

Identification des lacs glaciaires potentiellement instables et investigations de terrain

Mylène Bonnefoy (INRAE – IGE)
François-Luc Cimelière (ONF – RTM)
Fatima Karbou (Météo France)
Emmanuel Thibert (INRAE – IGE)



2024 © RTM

SOMMAIRE

1. Evaluation de la sensibilité des lacs au phénomène de vidange rapide (*François-Luc Cimelière*)
2. Etude de site : Lac du Pis (Bessans, 73) (*François-Luc Cimelière*)
3. Bathymétrie (*Mylène Bonnefoy*)
4. Géophysique (*François-Luc Cimelière*)
5. Relation surface / volume (*Emmanuel Thibert*)
6. Télédétection (*Fatima Karbou*)

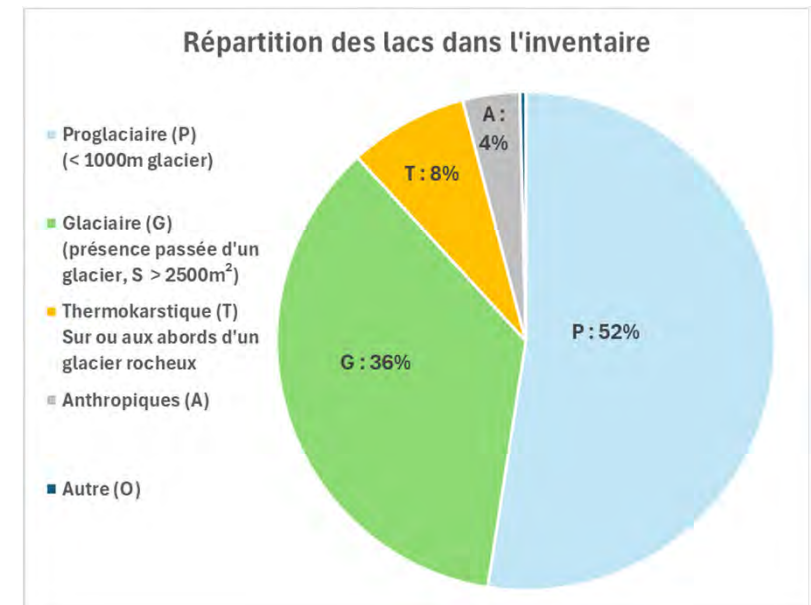


Evaluation de la sensibilité des lacs au
phénomène de vidange rapide
(François-Luc Cimelière, ONF – RTM)

1. Les données d'entrée

Inventaire des lacs « glaciaires » dans les Alpes Françaises (INRAE, 2022):

- Plus de 1300 lacs inventoriés
- Zone glaciaire ou périglaciaire
- Altitude > 2000m (> 1500m dans le Massif du Mont Blanc)
- ~50% dans le Massif de la Vanoise



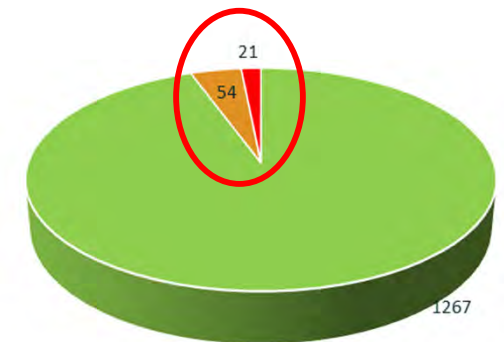
2. Sensibilité à l'aléa de vidange rapide (=> aléa torrentiel)

Caractéristiques analysées:

- **Nature du barrage**
 - Glace, matériaux morainiques, substratum rocheux
- **Possibilités de surverse**
 - Aléa gravitaire (vêlage glacier, écoulement rocheux)
 - Exutoire présent ou non
- **Intensité possible en cas de vidange**
 - Liée au volume d'eau retenu=> relation surface ~ volume

5,5% en sensibilité moyenne ou forte

sensibilité globale des 1342 lacs expertisés



- sensibilité faible à négligeable
- sensibilité moyenne
- sensibilité forte

Majoritairement lacs en contact avec un barrage de glace, évolutifs depuis 1950

3. Propagations d'un aléa torrentiel (=> atteinte d'enjeux bâtis)

Utilisation de FlowR:

- 3 scénarios => 3 jeux de paramètres
 - => jeux de paramètres représentant différents niveaux de propagation vers l'aval
- Pour chaque lac (parmi 75) attribution d'1 scénario de référence selon:
 - Estimation d'un volume de vidange
 - Configuration des terrains à l'aval
- Croisement des couches d'emprises avec les enjeux bâtis
 - Focalisation sur une dizaines de lacs

Le plus souvent cette analyse « grande échelle » nécessite d'être affinée:

- Volume réel du lac => **Bathymétrie**
- Topographie sous glaciaire, nature des matériaux du barrage, ... => **Géophysique**
- Scénarios de propagation affinés => Etudes hydrauliques, modélisations...

Etude de site : Lac du Pis (Bessans, 73)



Lac du Pis:

- Lac proglaciaire (alt. 2900m)
- Barrage morainique
- Superficie x4 en 20 ans
- Lave torrentielle (faible intensité) en 2011 suite à vêlage du glacier

➤ **Sensibilité surverse !**



Questions (non exhaustives):

- Volume et topographie immergée ?
- Présence de glace dans la moraine ?
- Profondeur du substratum rocheux à l'exutoire ?



➔ **Bathymétrie**

➔ **Géophysique**

Bathymétrie des lacs glaciaires – le cas du lac du Pis

Mylène Bonnefoy-Demongeot et Emmanuel Thibert

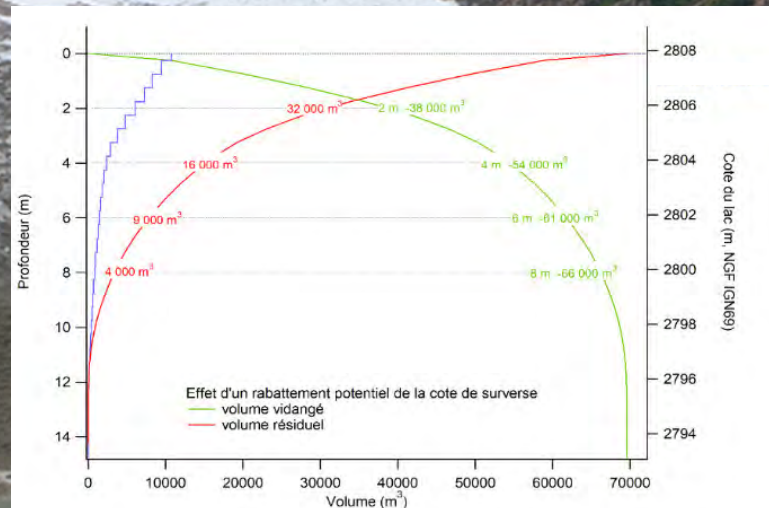
Institut des Géosciences de l'Environnement (Univ. Grenoble Alpes)

Séminaire PAPROG - 14 novembre 2025, Grenoble

Intérêt de la bathymétrie

Mesurer les profondeurs et reconstituer le relief du fond d'un lac

- ⇒ volume d'eau :
 - ⇒ intensité du risque,
- ⇒ profondeur maximale :
 - ⇒ pression hydrostatique à la base des berges,
 - ⇒ hauteur de refoulement pour pompage / siphonnage.
- ⇒ topographie du fond du lac, son évolution si présence de glace,
- ⇒ répartition des volumes en fonction de la profondeur :
 - ⇒ volumes évacués/résiduels en fonction de l'abaissement de la cote.



Bathymétrie : drone aquatique

Multiboat : portable

- Deux flotteurs, un châssis, deux hélices,
- Un échosondeur : monofaisceau, monofréquence (200 kHz), mesure à l'aplomb (30 cm min et 100 m max), cône d'émission 6° avec fréquence de sondage 10 Hz (soit 10 mesures/sec),
- Un GPS mobile relié à une base installée sur une berge du lac,
- Une antenne radio pour avoir la correction en temps réel des coordonnées,
- Un ordinateur de bord connecté à distance via un PC,
- Une liaison radio pour le pilotage à distance.

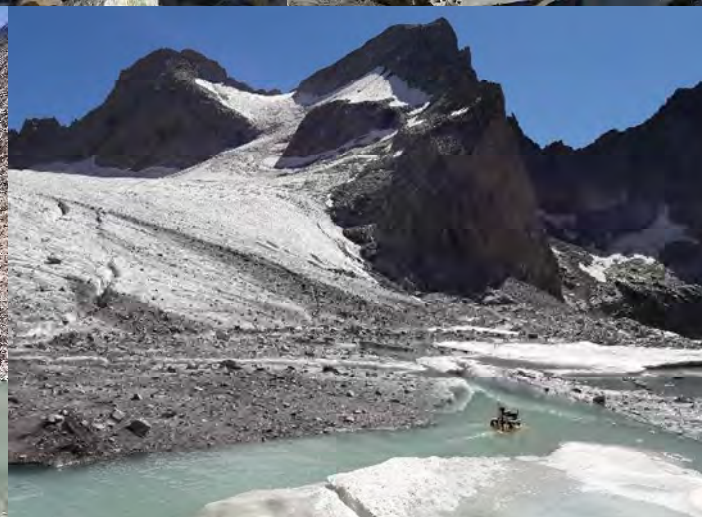


Bathymétrie : méthode de mesure

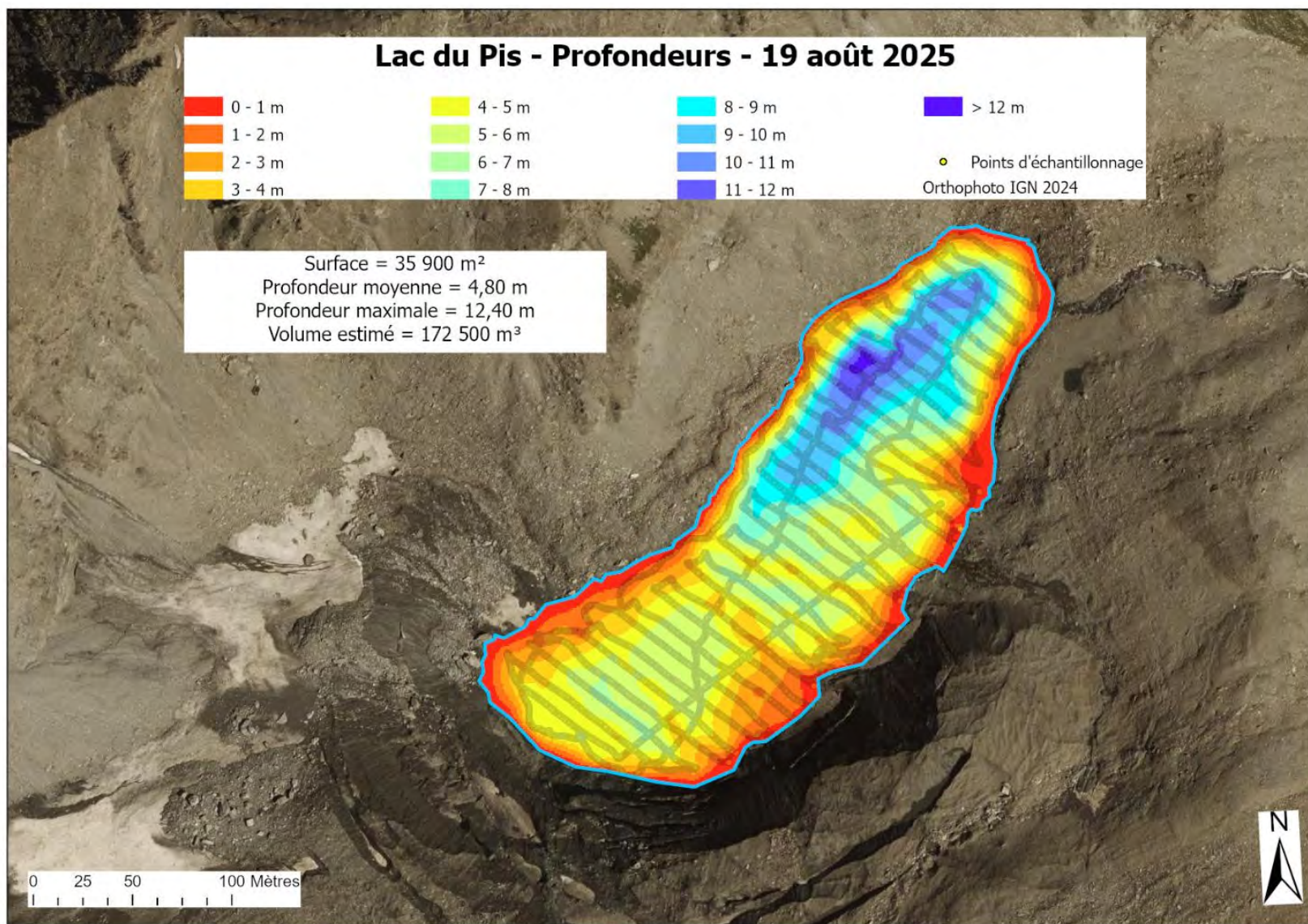
- Méthode :
- Pilotage le plus souvent manuel (lacs évolutifs / périmètre inconnu, obstacles, risques de chutes de pierre depuis les berges...),
 - 1^{er} passage / contour du lac puis passage en bandes régulières,
 - Reconstitution du périmètre du lac : GPS différentiel, MNT drone aérien ou orthophoto IGN.



- 1^{er} passage / contour du lac puis passage en bandes régulières,
- Reconstitution du périmètre du lac : GPS différentiel, MNT drone aérien ou orthophoto IGN.



Bathymétrie : résultats





Investigations Géophysiques

(François-Luc Cimelière, ONF – RTM)

Lac du Pis : Géophysique

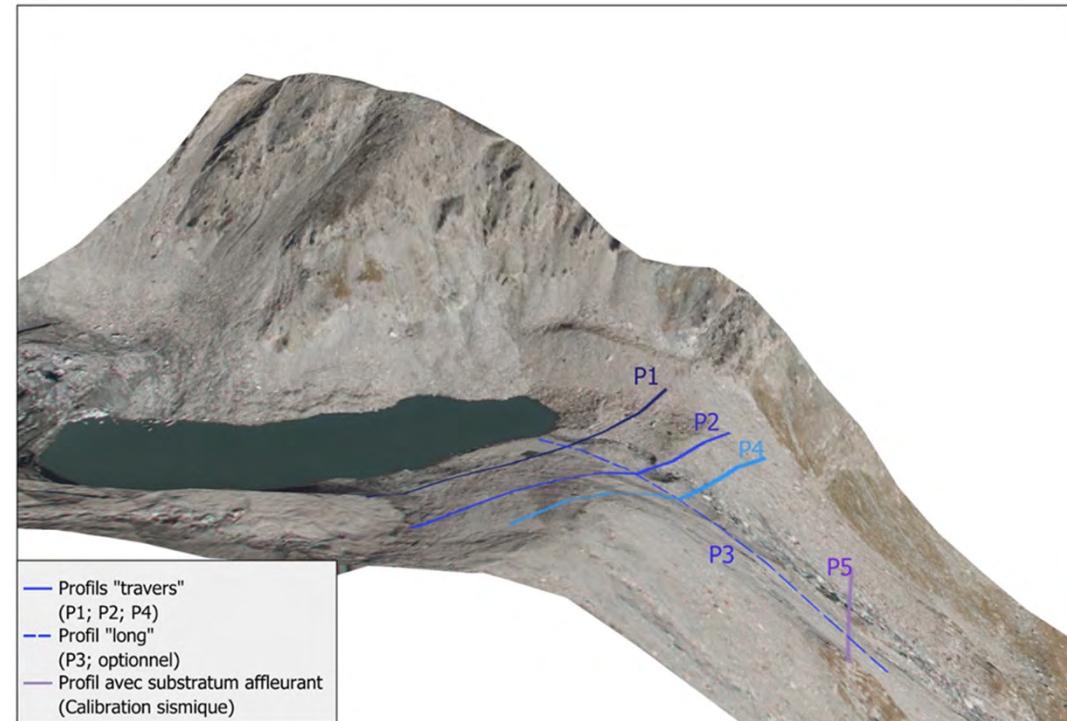


Questions posées:

- Possibilités d'érosion interne de la moraine si présence massive de glace ?
- Epaisseur max de matériaux érodables en cas de surverse ?

Apports de la géophysique (BE Naga Geophysics):

- Méthodes électriques:
 - Combinaison résistivité – chargeabilité donne des informations sur la présence de glace
- Méthodes sismiques:
 - Fournissent des informations sur la localisation de l'interface matériaux morainiques / substratum rocheux

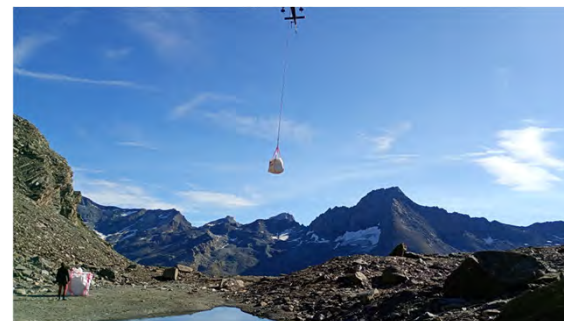


Lac du Pis : Géophysique



Campagne de terrain réalisée les 25 & 26 août 2025:

- Mission envisagée de 4 à 5 jours en autonomie
- Accès hélicoptéré
- Incertitudes météo imposent de condenser sur 2 jours !



Profil électrique

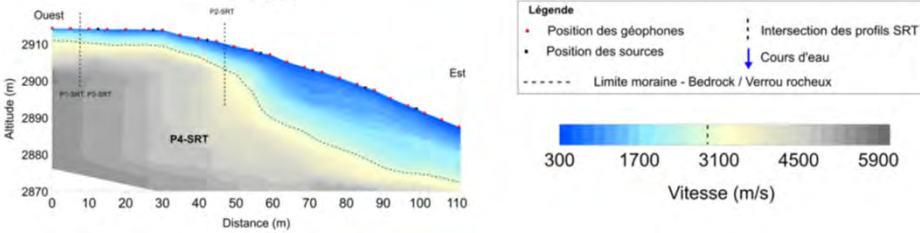
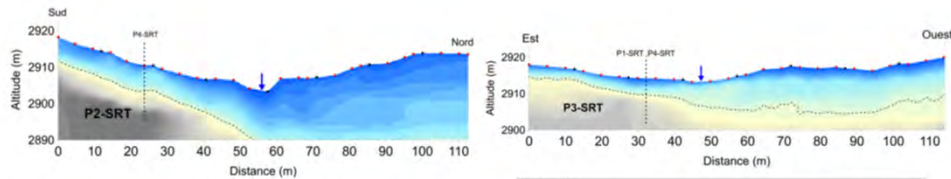
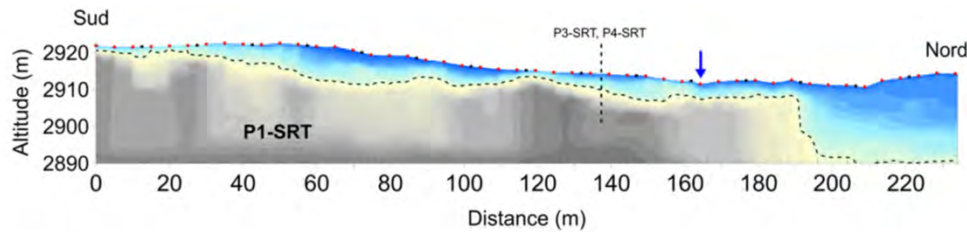


Profil sismique

Lac du Pis : Géophysique

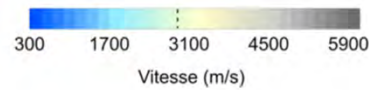


Données acquises en cours d'analyse...

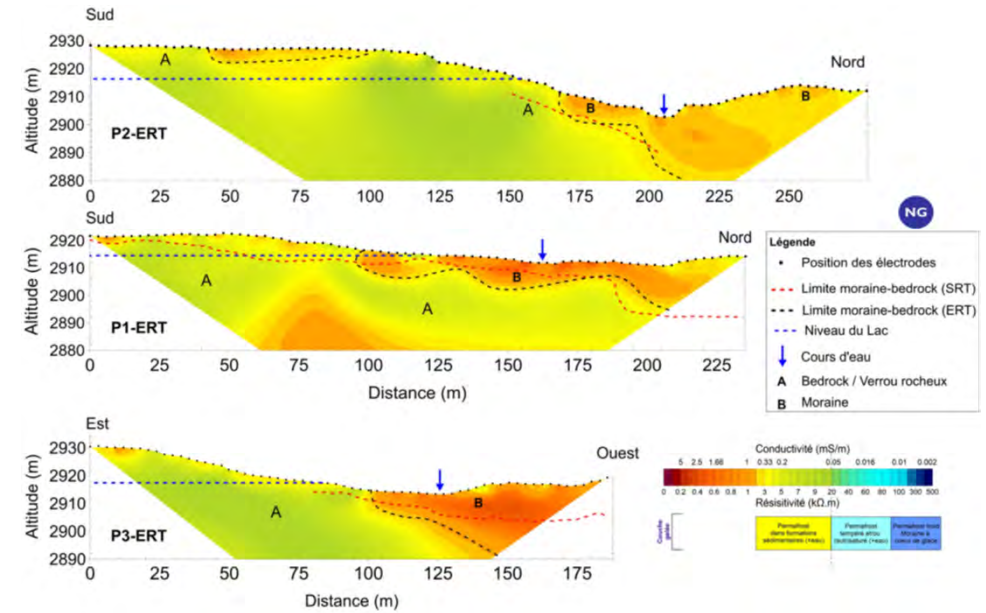


Légende

- Position des géophones
- Position des sources
- Limite moraine - Bedrock / Verrou rocheux
- Intersection des profils SRT
- ↓ Cours d'eau



Profils en sismique réfraction, ©NAGA GEOPHYSICS



Profils en résistivité, ©NAGA GEOPHYSICS

Vers une relation surface-volume pour les lacs glaciaires

Emmanuel Thibert et Mylène Bonnefoy-Demongeot

Institut des Géosciences de l'Environnement (Univ. Grenoble Alpes)

Séminaire PAPROG - 14 novembre 2025, Grenoble

Estimation du volume et de la profondeur maximale des lacs glaciaires à partir de leurs surfaces

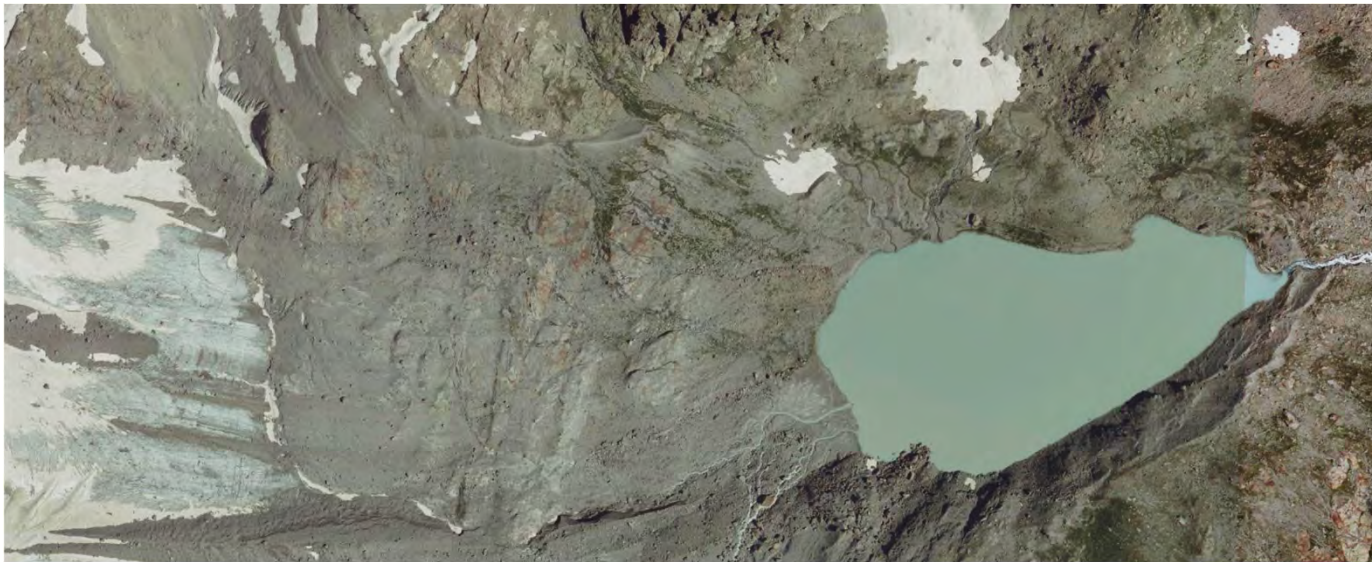
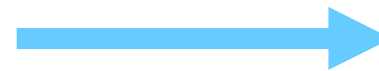


Image aérienne ou satellite métrique

Surface connue



Quel volume ?

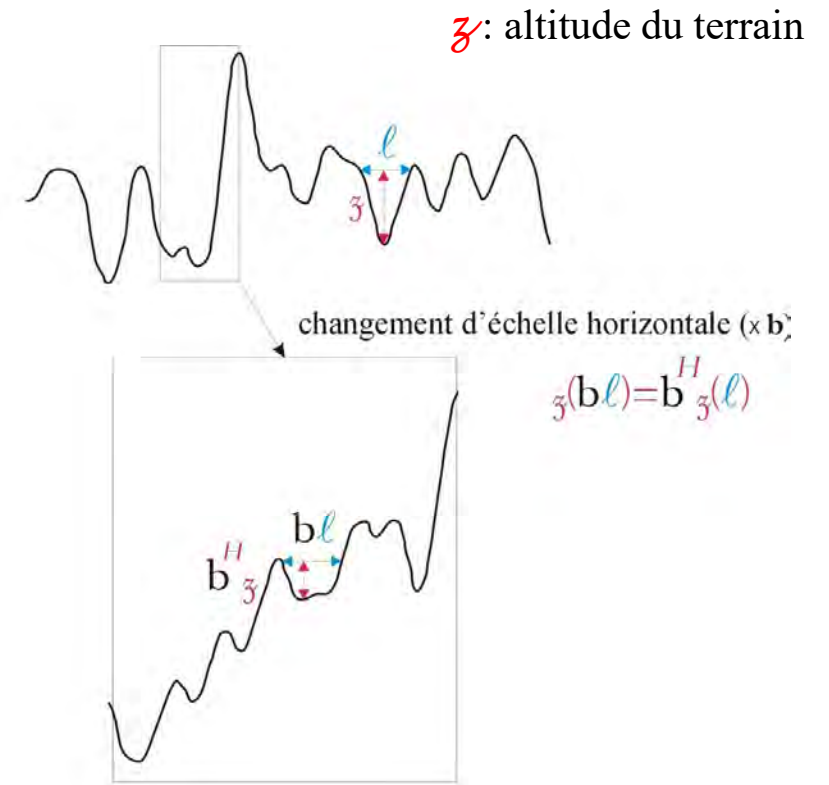
Une relation surface-volume pour les lacs ?

Surface terrestre décrite par une stat. auto-affine (fractale)

Gamme d'échelle: du m au km

Il existe une relation entre l'échelle horizontale et verticale

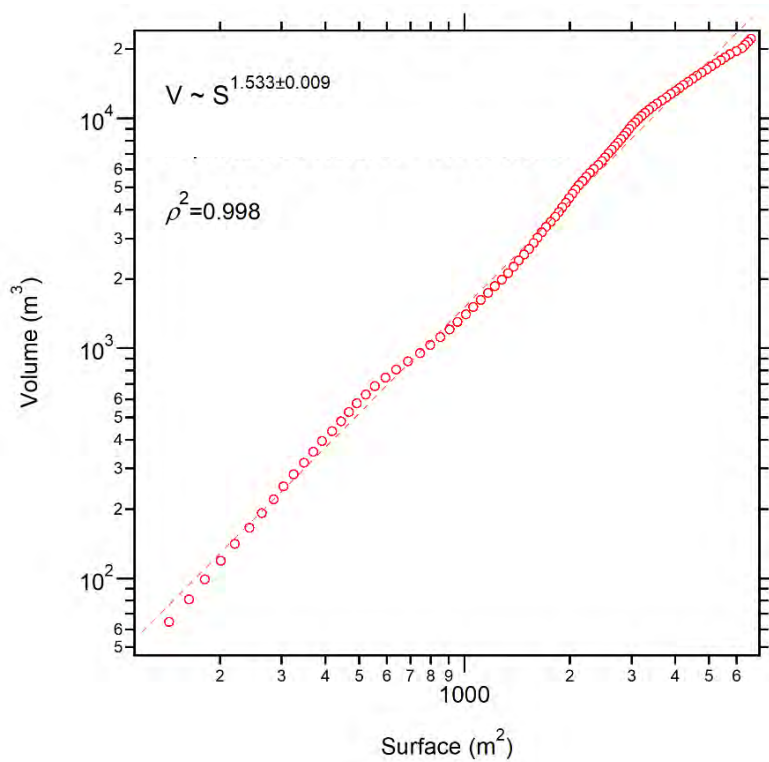
Relation surface-volume pour les lacs: $V \sim S^\alpha$
 $1 < \alpha < 1.5$



si on change l'échelle horizontale d'un facteur b
la dimension verticale z change d'un facteur b^H

Relation surface volume lac du Rosolin (Tignes)

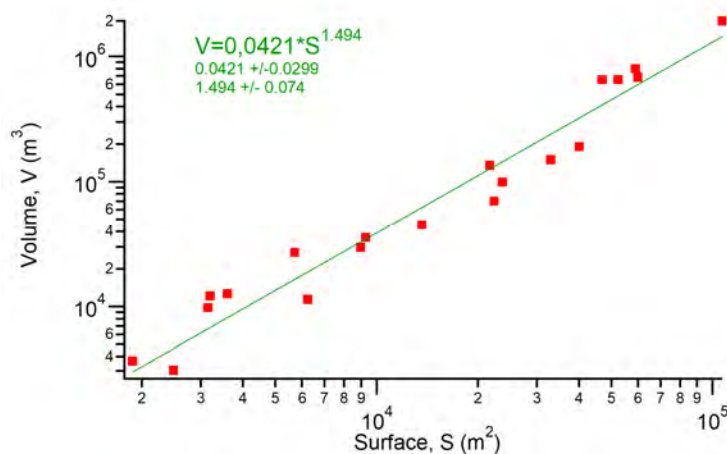
lac du Rosolin en 2024



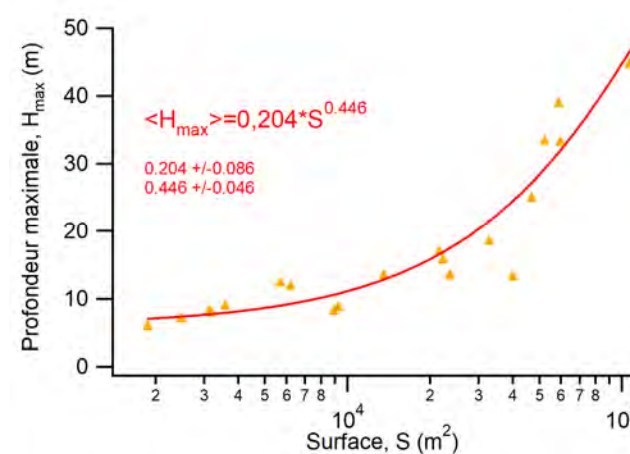
- Test de dépendance sur la distribution des surfaces et volumes d'un lac obtenue par bathymétrie
- Échelle 200-6000 m²
- Coefficient α voisin de 1.5

→ test sur un échantillonnage de lacs où l'on dispose de bathymétries

Relation surface volume



Profondeur max.

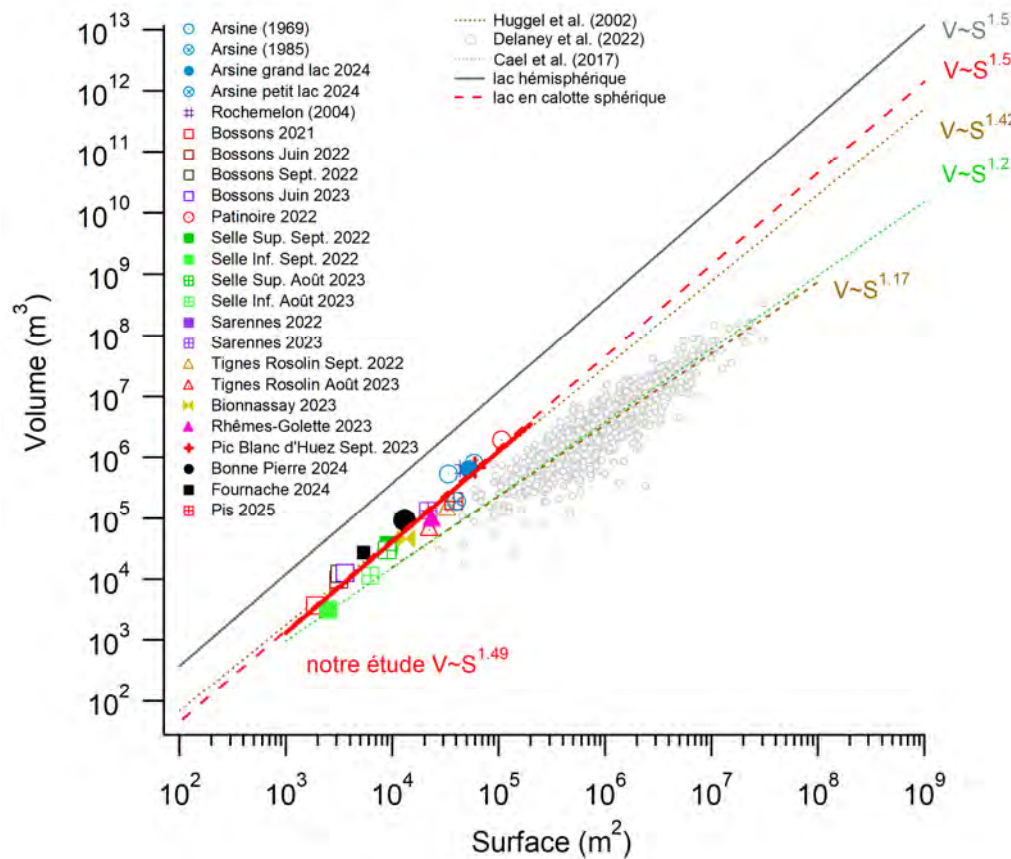


Résultats sur 20 lacs glaciaires de bathymétries connues, surfaces entre 0.2 et 10.7 ha

Surface	Volume	Profondeur max.
0,1 ha	1300 m ³	4 m
1 ha	40 000 m ³	12 m
10 ha	1,2 Mm ³	35 m

Relation surface volume dans la bibliographie

$$V(S) = \alpha S^\beta$$



- Extension/consolidation de l'étude de Huggel aux surfaces < 1 ha
- Constat de sous-estimation des volumes par les relations valables à plus grande échelle
- Dépendance analogue à une géométrie de fond de lac en calotte sphérique (hémisphère remplie à 12%)
- Exposant α élevé $\alpha = 1,49$
- Surface à faible rugosité, peu fractale

Téledétection

(Fatima Karbou, Météo France)



Télédétection spatiale

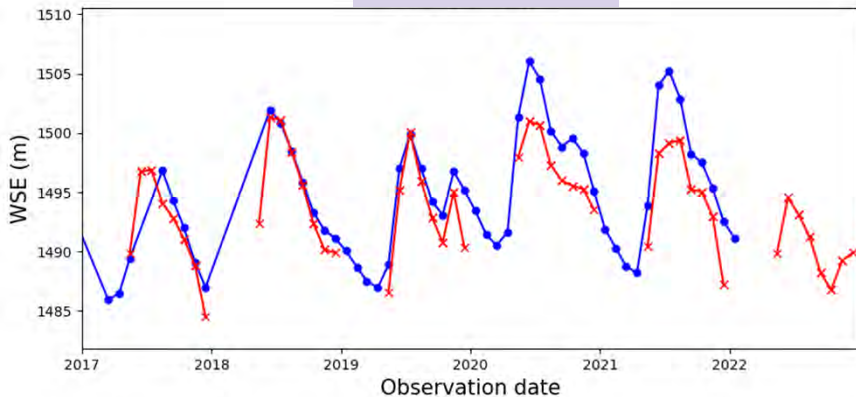
Lacs Arsines

Observation des lacs gelés par Sentinel-1 et nouvelle méthode pour estimer les superficies des lacs glaciaires par segmentation dynamique ([Karbou et al. 2025](#))

Estimation des changements de hauteurs d'eau des lacs par fusion d'observations spatiales (Sentinel-1, SWOT)

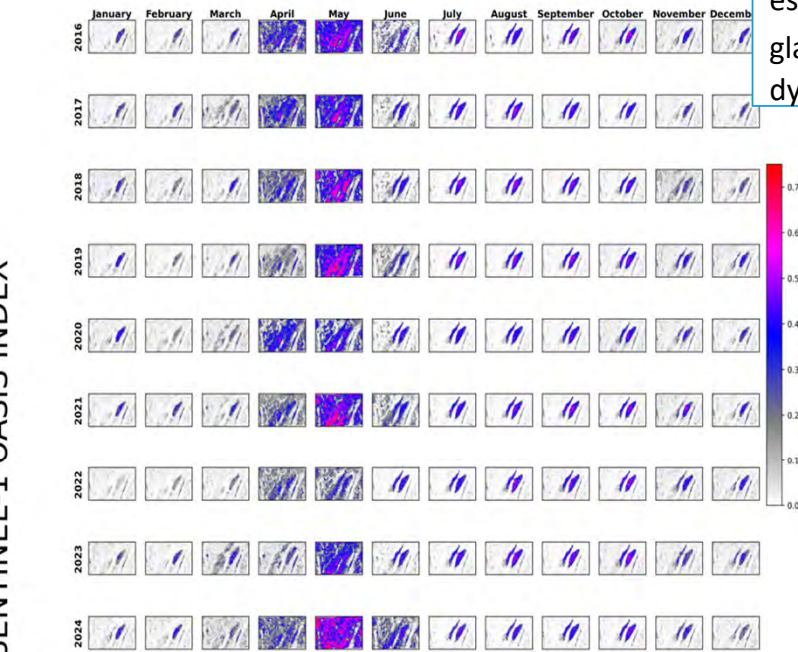
- Superficies estimées par Sentinel-1 (indice oasis)
- Hypsometry function (Aires versus Hauteurs) à partir des mesures SWOT (données depuis 2023)
- Hauteurs d'eau déduites de Sentinel-1 et comparaison avec mesures de pression au lac Lauvittel ([Charrier et al. 2025](#))

Lac Lauvittel

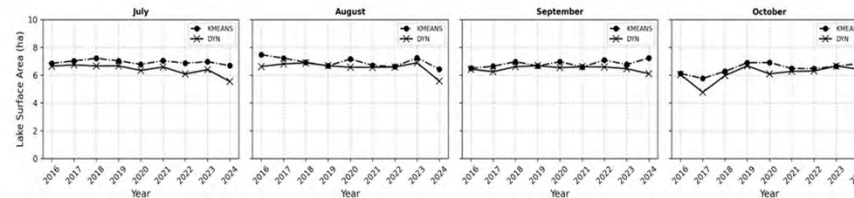


● Sentinelles pressure sensor ✕ Estimation from hypsometry function from SWOT & S1

SENTINEL-1 OASIS INDEX



Arsines lake (2016-2024)



SENTINEL-2 RGB TrueColors

