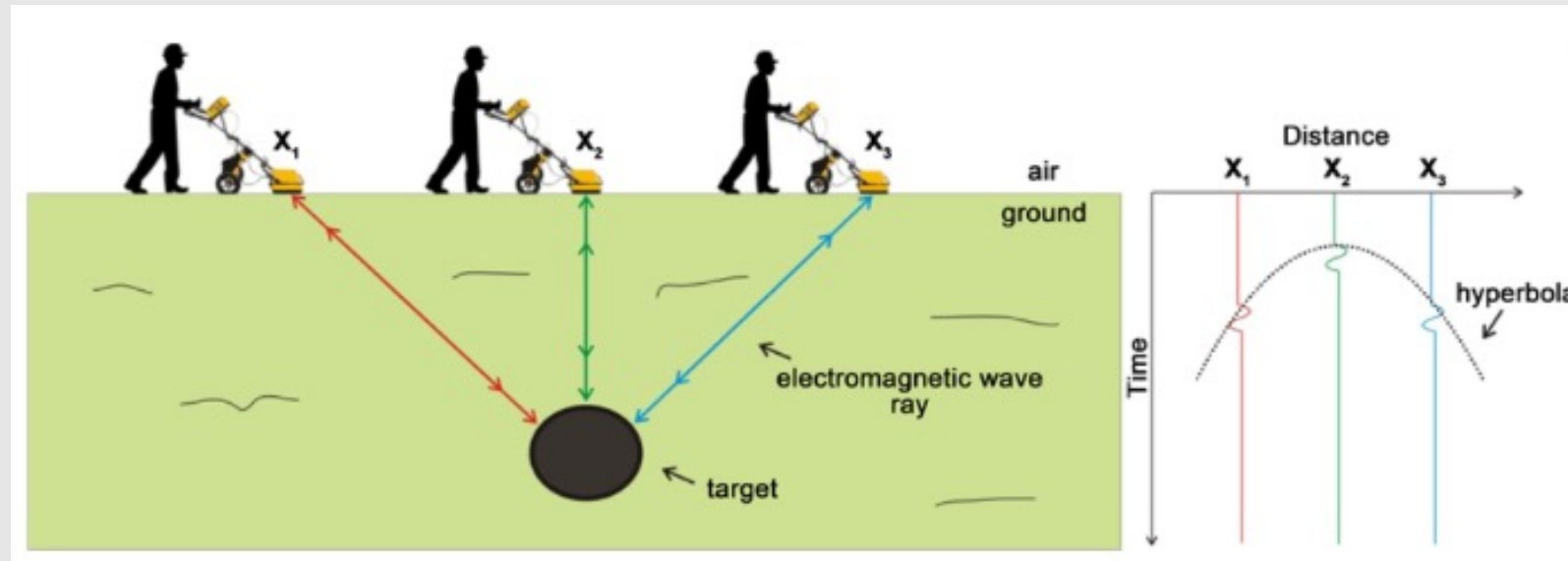


(B. Hubbard and M. Jenkin)

...mais nous utilisons une technique appelée...

Radar à pénétration de sol – Ground-Penetrating Radar(GPR)

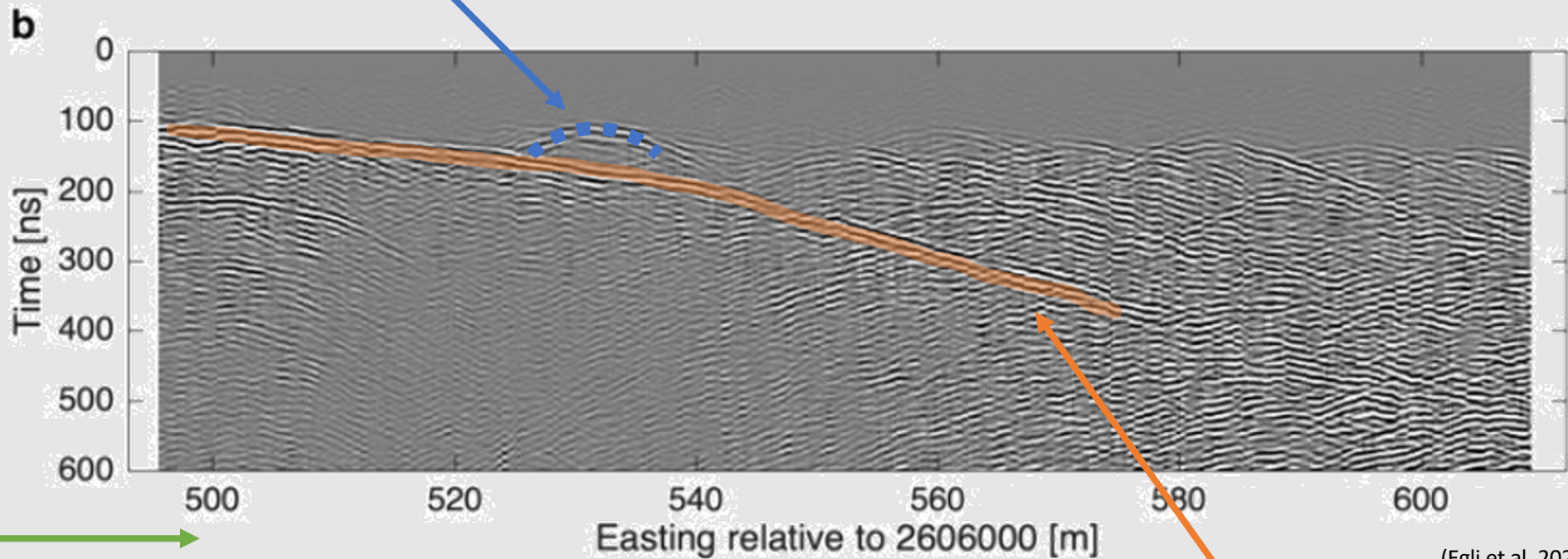
- méthode **géophysique** pour l'exploration du sous-sol peu profond
- méthode **non-destructive**, nous scannons le sous-sol sans forages etc...
- l'instrument émet une **onde électromagnétique** dans le sol, les ondes radios se propagent dans le sol
- à l'encontre d'une interface de milieux de différentes propriétés électromagnétiques, l'onde est réfléctée, réfractée ou dispersée (glace/roche, glace/eau)
- à la surface nous mesurons le signal réfléchi



... et qu'est-ce que nous obtenons? – un **Radargram**!

hyperbole: point de diffraction, e.g. canal d'eau

temps
de
retour
du signal

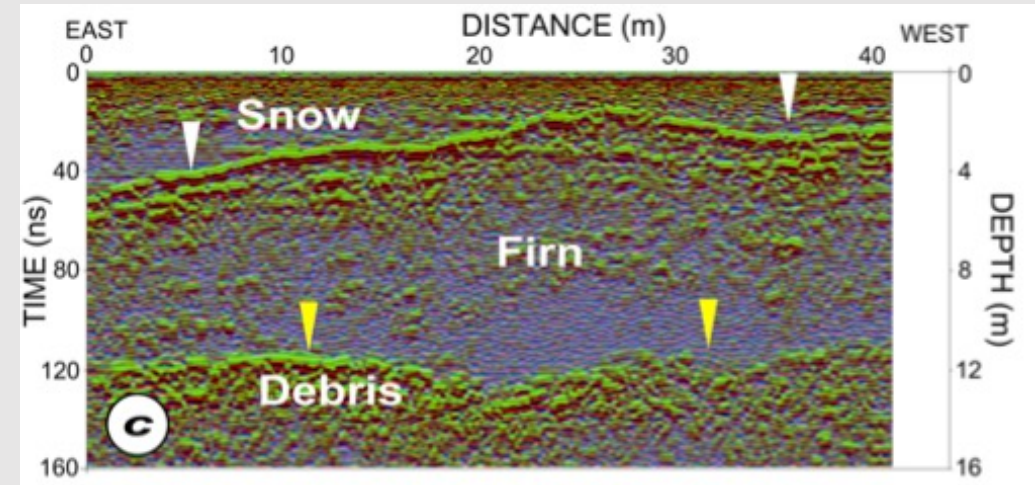


distance le long du profil

réflexion continue: interface, e.g. glace/roche

La méthode GPR a beaucoup d'applications dans le domaine de la glaciologie

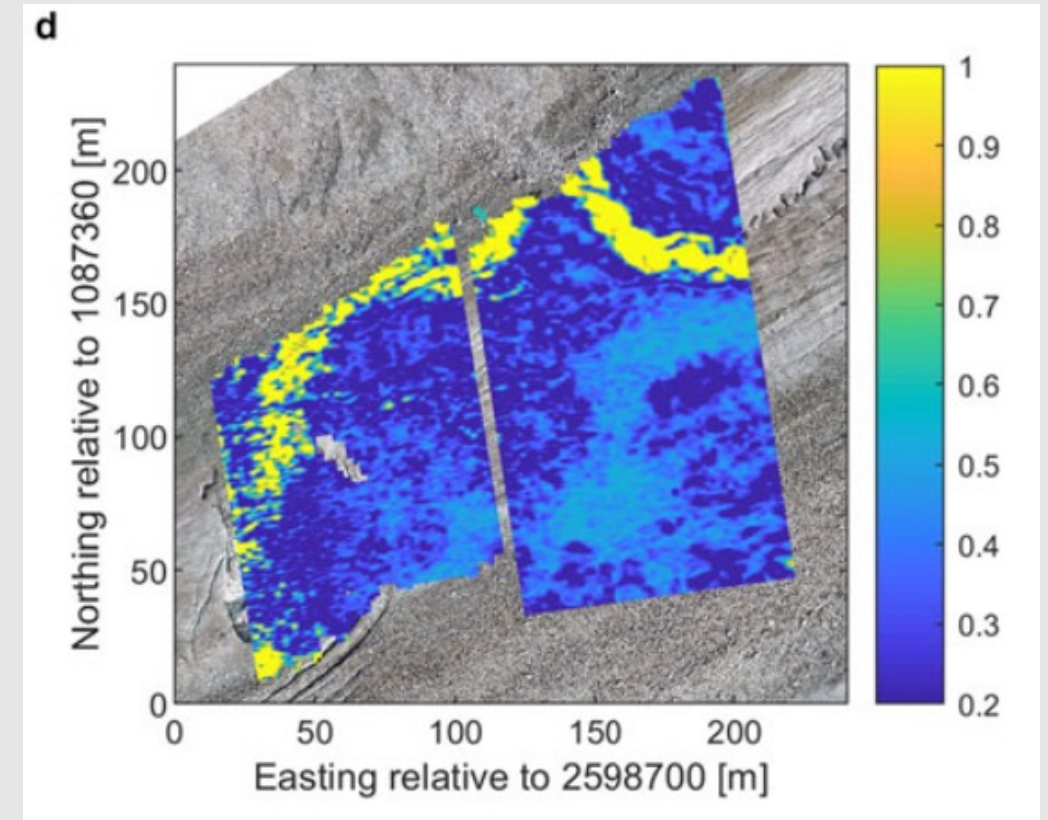
- Cartographie des couches internes
- Identification des zones de cisaillement et des crevasses
- Cartographie des masses d'eau internes
- Différenciation des zones de glace froide et tempérée



(Zhao et al. 2016)

La méthode GPR a beaucoup d'applications dans le domaine de la glaciologie

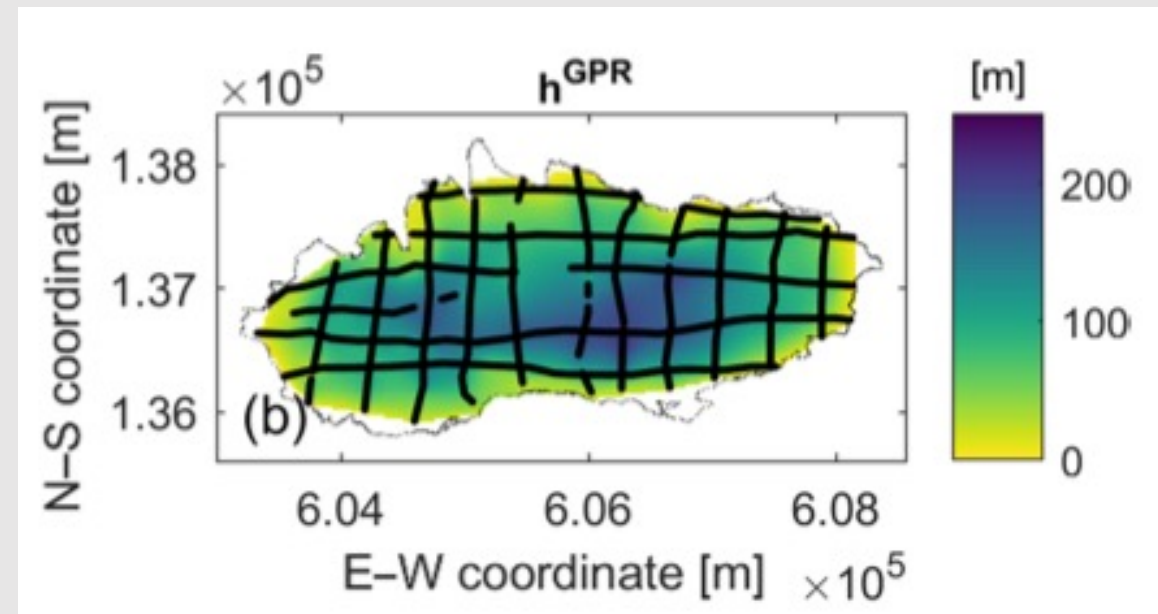
- Cartographie des couches internes
- Identification des zones de cisaillement et des crevasses
- Cartographie des masses d'eau internes
- Différenciation des zones de glace froide et tempérée
- Identification des canaux d'eau internes et sous-glaciaires



(Egli et al. 2021)

La méthode GPR a beaucoup d'applications dans le domaine de la glaciologie

- Cartographie des couches internes
- Identification des zones de cisaillement et des crevasses
- Cartographie des masses d'eau internes
- Différenciation des zones de glace froide et tempérée
- Identification des canaux d'eau internes et sous-glaciaires
- Cartographie de la topographie du lit rocheux et de la distribution d'épaisseur de glace



(Langhammer et al. 2019)

... ainsi qu'une longue histoire!

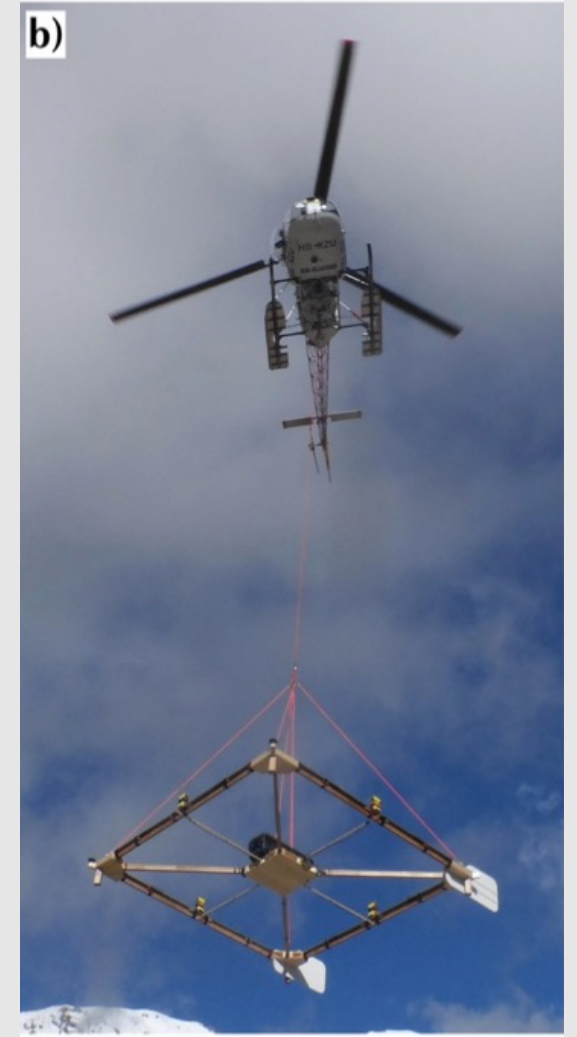


(Steenson **1951**)



(J. Irving)

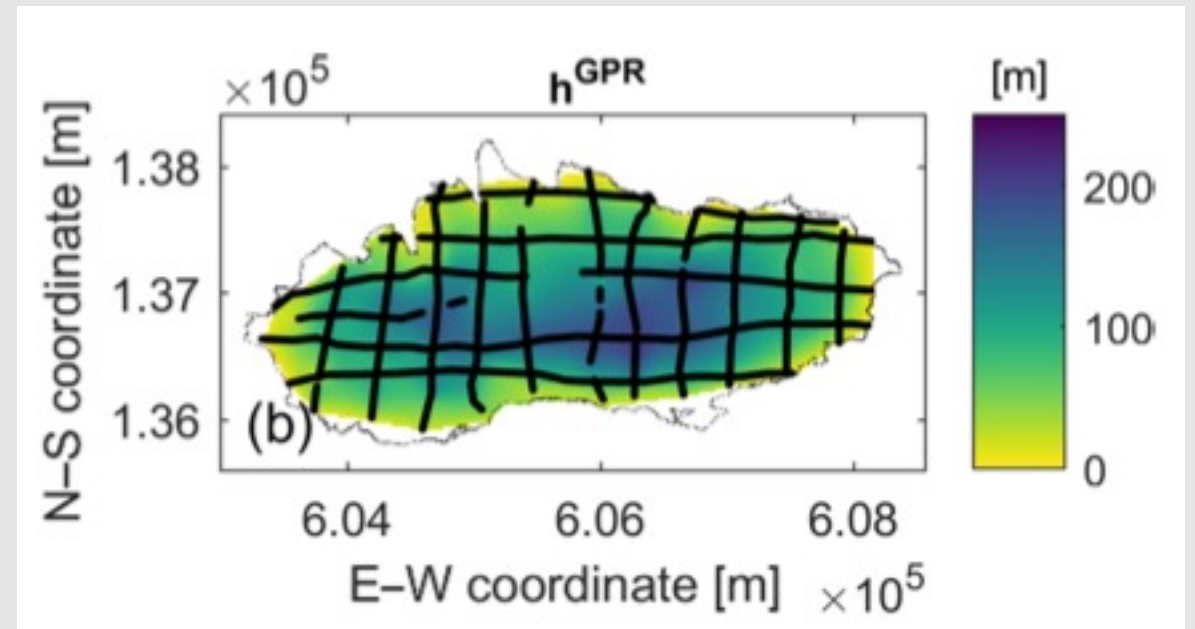
(Langhammer et al. 2018)



Le future: GPR aéroporté (air-borne)?

Hélicoptère

- Plus sûr qu'à pied
- Couverture d'une plus grande surface
- Grand espacement entre les profils
- Assez haut au dessus de la surface
→ perte d'énergie des ondes électromagnétiques
- Perte de résolution
- Couteux



(Langhammer et al. 2019)

Le future: GPR aéroporté (air-borne)?

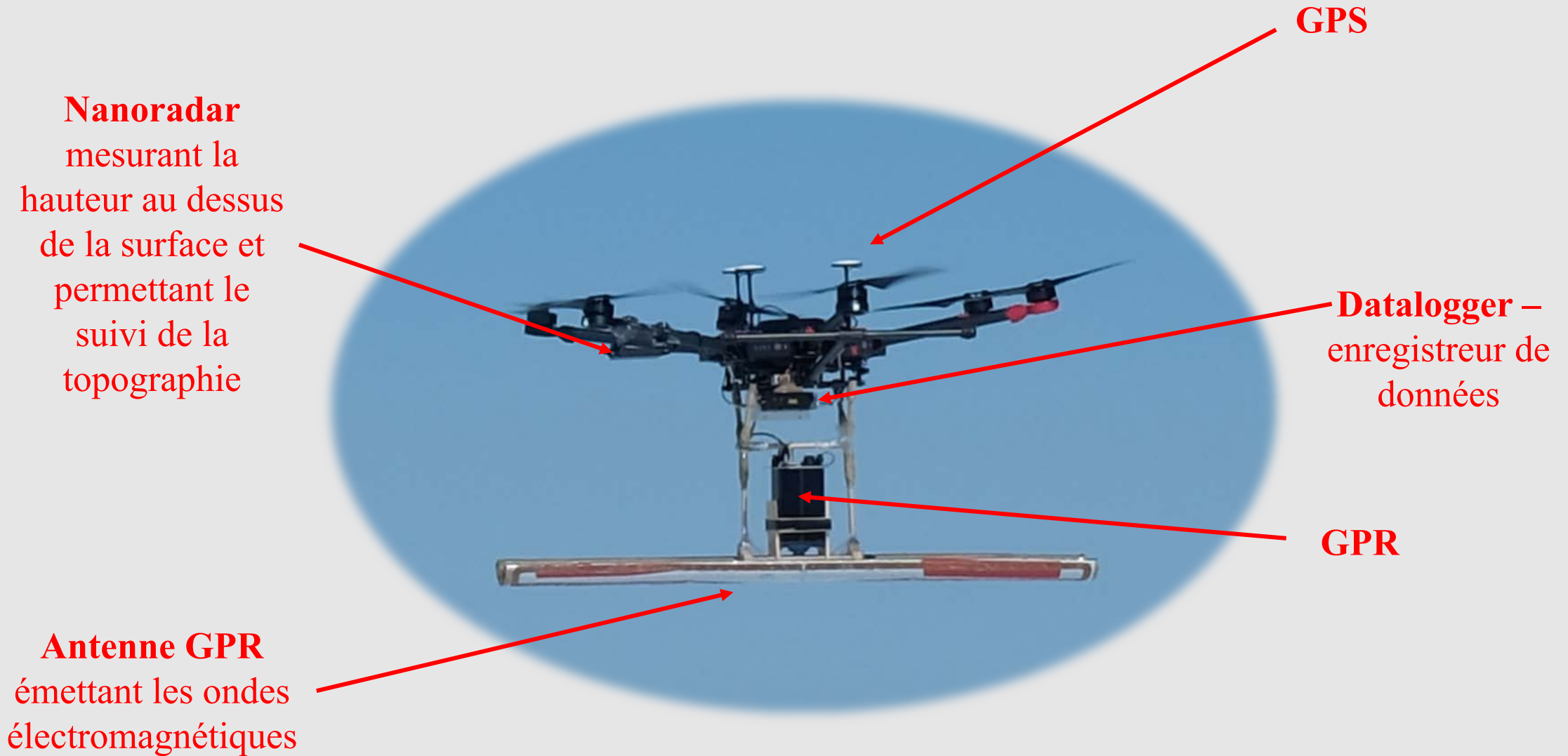
Hélicoptère

- Plus sûr qu'à pied
- Couverture d'une plus grande surface
- Grand espacement entre les profils
- Assez haut au dessus de la surface
→ perte d'énergie des ondes électromagnétiques
- Perte de résolution
- Couteux

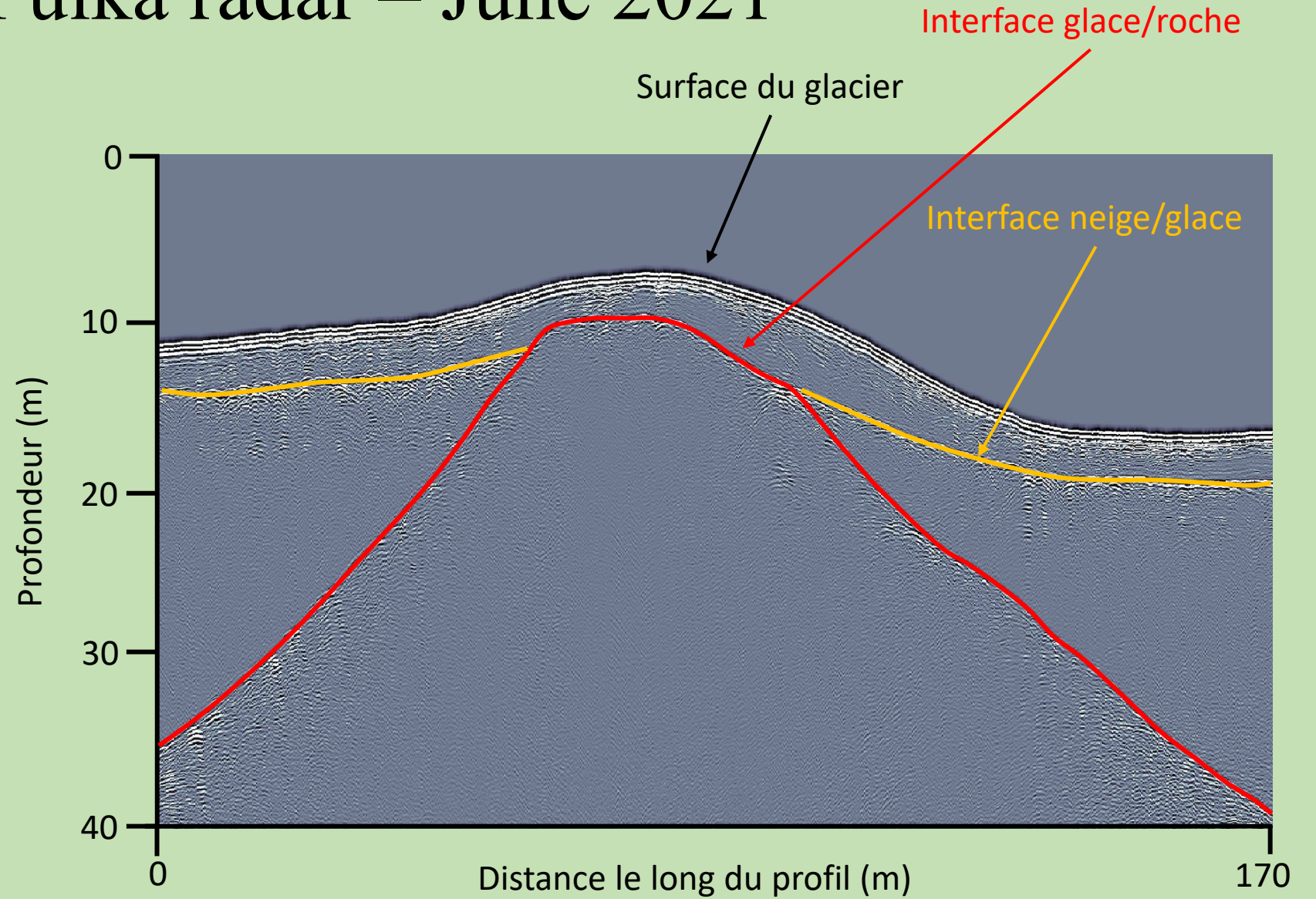
Drone

- Plus sûr qu'à pied
- Couverture d'une plus petite surface (mais toujours plus grande qu'à pied)
- Espacement entre les profils très dense
- Proche de la surface
- Bonne résolution
- Prix abordable

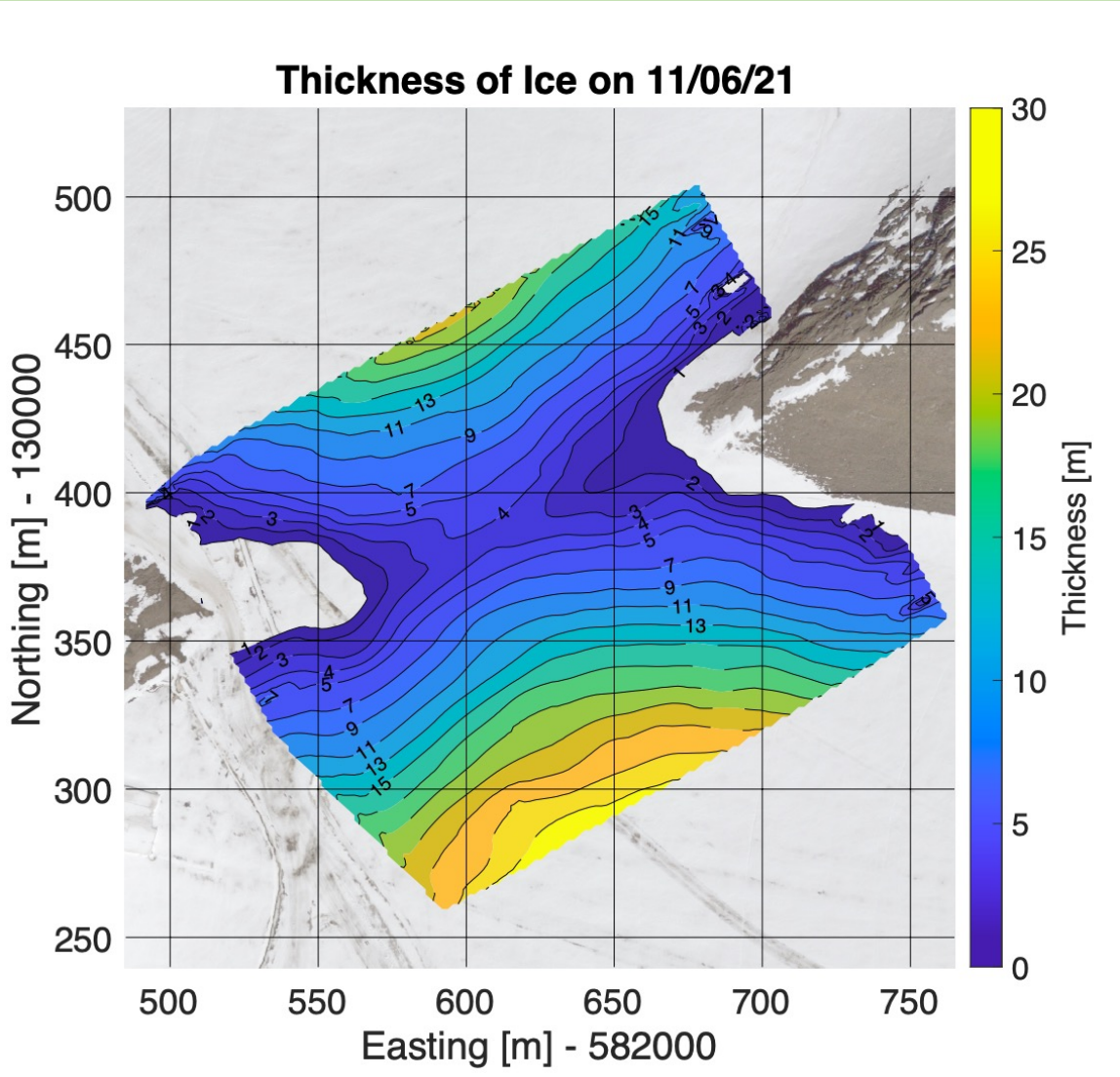
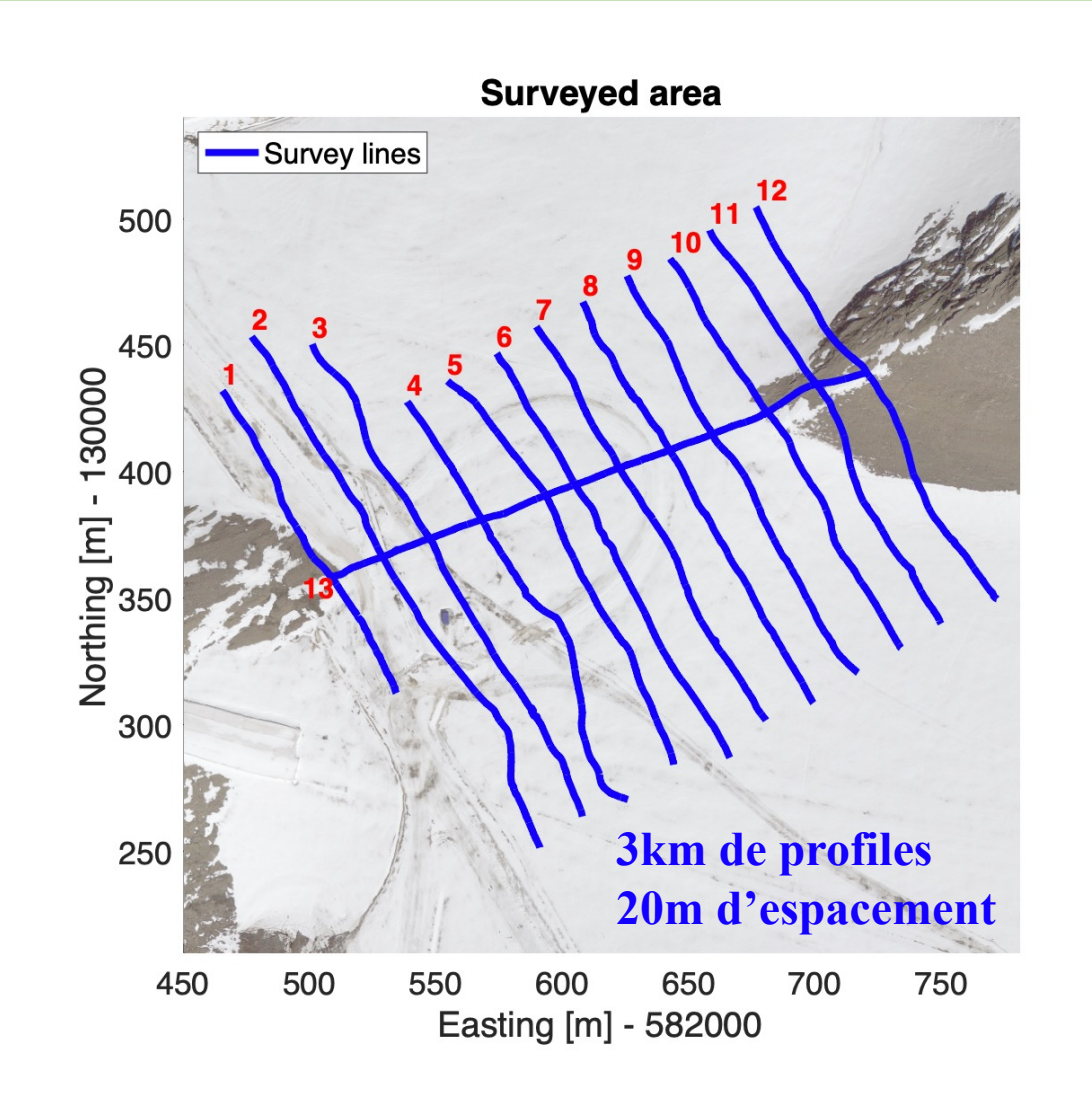
Notre système drone-radar



Pulka radar – June 2021



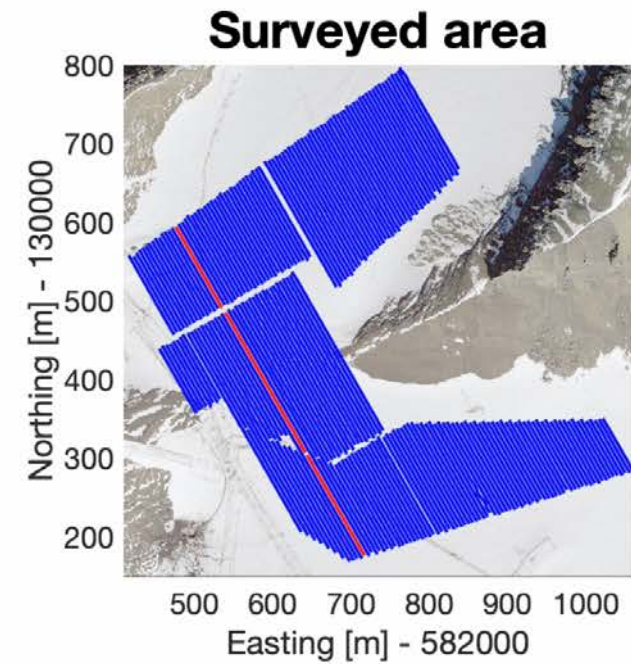
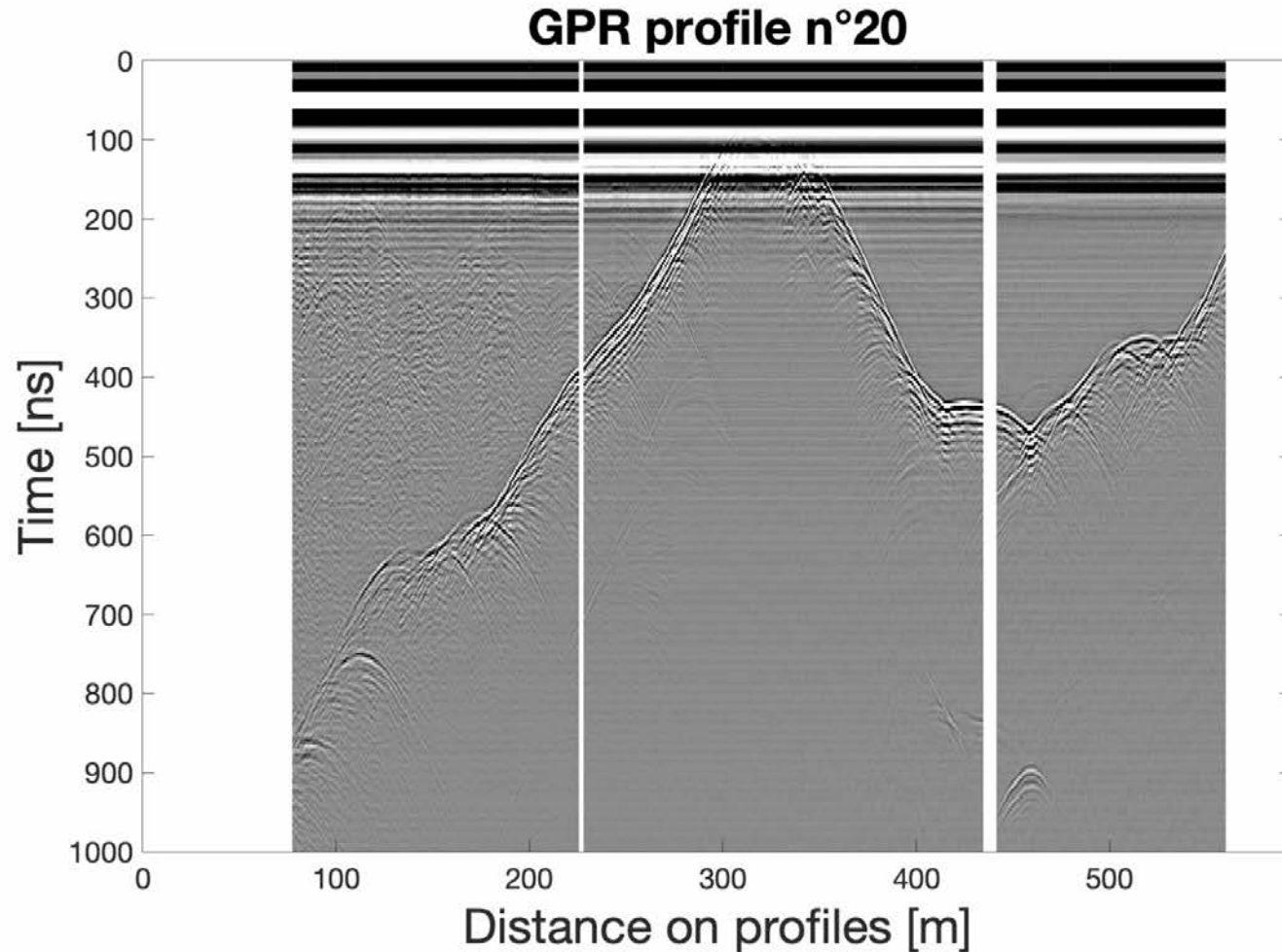
Pulka radar - Résultats



Drone radar – Septembre 2021

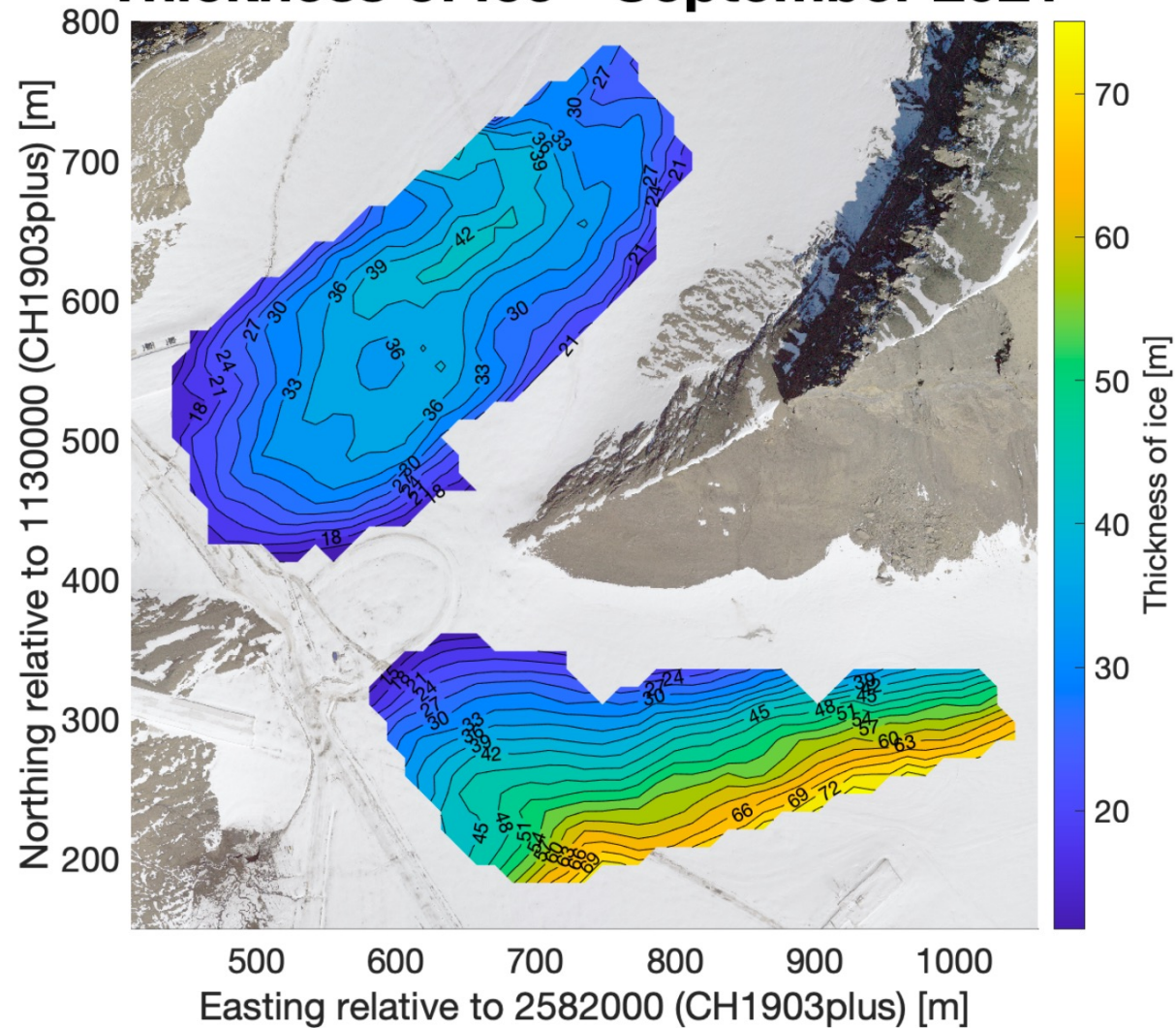


Drone radar – Résultats



Drone radar – Résultats

Thickness of ice - September 2021



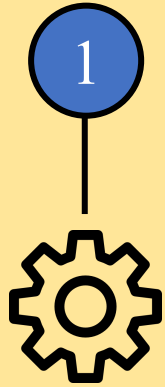
Les objectifs de nos projets

1

2

3

Les objectifs de nos projets



- Automatiser l'acquisition des données GPR 3D de haute résolution

Les objectifs de nos projets

1

2

3



- Revenir à interval régulier pour sonder exactement la même portion du glacier
 - Nous ajoutons donc une autre dimension aux données: une dimension de temps
 - Données 4D

Les objectifs de nos projets

1

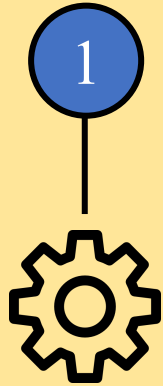
2

3



- Comparer les données dans le temps pour étudier les variations temporelles à l'intérieur et sous le glacier
 - dynamisme interne : comment la masse de glace bouge-t-elle?
 - hydrologie interne et sous-glaciaire : comment les canaux évoluent-ils par rapport aux saisons?

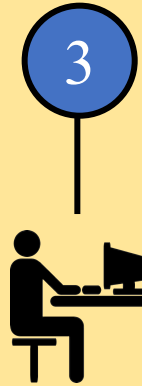
Les objectifs de nos projets



- Automatiser l'acquisition des données GPR 3D de haute résolution



- Revenir à interval régulier pour sonder exactement la même portion du glacier
 - Nous ajoutons donc une autre dimension aux données: une dimension de temps
 - Données 4D



- Comparer les données dans le temps pour étudier les variations temporelles à l'intérieur et sous le glacier
 - dynamisme interne : comment la masse de glace bouge-t-elle?
 - hydrologie interne et sous-glaciaire : comment les canaux évoluent-ils par rapport aux saisons?



Thank you for listening!
Time for questions...