

Estimation du stockage d'eau sous-glaciaire *potentiel* par des barrières hydrauliques:

Le cas du glacier de Bonne Pierre

Christophe Ogier *et al.*

Poche d'eau glaciaire ?

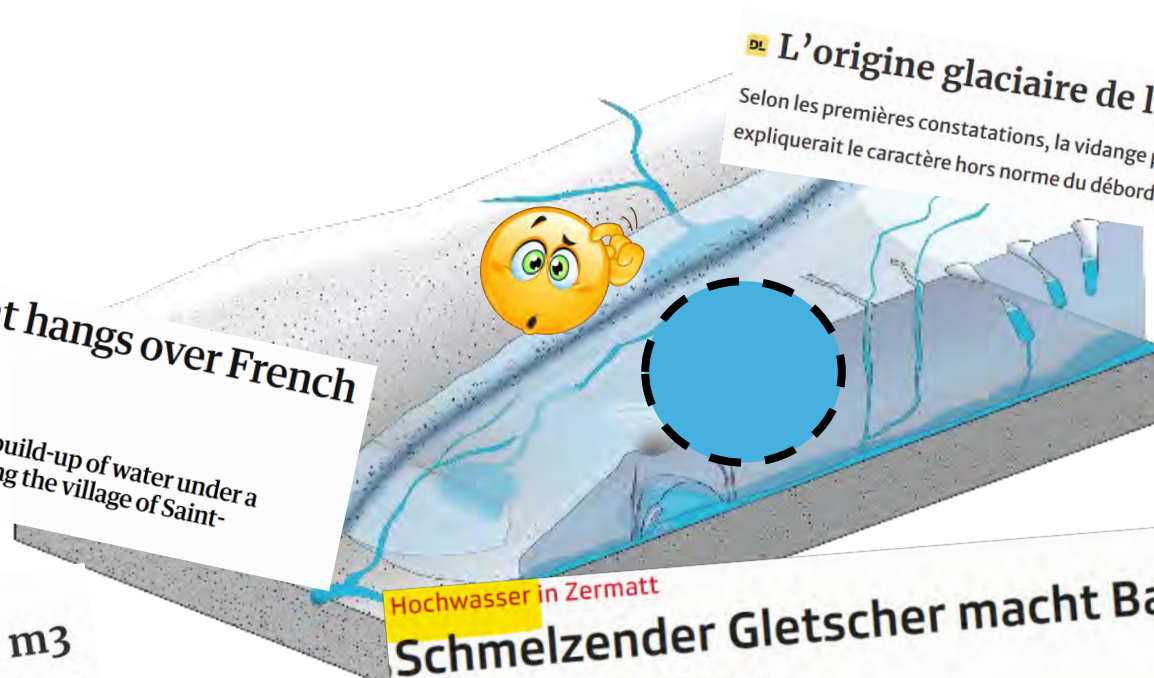
The Guardian
Deadly flood threat hangs over French Alpine village
Scientists are racing to prevent a build-up of water under a glacier on Mont Blanc from flooding the village of Saint-Gervais

Haute-Savoie
Un réservoir de 60 000 m³
d'eau détecté sur le glacier
de Tête Rousse

Hochwasser in Zermatt

Schmelzender Gletscher macht Bach zum reissenden Fluss

L'origine glaciaire de la catastrophe de La Bérarde se précise
Selon les premières constatations, la vidange progressive d'une poche d'eau formée par la fonte du glacier de Bonne Pierre expliquerait le caractère hors norme du débordement du torrent des Étançons qui a ravagé la Bérarde.



Poche d'eau glaciaire ?

= une cavité remplie d'eau qui se situe dans la glace ou sous la glace (en contact du lit rocheux) qui a le potentiel de causer une crue

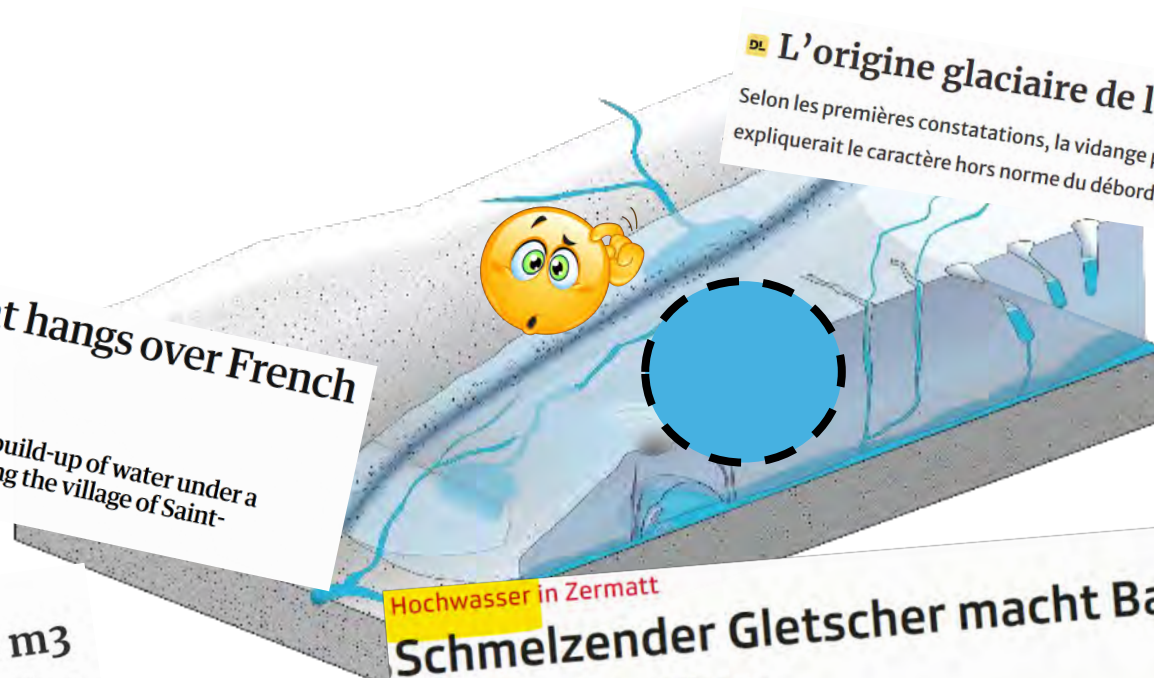
The Guardian
Deadly flood threat hangs over French Alpine village
Scientists are racing to prevent a build-up of water under a glacier on Mont Blanc from flooding the village of Saint-Gervais

Haute-Savoie
Un réservoir de 60 000 m³ d'eau détecté sur le glacier de Tête Rousse

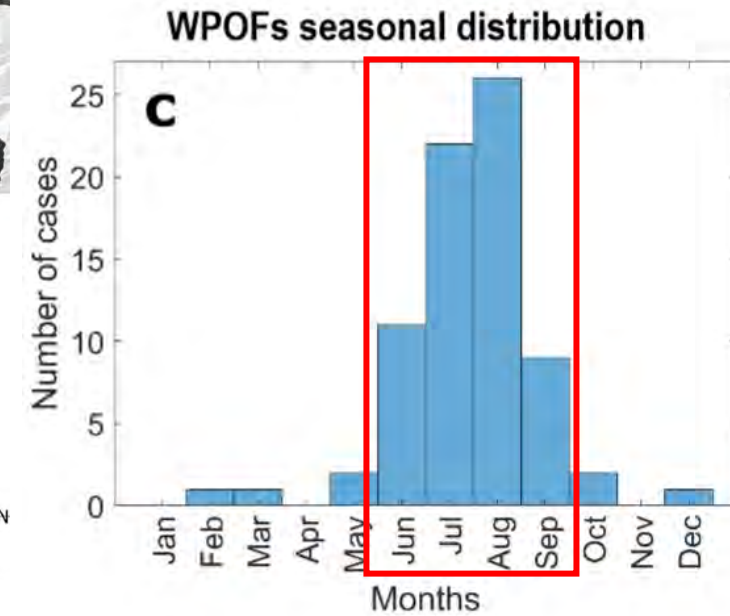
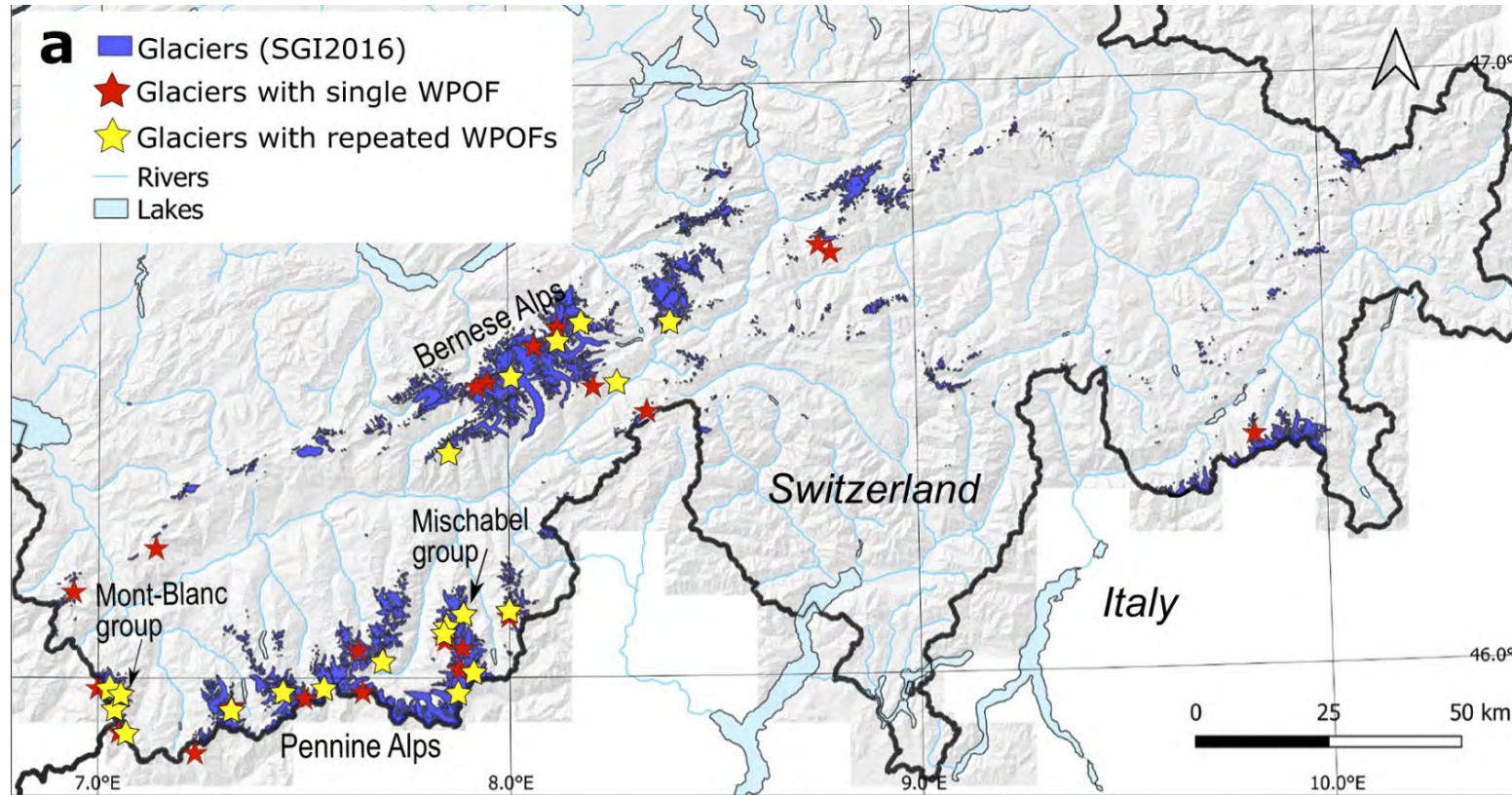
Hochwasser in Zermatt

Schmelzender Gletscher macht Bach zum reissenden Fluss

DL L'origine glaciaire de la catastrophe de La Bérarde se précise
Selon les premières constatations, la vidange progressive d'une poche d'eau formée par la fonte du glacier de Bonne Pierre expliquerait le caractère hors norme du débordement du torrent des Étançons qui a ravagé la Bérarde.

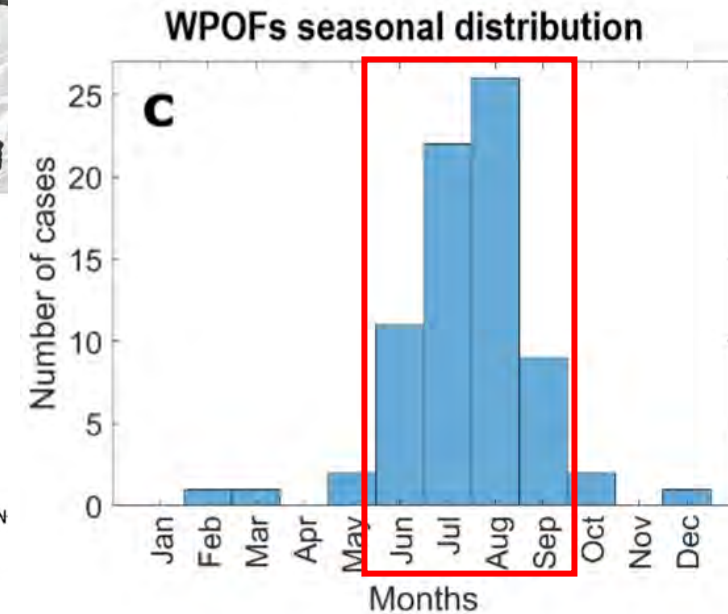
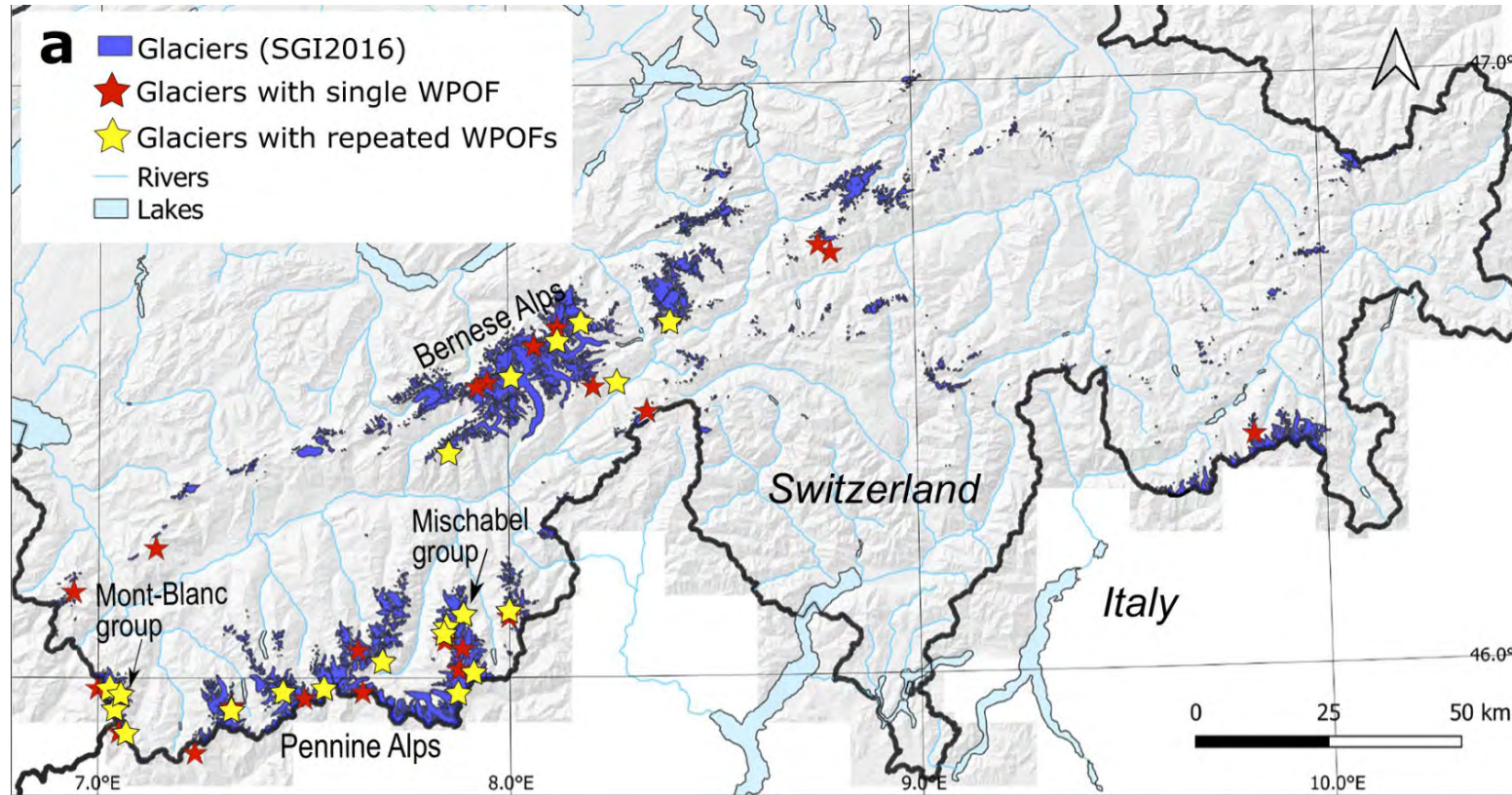


91 ruptures de **poches d'eau** recensées dans les Alpes suisses



Ogier et al., 2025

91 ruptures de poches d'eau recensées dans les Alpes suisses

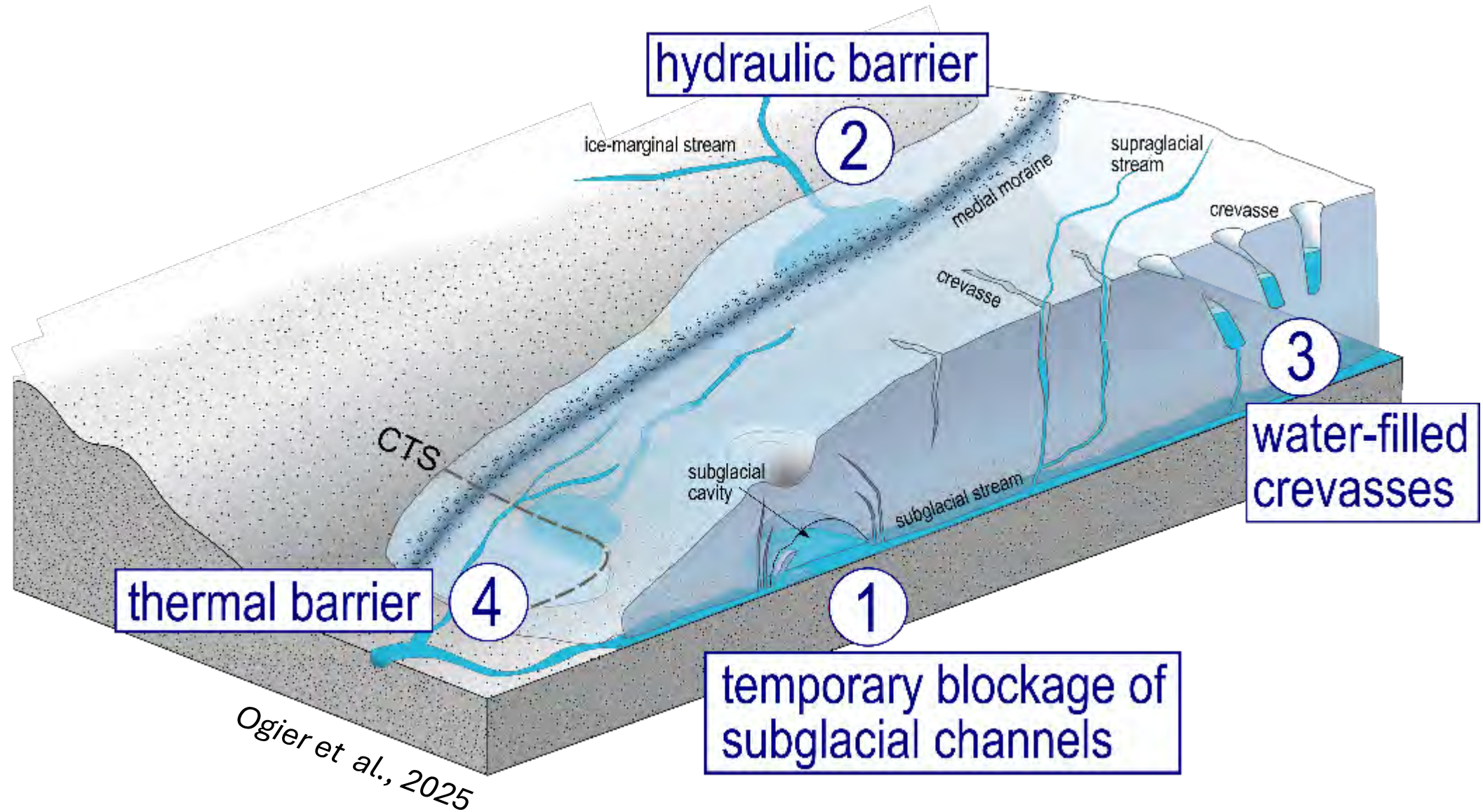


Ogier et al., 2025

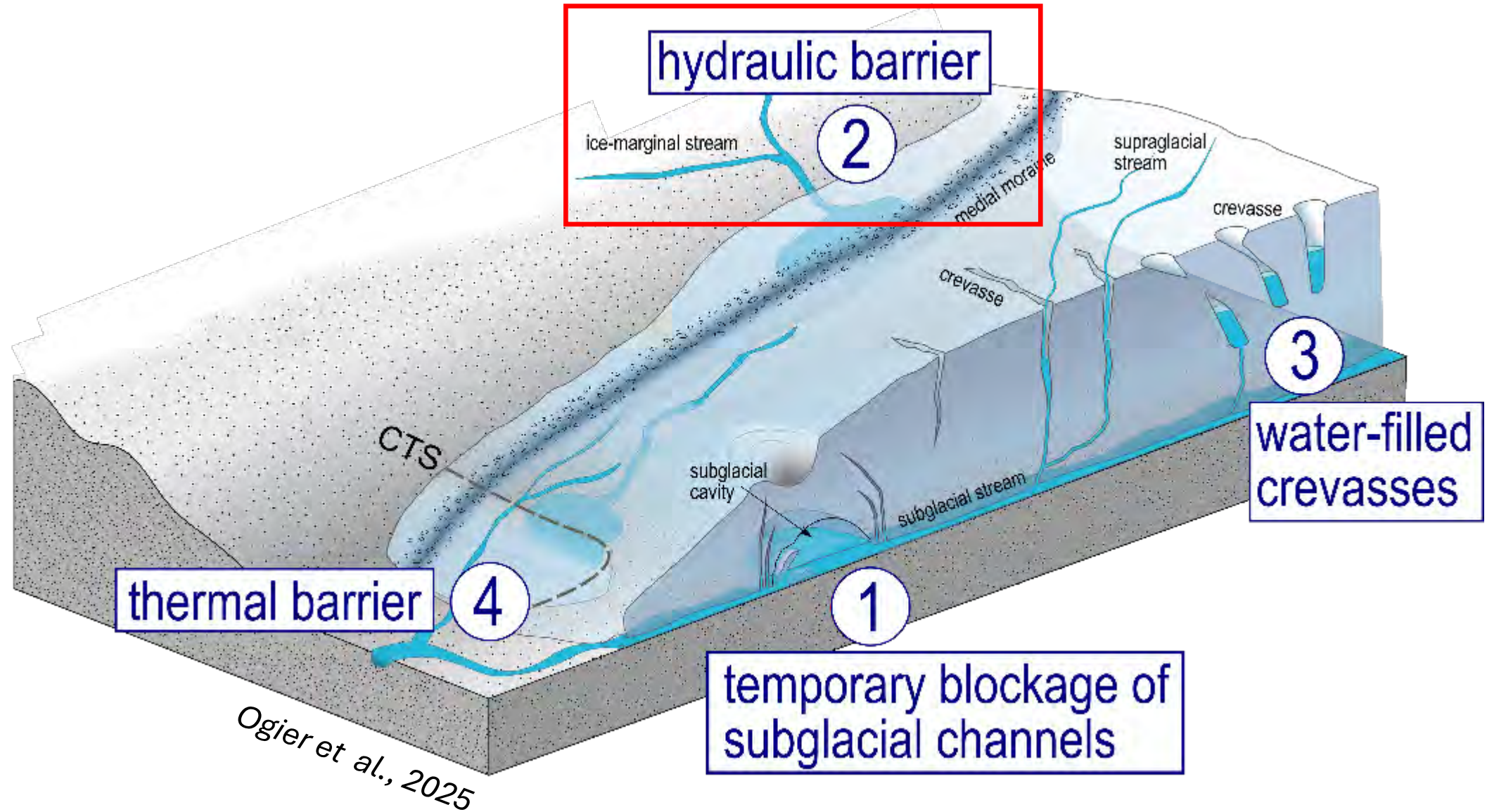
Des **températures élevées** (souvent) et des **précipitations intenses** (parfois = 25%) précèdent les événements de vidange de poches d'eau sous-glaciaires.

-> Influence des conditions météorologiques sur la rupture des poches d'eau.

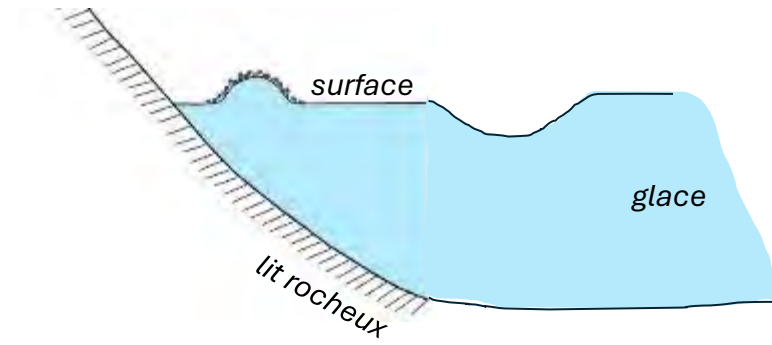
Les différents mécanismes de formation et de rupture des **poches d'eau sous-glaciaires**



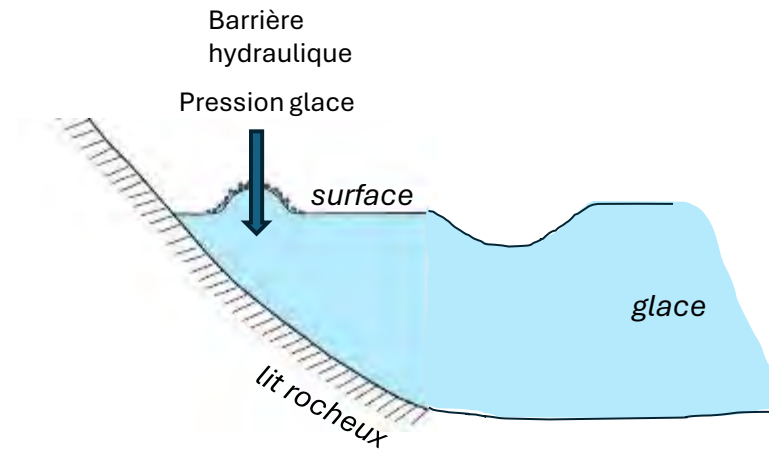
Les différents mécanismes de formation et de rupture des **poches d'eau sous-glaciaires**



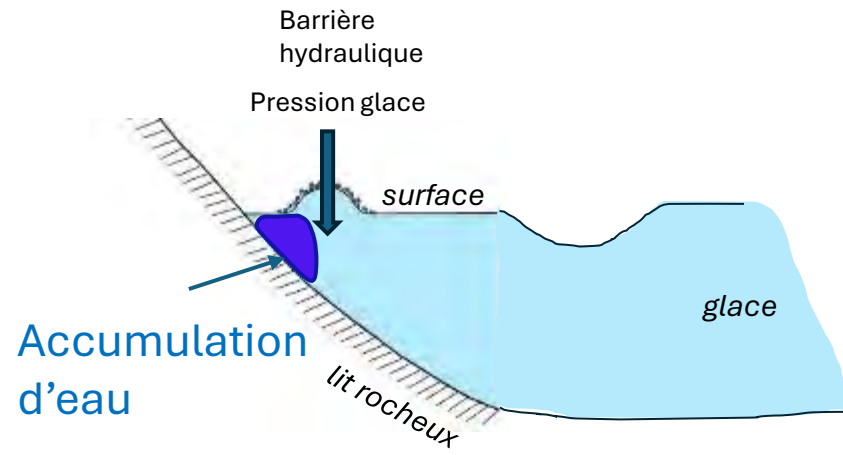
Barrières hydrauliques



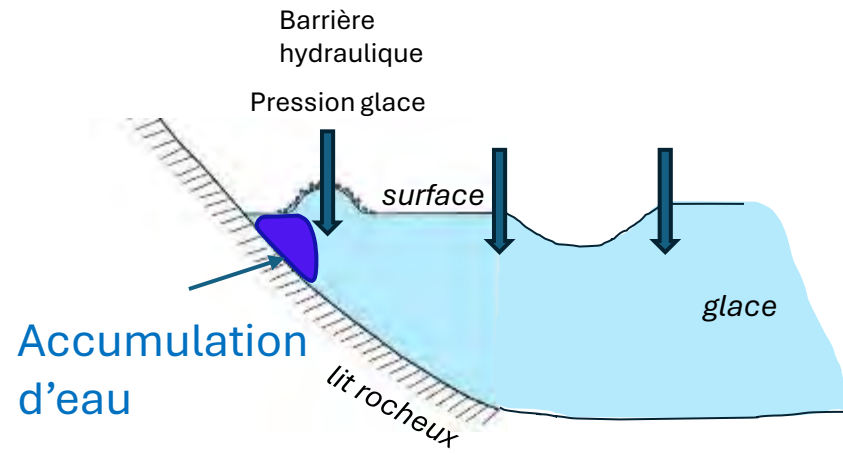
Barrières hydrauliques



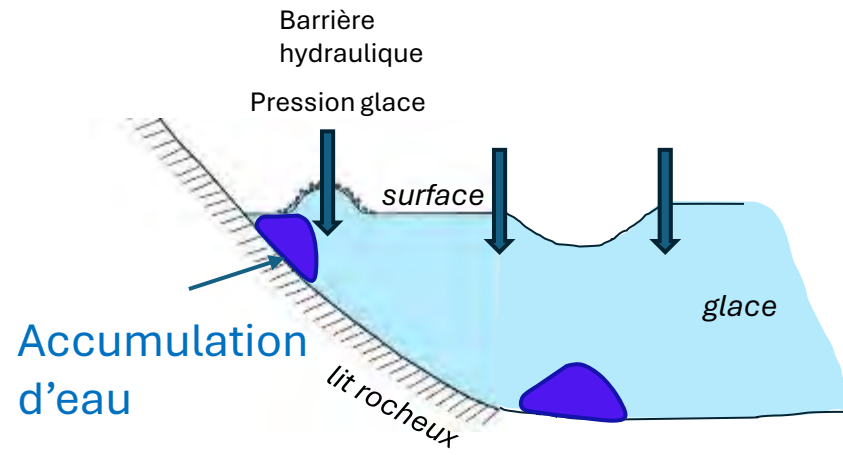
Barrières hydrauliques



Barrières hydrauliques

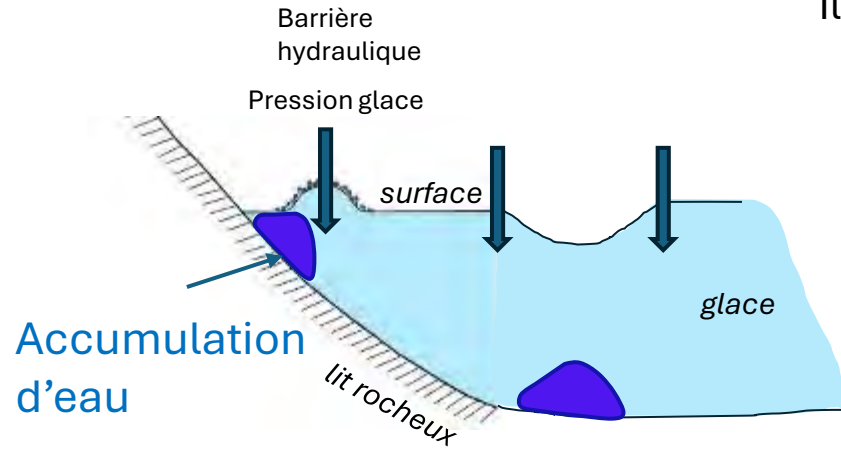


Barrières hydrauliques



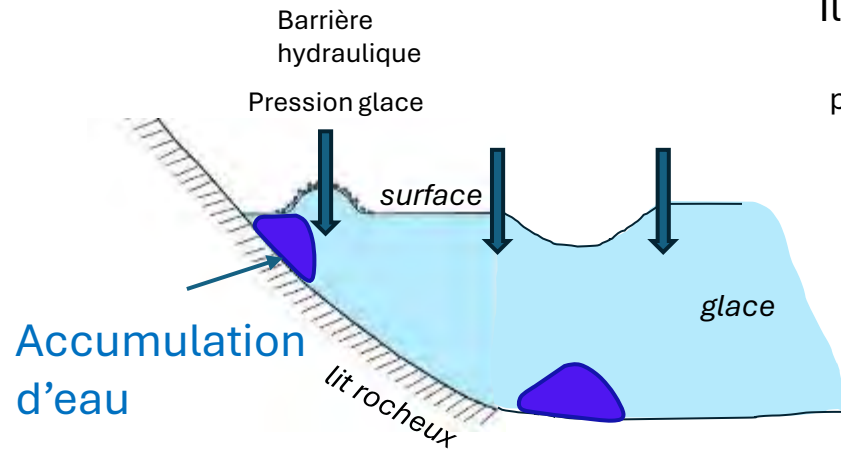
Barrières hydrauliques

Le **potentiel hydraulique Φ** control les écoulement sous glaciaire.
Il dépend de la pression de l'eau et de l'altitude du lit rocheux



Barrières hydrauliques

Le **potentiel hydraulique Φ** control les écoulement sous glaciaire.
Il dépend de la pression de l'eau et de l'altitude du lit rocheux



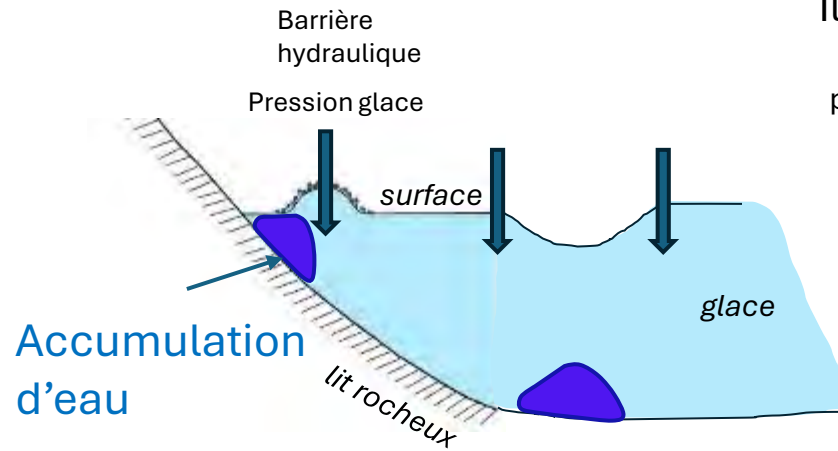
potentiel hydraulique pression eau densité eau

$$\psi = p + \rho_w g z_b,$$

Altitude du lit rocheux

Barrières hydrauliques

Le **potentiel hydraulique Φ** control les écoulement sous glaciaire.
Il dépend de la pression de l'eau et de l'altitude du lit rocheux



potentiel hydraulique pression eau densité eau

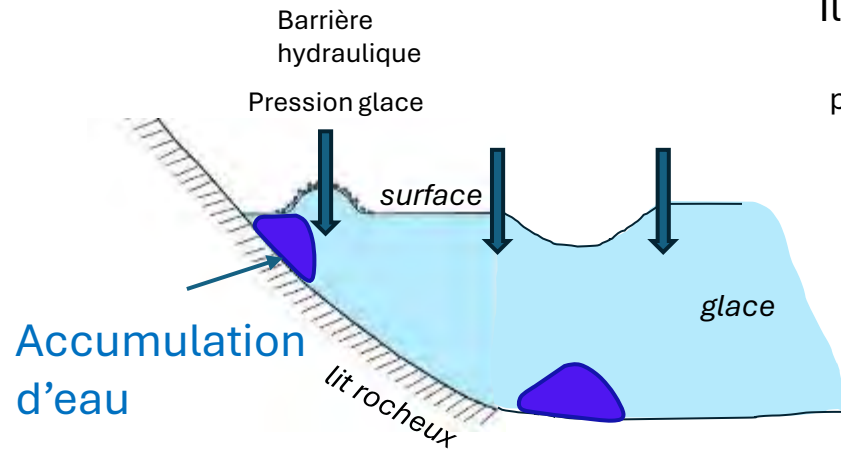
$$\psi = p + \rho_w g z_b,$$

Altitude du lit rocheux

$$\psi = f \rho_i g (z_s - z_b) + \rho_w g z_b \approx \psi,$$

Barrières hydrauliques

Le **potentiel hydraulique Φ** control les écoulement sous glaciaire.
Il dépend de la pression de l'eau et de l'altitude du lit rocheux



potentiel hydraulique pression eau densité eau

$$\psi = p + \rho_w g z_b,$$

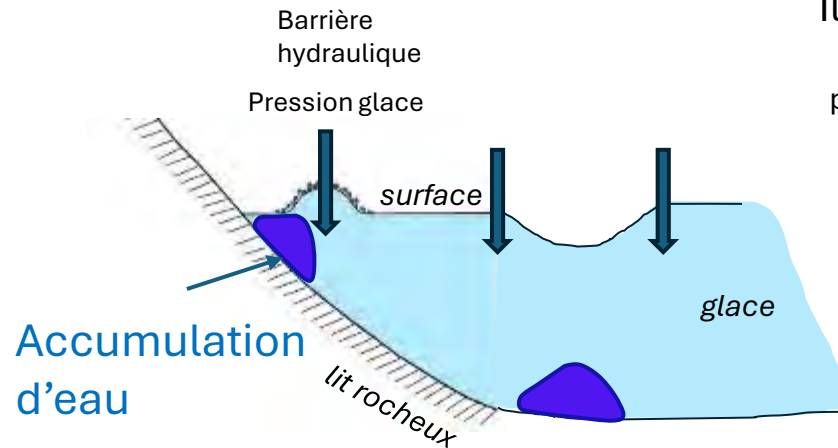
Altitude du lit rocheux

$$\psi = f \rho_i g (z_s - z_b) + \rho_w g z_b \approx \psi,$$

facteur de flottaison
= pression eau / pression glace

Barrières hydrauliques

Le **potentiel hydraulique Φ** control les écoulement sous glaciaire.
Il dépend de la pression de l'eau et de l'altitude du lit rocheux



potentiel hydraulique pression eau densité eau

$$\psi = p + \rho_w g z_b,$$

Altitude du lit rocheux

$$\psi = f \rho_i g (z_s - z_b) + \rho_w g z_b \approx \psi,$$

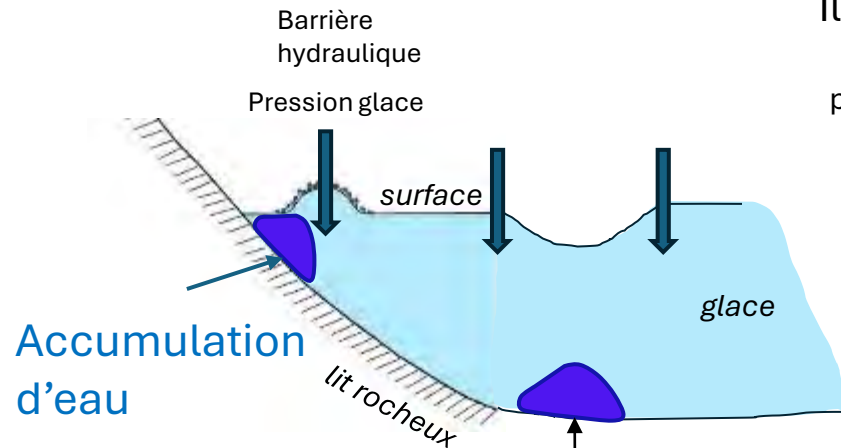
densité glace

Altitude de la
surface glaciaire

facteur de flottaison
= pression eau / pression glace

Barrières hydrauliques

Le **potentiel hydraulique Φ** control les écoulement sous glaciaire.
Il dépend de la pression de l'eau et de l'altitude du lit rocheux



potentiel hydraulique pression eau densité eau

$$\psi = p + \rho_w g z_b,$$

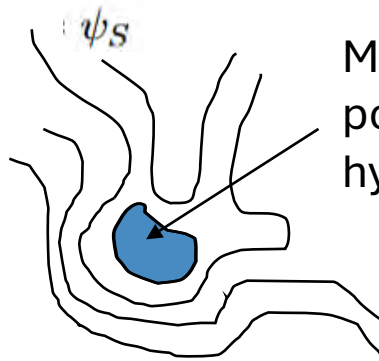
Altitude du lit rocheux

$$\psi = f \rho_i g (z_s - z_b) + \rho_w g z_b \approx \psi,$$

densité glace

Altitude de la surface glaciaire

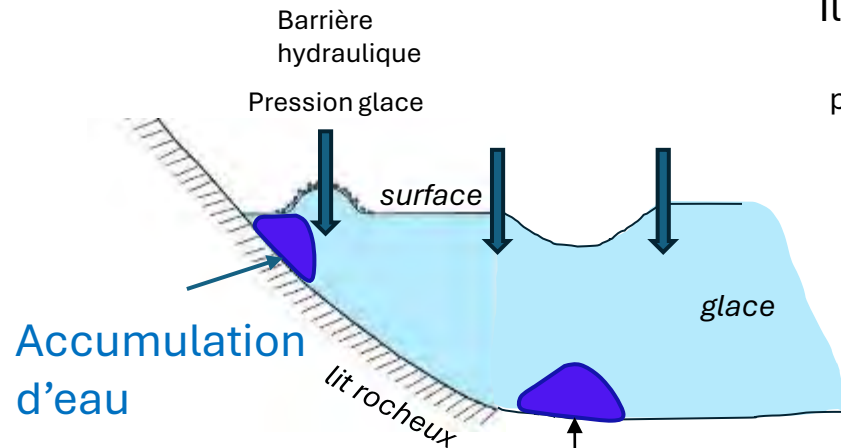
facteur de flottaison
= pression eau / pression glace



Minimum local du
potentiel
hydraulique

Barrières hydrauliques

Le **potentiel hydraulique Φ** control les écoulement sous glaciaire.
Il dépend de la pression de l'eau et de l'altitude du lit rocheux



potentiel hydraulique pression eau densité eau

$$\psi = p + \rho_w g z_b,$$

Altitude du lit rocheux

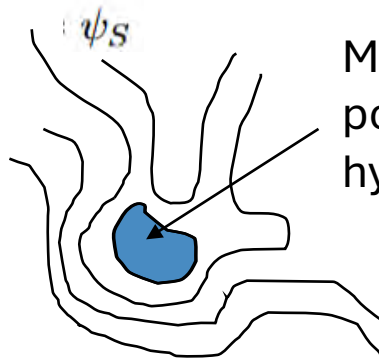
$$\psi = f \rho_i g (z_s - z_b) + \rho_w g z_b \approx \psi,$$

densité glace

Altitude de la surface glaciaire

facteur de flottaison
= pression eau / pression glace

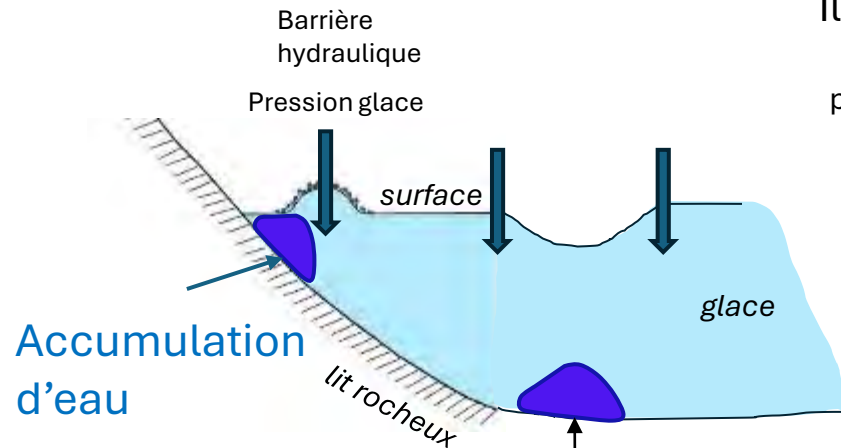
Minimum local du
potentiel
hydraulique



Pour simuler les barrières hydrauliques d'un glacier, nous avons besoin:

Barrières hydrauliques

Le **potentiel hydraulique** Φ control les écoulement sous glaciaire.
Il dépend de la pression de l'eau et de l'altitude du lit rocheux



potentiel hydraulique pression eau densité eau

$$\psi = p + \rho_w g z_b,$$

Altitude du lit rocheux

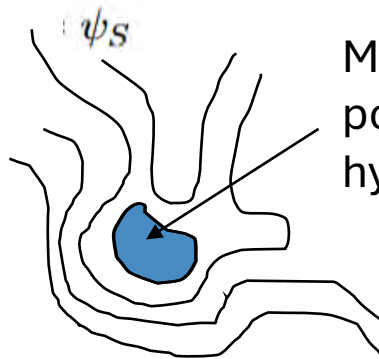
$$\psi = f \rho_i g (z_s - z_b) + \rho_w g z_b \approx \psi,$$

densité glace

Altitude de la
surface glaciaire

facteur de flottaison
= pression eau / pression glace

Minimum local du
potentiel
hydraulique

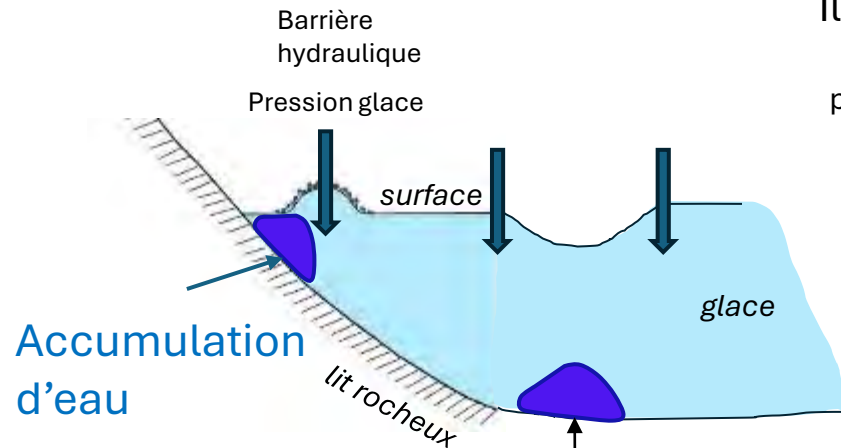


Pour simuler les barrières hydrauliques d'un glacier, nous avons besoin:

1. D'une hypothèse sur la **pression de l'eau** sous glaciaire ($f=1$)

Barrières hydrauliques

Le **potentiel hydraulique Φ** control les écoulement sous glaciaire.
Il dépend de la pression de l'eau et de l'altitude du lit rocheux



potentiel hydraulique pression eau densité eau

$$\psi = p + \rho_w g z_b,$$

Altitude du lit rocheux

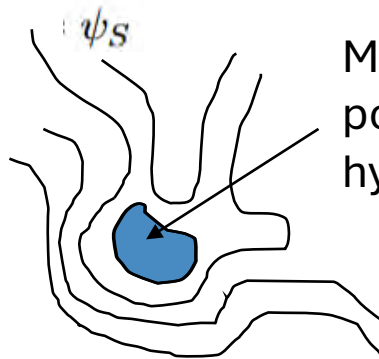
$$\psi = f \rho_i g (z_s - z_b) + \rho_w g z_b \approx \psi,$$

densité glace

Altitude de la surface glaciaire

facteur de flottaison
= pression eau / pression glace

Minimum local du
potentiel
hydraulique

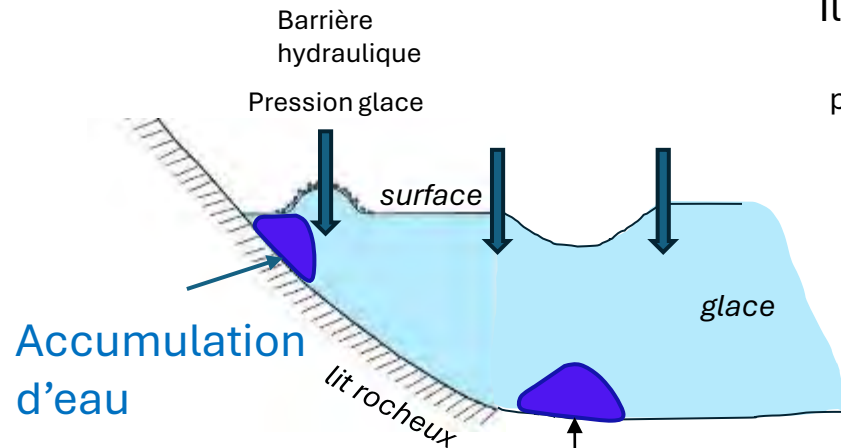


Pour simuler les barrières hydrauliques d'un glacier, nous avons besoin:

1. D'une hypothèse sur la **pression de l'eau** sous glaciaire ($f=1$)
2. De la **topographie de surface** (facile)

Barrières hydrauliques

Le **potentiel hydraulique** Φ control les écoulement sous glaciaire.
Il dépend de la pression de l'eau et de l'altitude du lit rocheux



potentiel hydraulique pression eau densité eau

$$\psi = p + \rho_w g z_b,$$

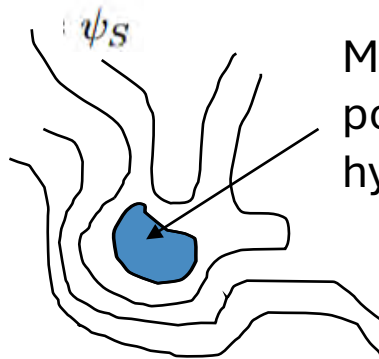
Altitude du lit rocheux

$$\psi = f \rho_i g (z_s - z_b) + \rho_w g z_b \approx \psi,$$

densité glace

Altitude de la
surface glaciaire

facteur de flottaison
= pression eau / pression glace



Minimum local du
potentiel
hydraulique



Pour simuler les barrières hydrauliques d'un glacier, nous avons besoin:

1. D'une hypothèse sur la **pression de l'eau** sous glaciaire ($f=1$)
2. De la **topographie de surface** (facile)
3. De la **topographie sous glaciaire** (difficile)

Cas d'application : la crue du torrent des Etançons du 21 Juin 2024 (massif des Écrins)

Crue exceptionnelle du torrent des Etançons (=sans précédent)
et **destruction du village** de la Bérarde

Source: Retro-analyse RTM, *Blanc et al 2024*



Photo: chalet alpin de la Bérarde



Retroanalyse report, *Blanc et al, 2024*

Cas d'application : la crue du torrent des Etançons du 21 Juin 2024 (massif des Écrins)

Crue exceptionnelle du torrent des Etançons (=sans précédent)
et **destruction du village** de la Bérarde

Source: Retro-analyse RTM, *Blanc et al 2024*



Photo: chalet alpin de la Bérarde



Retroanalyse report, *Blanc et al, 2024*

La **concomitance d'événements rares** explique **partiellement** la **magnitude** de la crue. Toutefois, une contribution supplémentaire **d'origine glaciaire** est **suspectée (incertain)** pour expliquer le décalage entre les débits maximaux observés et ceux simulés par le modèle hydrologique (RTM/EDF)

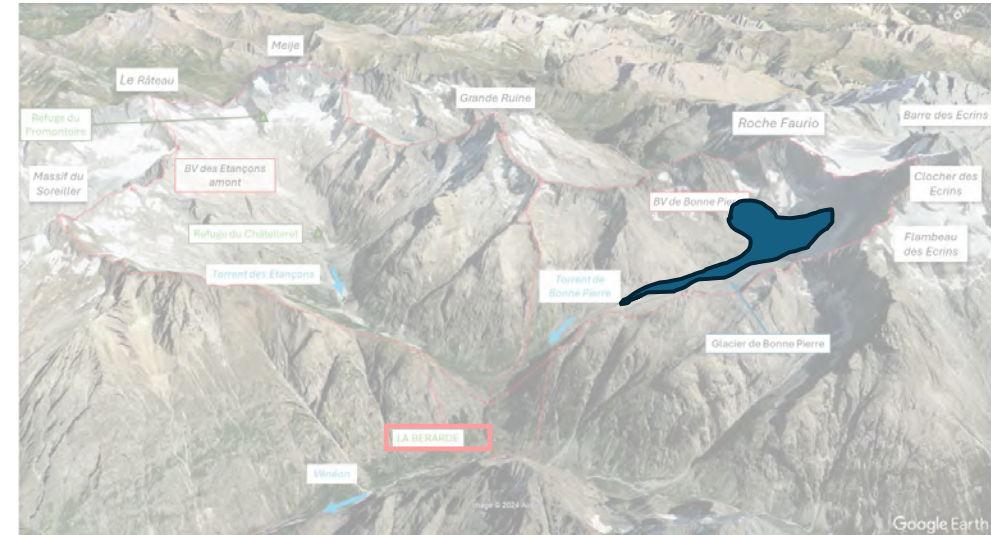
Cas d'application : la crue du torrent des Etançons du 21 Juin 2024 (massif des Écrins)

Crue exceptionnelle du torrent des Etançons (=sans précédent)
et **destruction du village** de la Bérarde

Source: Retro-analyse RTM, *Blanc et al 2024*



Photo: chalet alpin de la Bérarde



Retroanalyse report, *Blanc et al, 2024*

La **concomitance d'événements rares** explique **partiellement** la **magnitude** de la crue. Toutefois, une contribution supplémentaire **d'origine glaciaire** est **suspectée (incertain)** pour expliquer le décalage entre les débits maximaux observés et ceux simulés par le modèle hydrologique (RTM/EDF)

Glacier de Bonne Pierre



1.7 km²
Pente faible
Couverture de débris

Glacier de Bonne Pierre



Éléments indiquant une contribution du **lac supraglaciaire**:

- La vidange du lac supraglaciaire (~**100 000 m³**) entre le 20 et 22 Juin



Glacier de Bonne Pierre



Éléments indiquant une contribution du **lac supraglaciaire**:

- La vidange du lac supraglaciaire (~**100 000 m³**) entre le 20 et 22 Juin



Éléments indiquant une contribution additionnelle **en-glaciaire et/ou sous-glaciaire**:

- Les vidanges du lac des années précédentes (volume similaire) ont été lentes et sans dégâts

Glacier de Bonne Pierre



Éléments indiquant une contribution du **lac supraglaciaire**:

- La vidange du lac supraglaciaire (~**100 000 m³**) entre le 20 et 22 Juin



Éléments indiquant une contribution additionnelle **en-glaciaire et/ou sous-glaciaire**:

- Les vidanges du lac des années précédentes (volume similaire) ont été lentes et sans dégâts
- L'apport important d'eau de fonte et de pluie aurait pu entraîner la formation puis la rupture d'une **poche d'eau sous-glaciaire**.

Glacier de Bonne Pierre



Éléments indiquant une contribution du **lac supraglaciaire**:

- La vidange du lac supraglaciaire (~**100 000 m³**) entre le 20 et 22 Juin

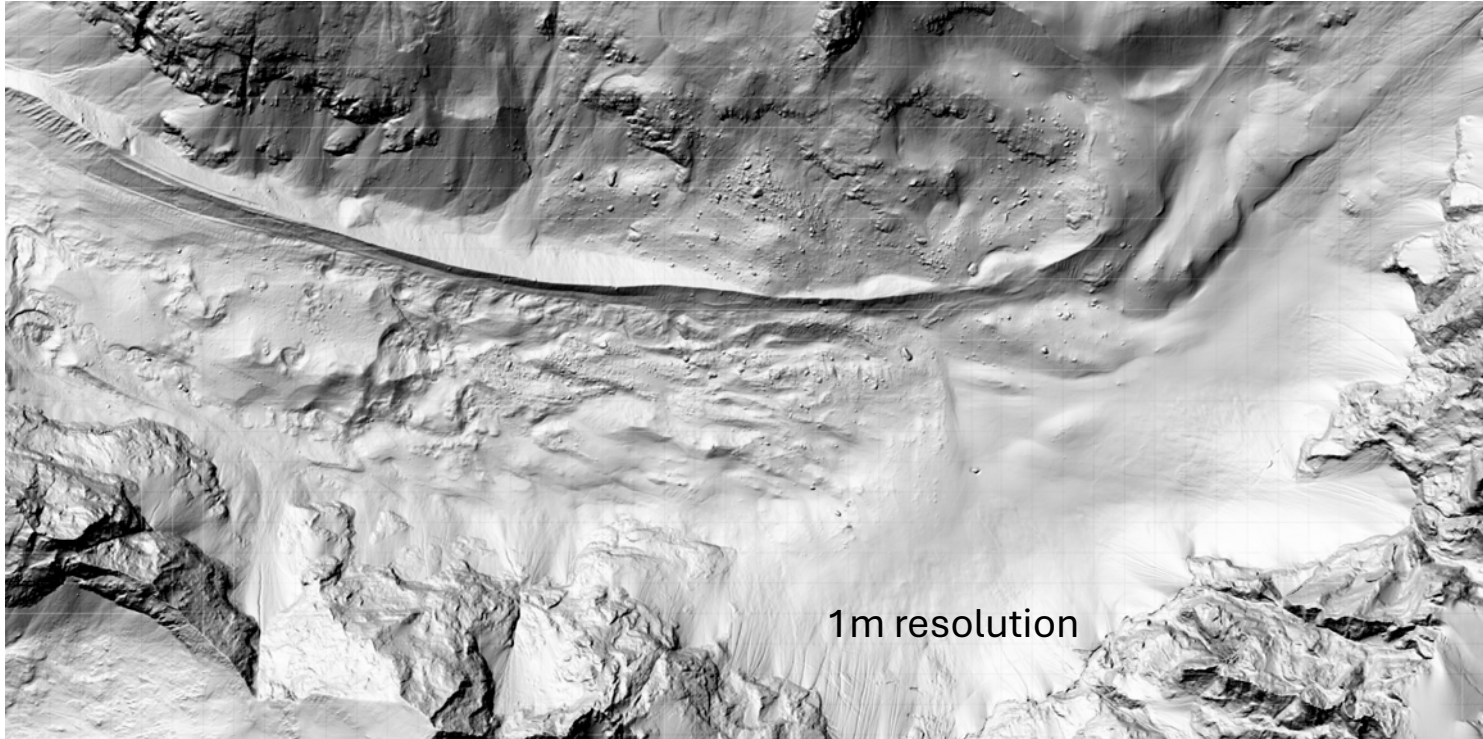


Éléments indiquant une contribution additionnelle **en-gla**

- Les vidanges du lac des années précédentes (volume crue)
- L'apport important d'eau de fonte et de pluie aurait pu rupture d'une **poche d'eau sous-glaciaire**.



Topographie de surface du glacier: modèle numérique de terrain par mesures laser aéroportées

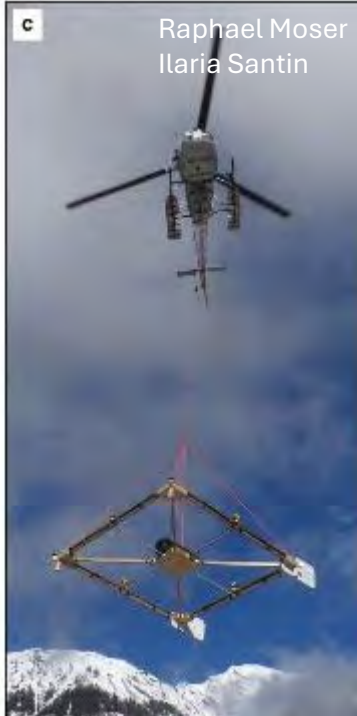


Acquisition: Juin 2024

Topographie sous glaciaire: radar aéroporté et modélisation

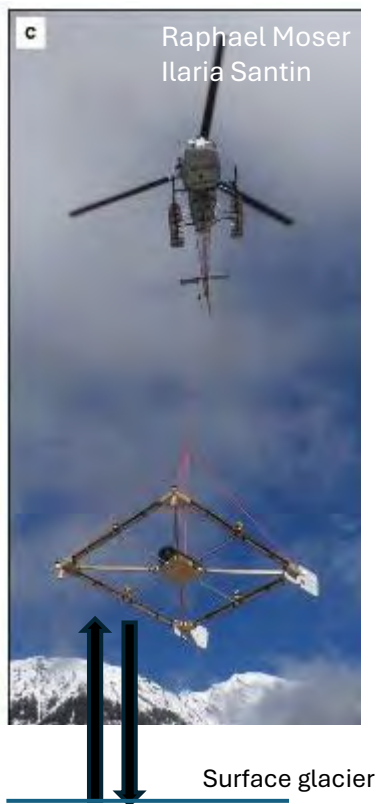
Topographie sous glaciaire: radar aéroporté et modélisation

Air ETH Novembre 2024



Topographie sous glaciaire: radar aéroporté et modélisation

Air ETH Novembre 2024



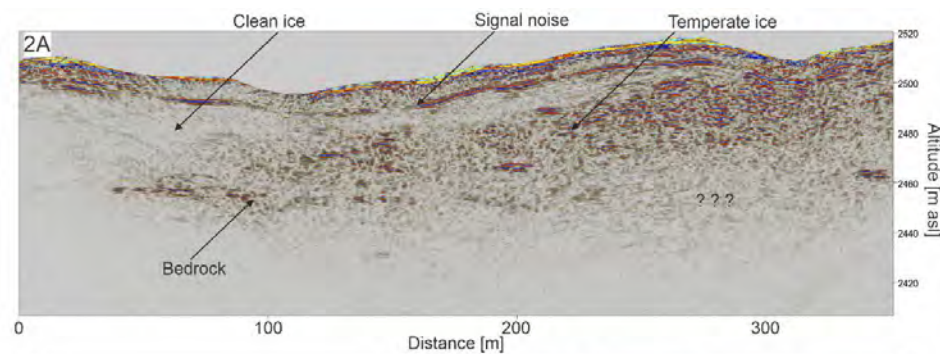
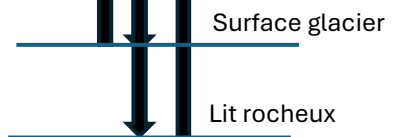
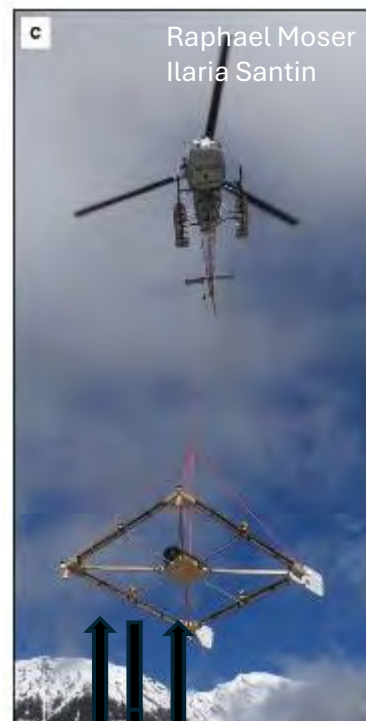
Topographie sous glaciaire: radar aéroporté et modélisation

Air ETH Novembre 2024



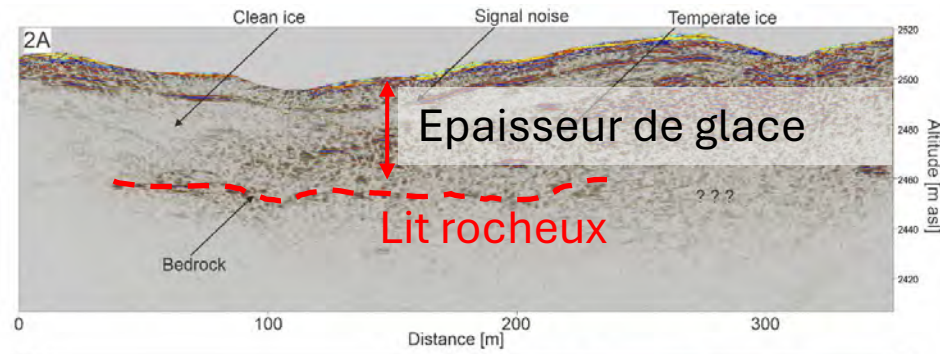
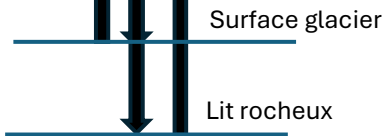
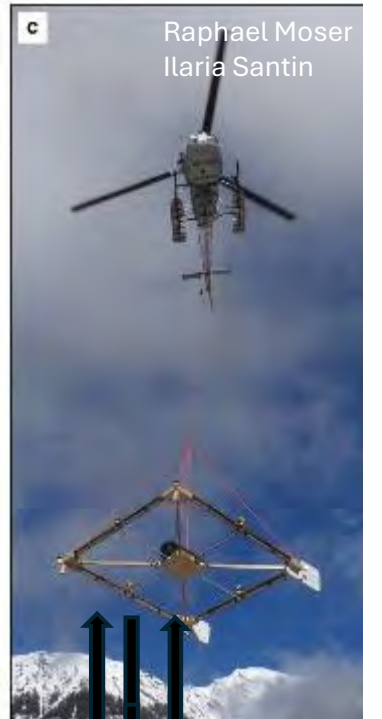
Topographie sous glaciaire: radar aéroporté et modélisation

Air ETH Novembre 2024



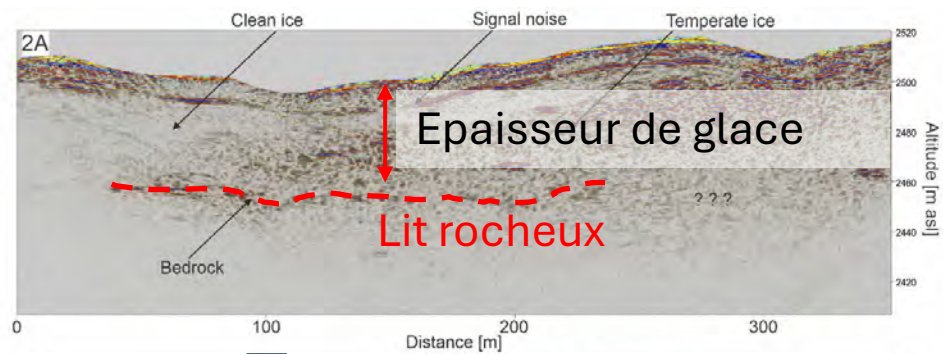
Topographie sous glaciaire: radar aéroporté et modélisation

Air ETH Novembre 2024

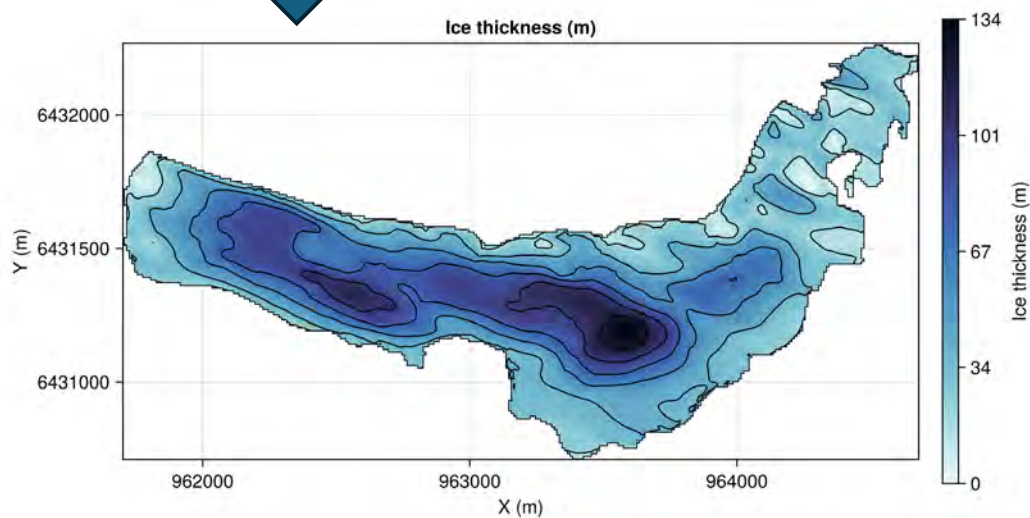


Topographie sous glaciaire: radar aéroporté et modélisation

Air ETH Novembre 2024

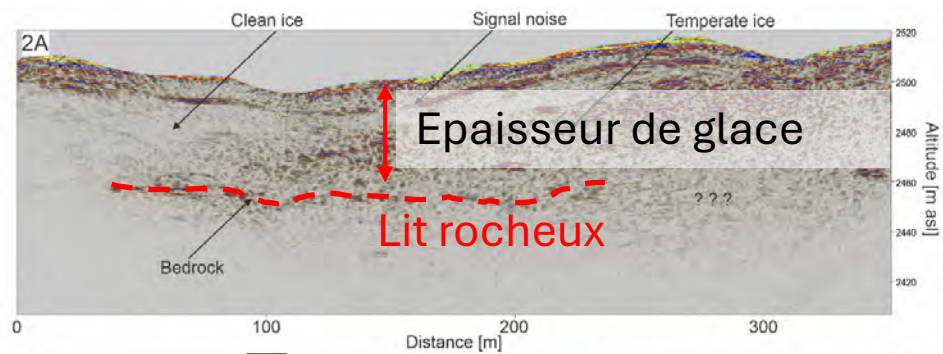


Interpolation de
l'épaisseur de glace

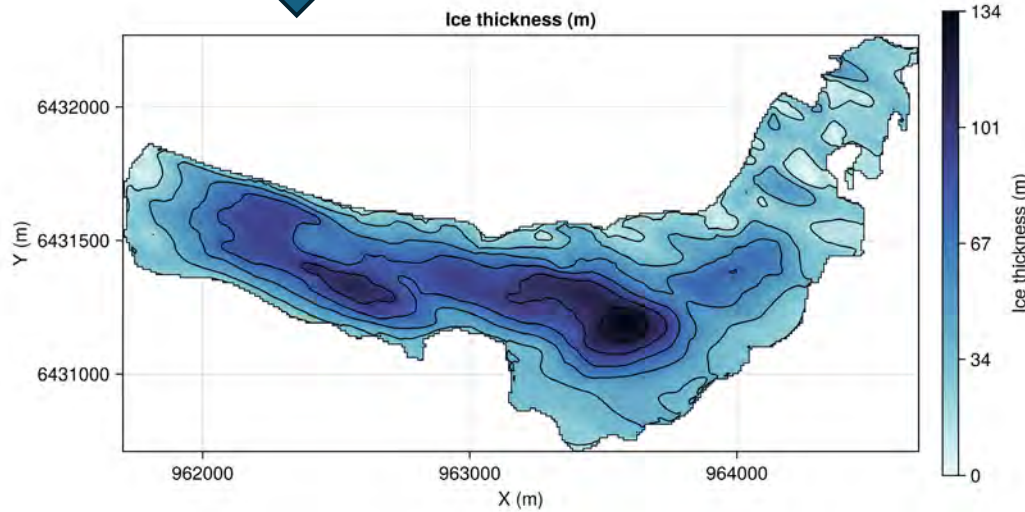


Topographie sous glaciaire: radar aéroporté et modélisation

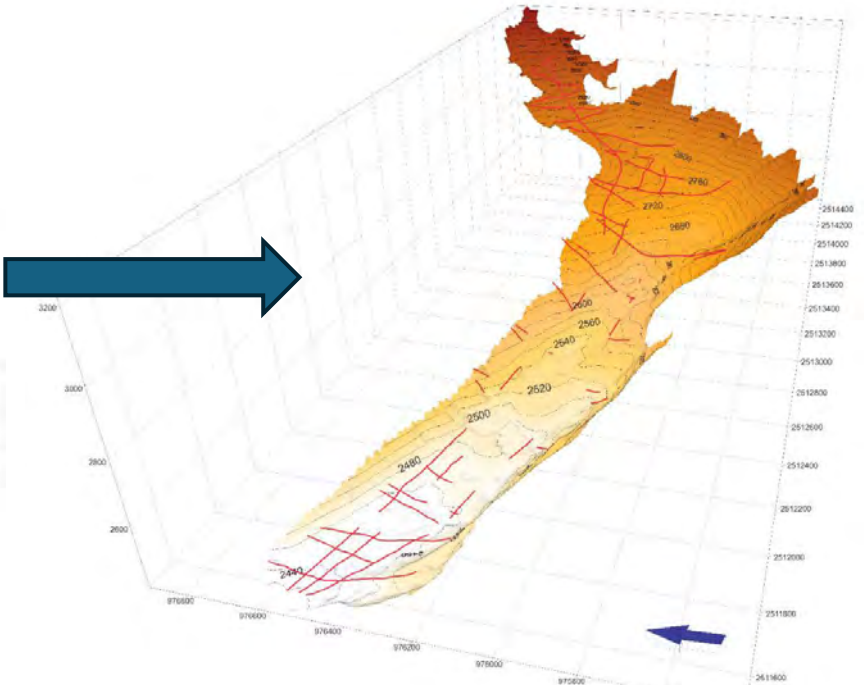
Air ETH Novembre 2024



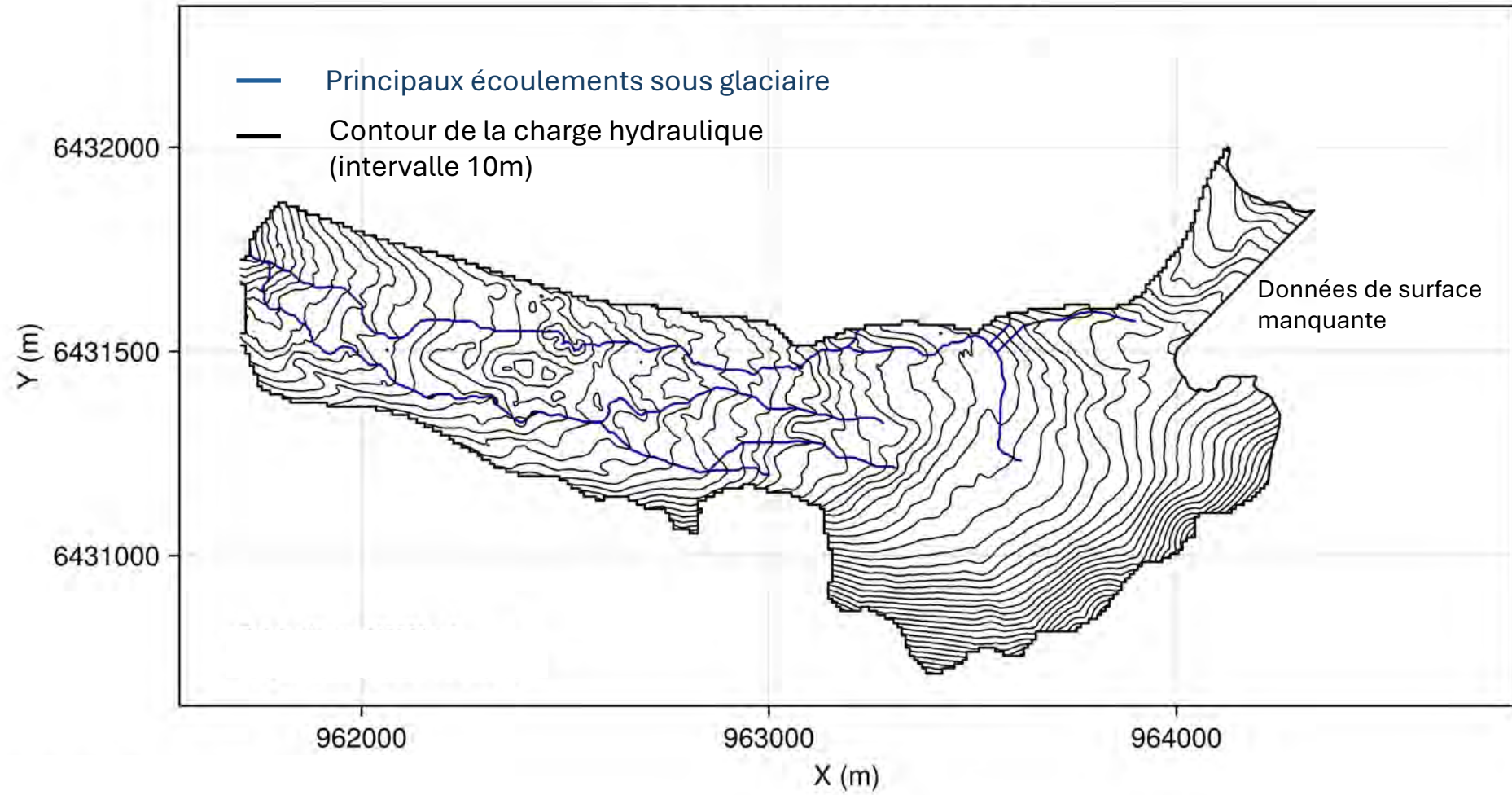
Interpolation de
l'épaisseur de glace



Topographie sous-glaciaire

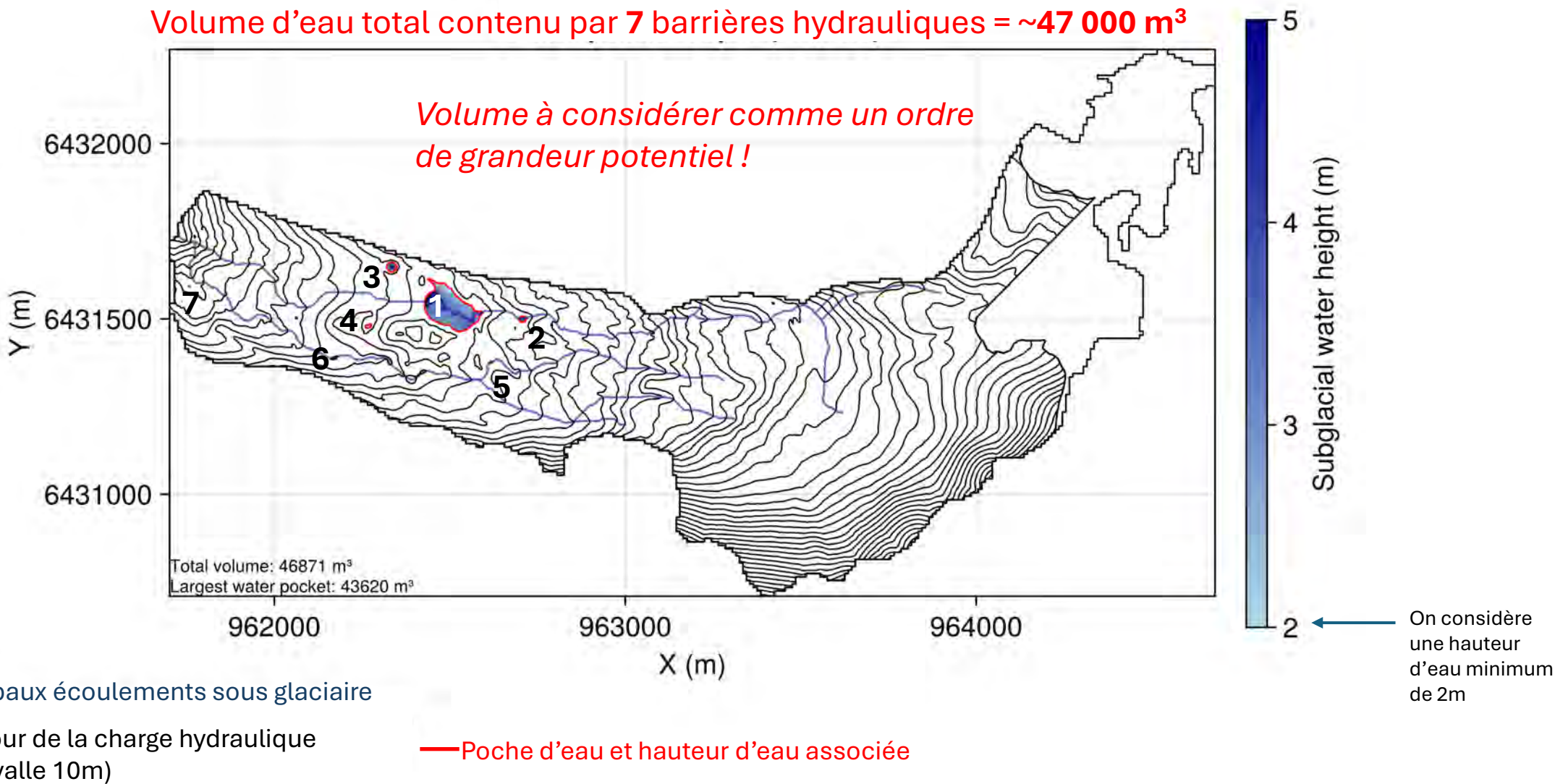


Potentiel hydraulique Bonne Pierre – Juin 2024



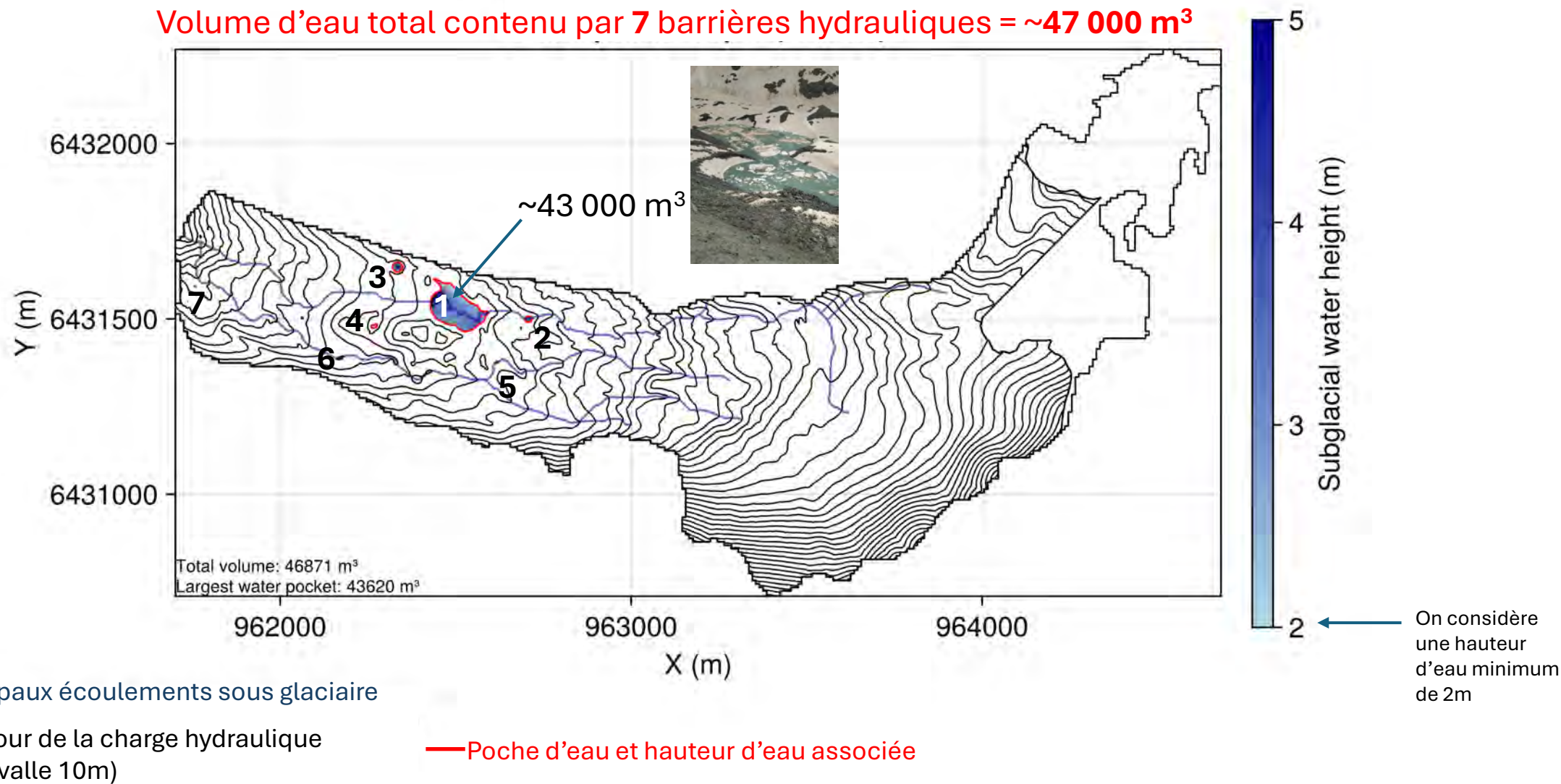
Poches d'eau *possiblement* contenu par barrières hydrauliques – Juin 2024

Volume d'eau total contenu par 7 barrières hydrauliques = ~47 000 m³



Poches d'eau contenu par barrières hydrauliques – Juin 2024

Volume d'eau total contenu par 7 barrières hydrauliques = ~47 000 m³



Ajoutons maintenant **les incertitudes** à nos estimations

$$\psi_S = f \rho_i g (z_s - z_b) + \rho_w g z_b$$

Ajoutons maintenant **les incertitudes** à nos estimations

$$\psi_S = f \rho_i g (z_s - z_b) + \rho_w g z_b$$

Input	Erreurs typique	Longueur de corrélation spatiale
Zs : altitude de surface	Quelques mètres (lissage)	~ 5-10m

Ajoutons maintenant **les incertitudes** à nos estimations

$$\psi_S = f \rho_i g (z_s - z_b) + \rho_w g z_b$$

Input	Erreurs typique	Longueur de corrélation spatiale
Zs : altitude de surface	Quelques mètres (lissage)	~ 5-10m
Zb : altitude du lit rocheux	Dizaine de mètres (jusqu'à 25m)	~200m (corresponds à la densité des mesures radar)

Ajoutons maintenant **les incertitudes** à nos estimations

$$\psi_S = f \rho_i g (z_s - z_b) + \rho_w g z_b$$

Input	Erreurs typique	Longueur de corrélation spatiale
Zs : altitude de surface	Quelques mètres (lissage)	~ 5-10m
Zb : altitude du lit rocheux	Dizaine de mètres (jusqu'à 25m)	~200m (corresponds à la densité des mesures radar)
f : facteur de flottaison (pression d'eau)	f = 1 +/-10% (choix arbitraire)	100m (choix arbitraire)

Ajoutons maintenant **les incertitudes** à nos estimations

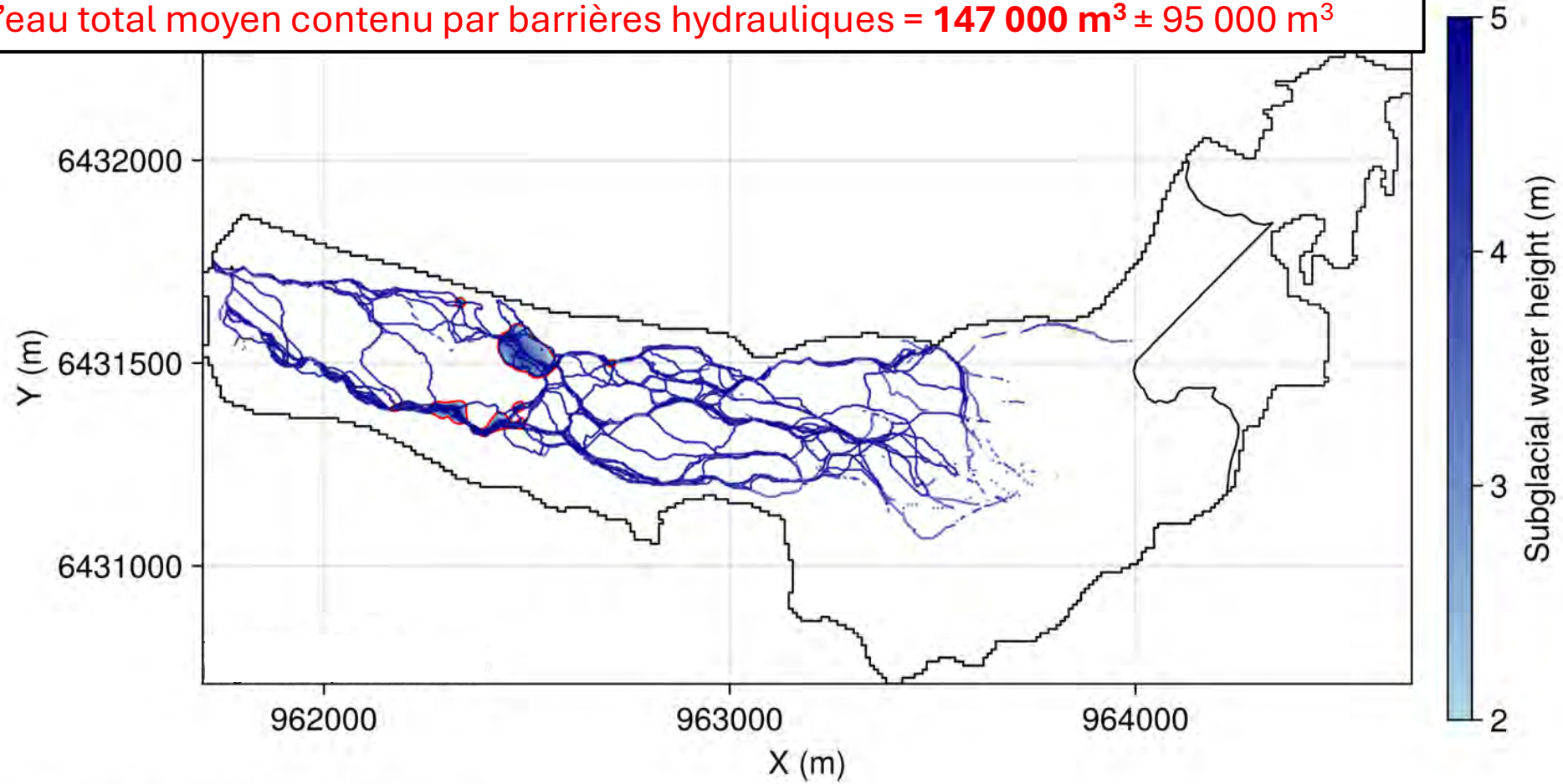
$$\psi_s = f \rho_i g (z_s - z_b) + \rho_w g z_b$$

Input	Erreurs typique	Longueur de corrélation spatiale
Zs : altitude de surface	Quelques mètres (lissage)	~ 5-10m
Zb : altitude du lit rocheux	Dizaine de mètres (jusqu'à 25m)	~200m (corresponds à la densité des mesures radar)
f : facteur de flottaison (pression d'eau)	f = 1 +/-10% (choix arbitraire)	100m (choix arbitraire)

Nous effectuons plusieurs simulations du champ du potentiel hydraulique en faisant **varier** les valeurs de **z_s**, **z_b** et **f** dans leurs **intervalles d'incertitude** (Monte Carlo), en tenant compte de leur longueur de **corrélation spatiale**.

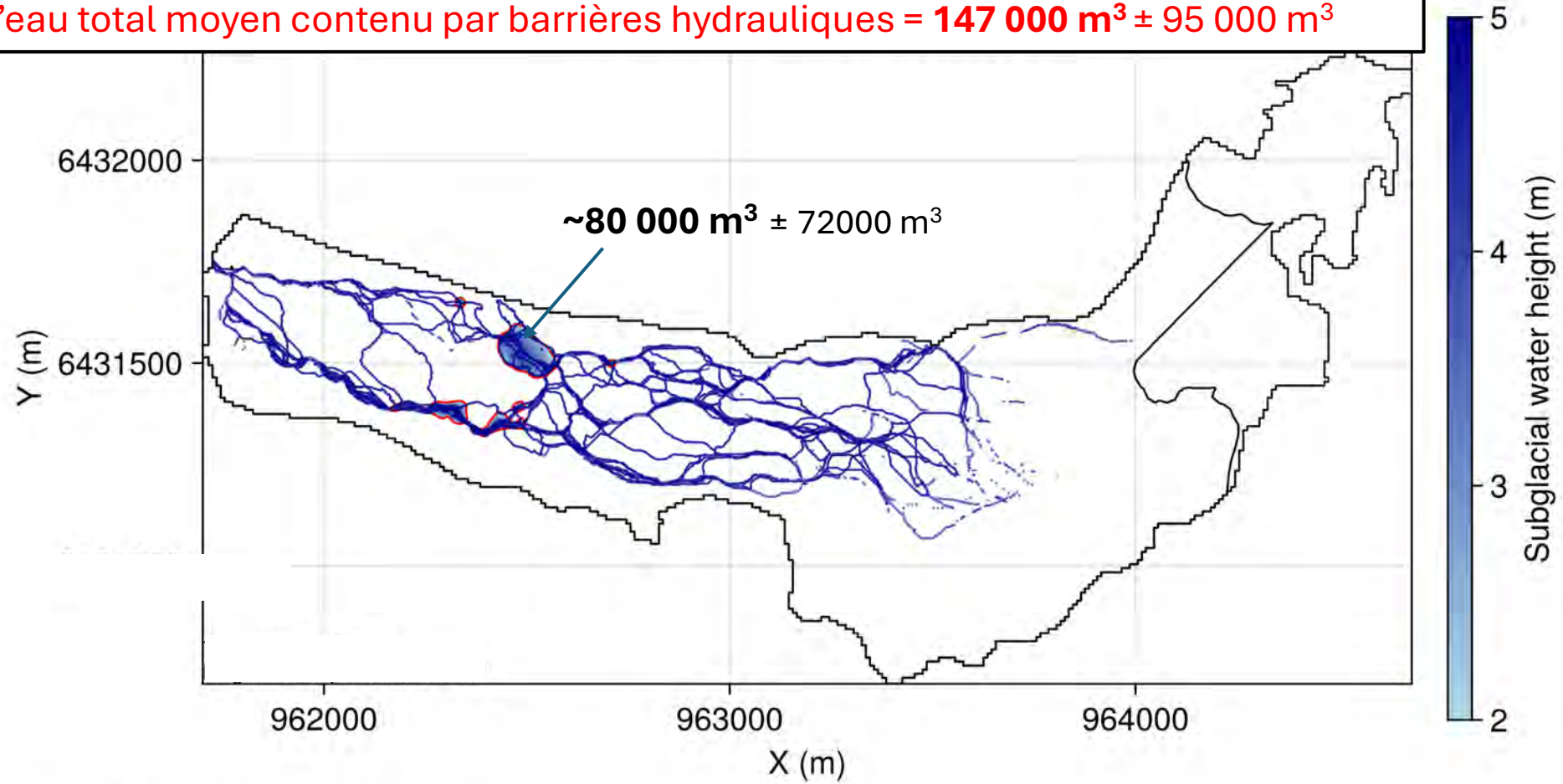
Résultat stochastique (moyenne de 20 réalisations)

Volume d'eau total moyen contenu par barrières hydrauliques = **147 000 m³ ± 95 000 m³**



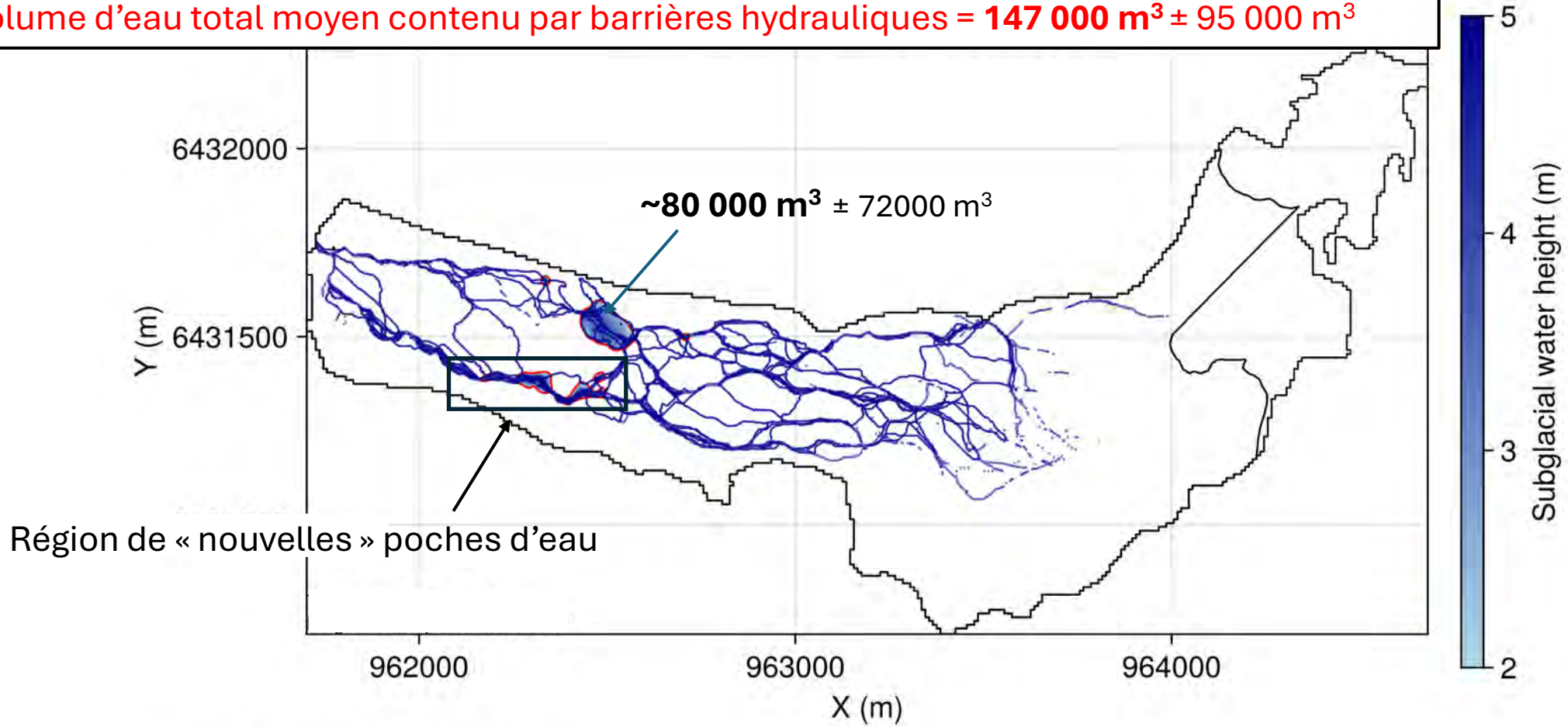
Résultat stochastique (moyenne de 20 réalisations)

Volume d'eau total moyen contenu par barrières hydrauliques = **147 000 m³ ± 95 000 m³**



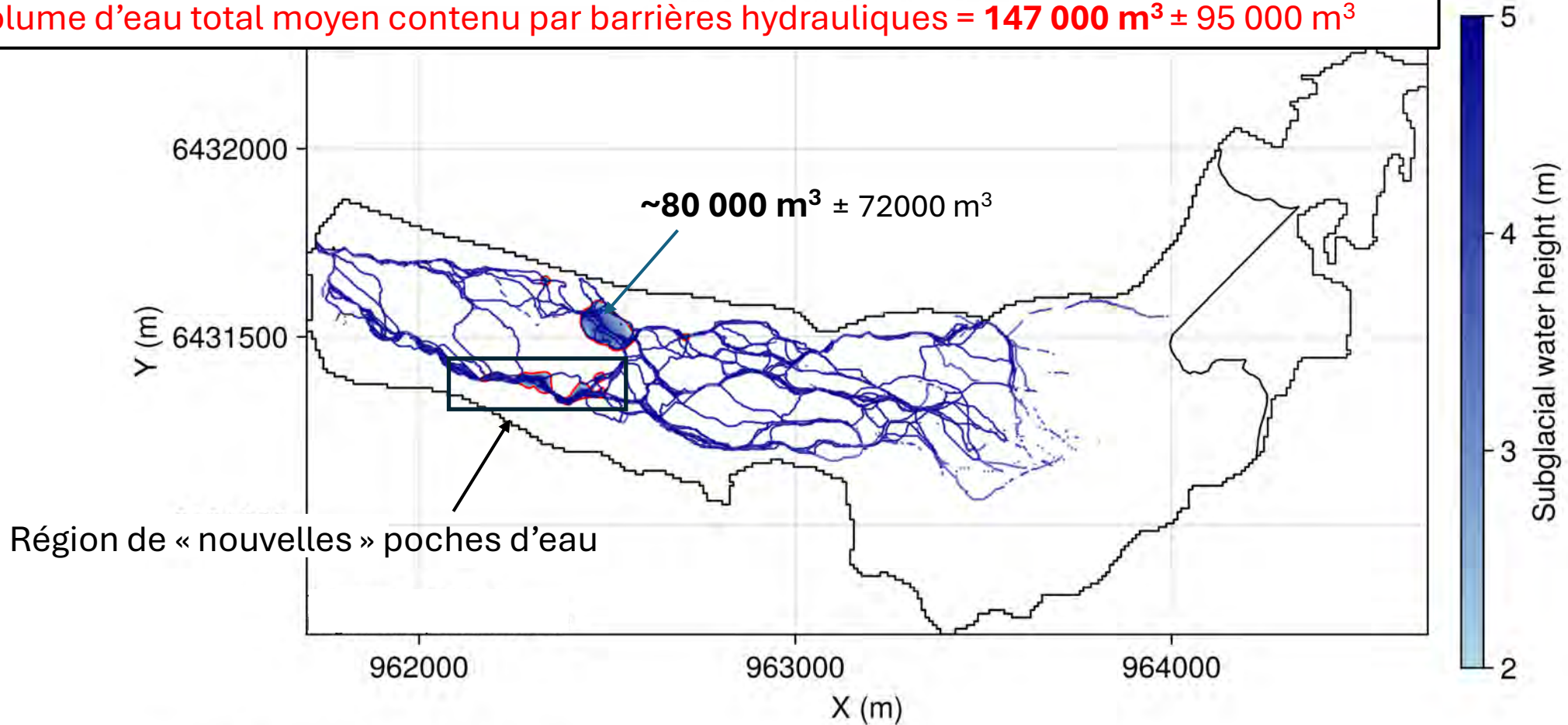
Résultat stochastique (moyenne de 20 réalisations)

Volume d'eau total moyen contenu par barrières hydrauliques = **147 000 m³ ± 95 000 m³**



Résultat stochastique (moyenne de 20 réalisations)

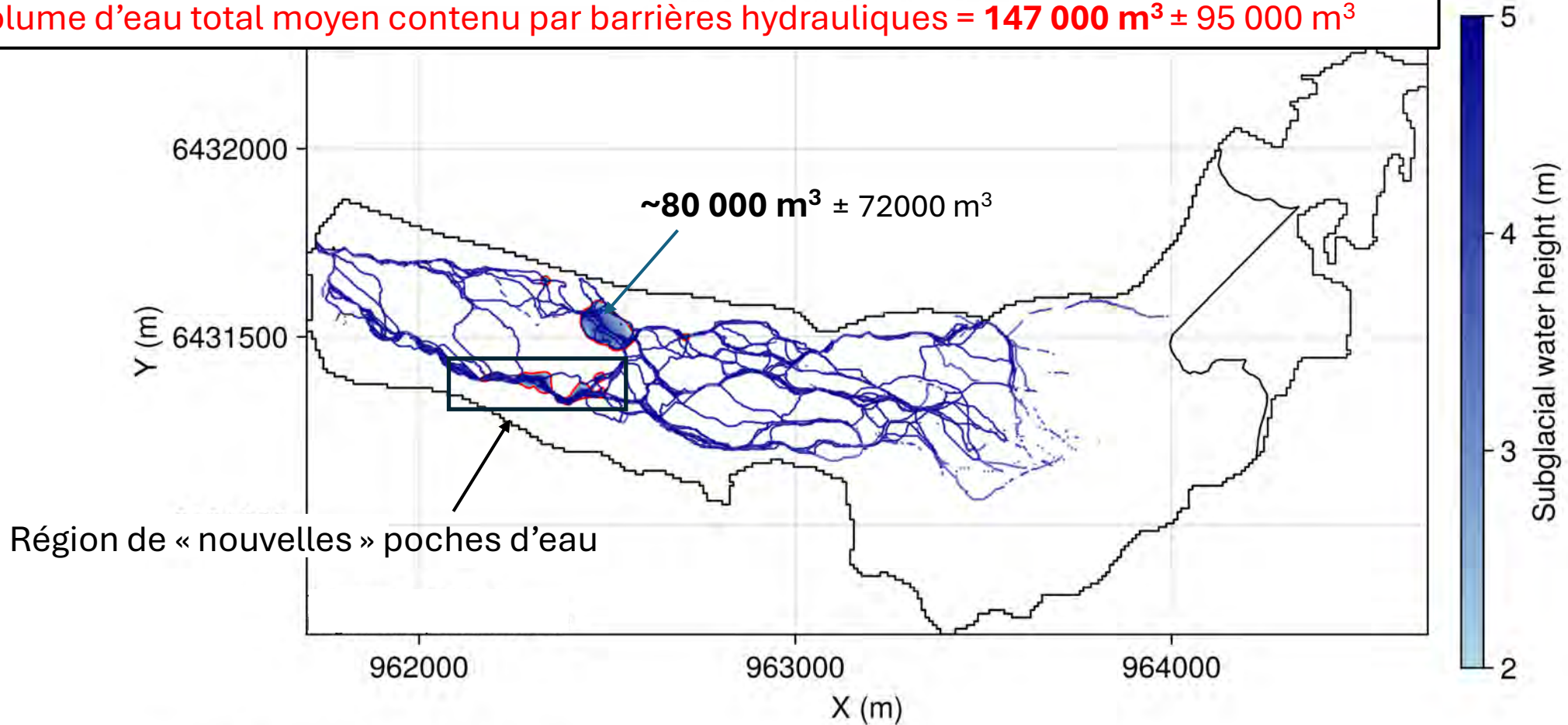
Volume d'eau total moyen contenu par barrières hydrauliques = $147\,000\text{ m}^3 \pm 95\,000\text{ m}^3$



Les régions à **faible gradient hydraulique** sont propices à la **formation de poches d'eau** en réponse aux **variations de la pression d'eau basale**

Résultat stochastique (moyenne de 20 réalisations)

Volume d'eau total moyen contenu par barrières hydrauliques = $147\,000\text{ m}^3 \pm 95\,000\text{ m}^3$



Les régions à **faible gradient hydraulique** sont propices à la **formation de poches d'eau** en réponse aux **variations de la pression d'eau basale**

Influence de la surcharge en eau exceptionnelle du réseau sous glaciaire

Conclusion

Nous avons estimé un volume **d'eau sous-glaciaire** **potentiel** retenu par **barrières hydrauliques** d'environ **43 000 m³** en juin 2024 (en considérant la présence du lac supraglaciaire)

Conclusion

Nous avons estimé un volume **d'eau sous-glaciaire** **potentiel** retenu par **barrières hydrauliques** d'environ **43 000 m³** en juin 2024 (en considérant la présence du lac supraglaciaire)

Ce volume **augmente** considérablement **en considérant** les possible courtes **variations spatiales des pressions en eau** (=un proxy pour les fortes pluie et la fonte nival en juin 2024)

Conclusion

Nous avons estimé un volume **d'eau sous-glaciaire** **potentiel** retenu par **barrières hydrauliques** d'environ **43 000 m³** en juin 2024 (en considérant la présence du lac supraglaciaire)

Ce volume **augmente** considérablement **en considérant** les possible courtes **variations spatiales des pressions en eau** (=un proxy pour les fortes pluie et la fonte nival en juin 2024)

Cette méthode est relativement simple et applicable à plus grande échelle.

Elle donne un **ordre de grandeur** du volume d'eau sous glaciaire stocké à l'état d'équilibre

Conclusion

Nous avons estimé un volume **d'eau sous-glaciaire** **potentiel** retenu par **barrières hydrauliques** d'environ **43 000 m³** en juin 2024 (en considérant la présence du lac supraglaciaire)

Ce volume **augmente** considérablement **en considérant** les possible courtes **variations spatiales des pressions en eau** (=un proxy pour les fortes pluie et la fonte nival en juin 2024)

Cette méthode est relativement simple et applicable à plus grande échelle.

Elle donne un **ordre de grandeur** du volume d'eau sous glaciaire stocké à l'état d'équilibre

Question ouverte:

Comment se forment et se vidangent les poches d'eau retenues par des barrières hydrauliques ?

Conclusion

Nous avons estimé un volume **d'eau sous-glaciaire** **potentiel** retenu par **barrières hydrauliques** d'environ **43 000 m³** en juin 2024 (en considérant la présence du lac supraglaciaire)

Ce volume **augmente** considérablement **en considérant** les possible courtes **variations spatiales des pressions en eau** (=un proxy pour les fortes pluie et la fonte nival en juin 2024)

Cette méthode est relativement simple et applicable à plus grande échelle.

Elle donne un **ordre de grandeur** du volume d'eau sous glaciaire stocké à l'état d'équilibre

Question ouverte:

Comment se forment et se vidangent les poches d'eau retenues par des barrières hydrauliques ?

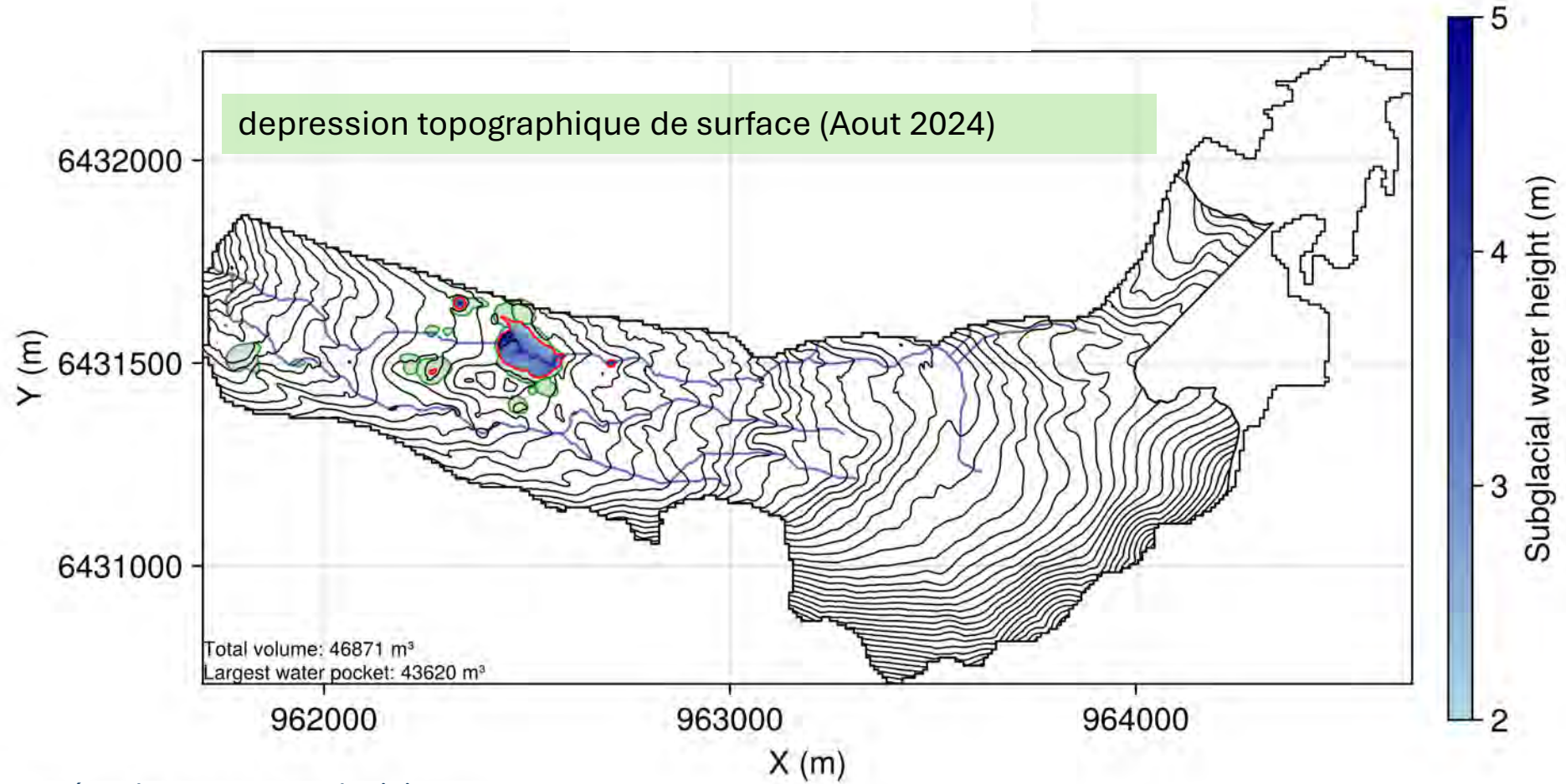
Perspectives:

Besoin de mieux caractériser les **processus physiques** à l'origine du **remplissage et de la rupture des barrières hydrauliques** -> besoin d'une meilleure connaissance du:

- 1) **lit rocheux** sous le lac supraglaciaire (radar).
- 2) champ de **pression d'eau basale** (piezomètre + modélisation)

Merci
Questions ☺ ?

ogier@vaw.baug.ethz.ch

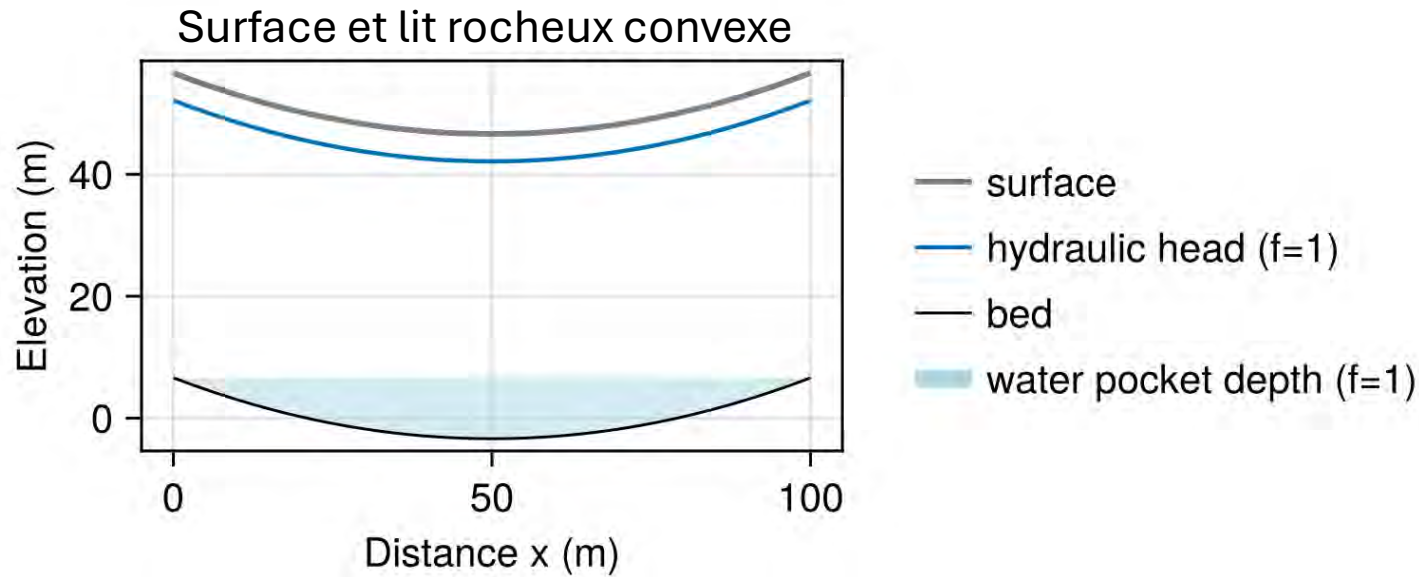


— Principaux écoulements sous glaciaire

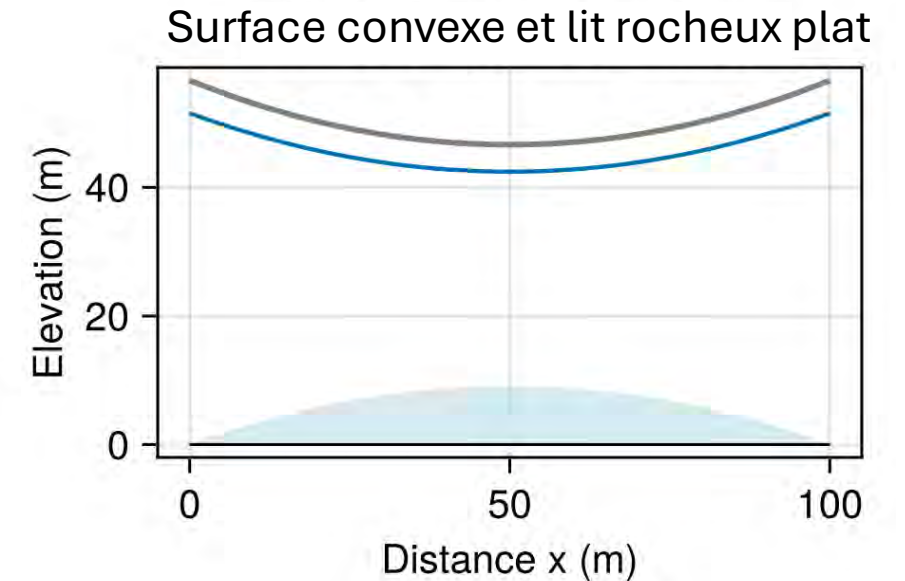
— Contour de la charge hydraulique
(intervalle 10m)

— Poche d'eau et hauteur d'eau associée

La **topographie du lit rocheux** sous une dépression de surface **est déterminante**

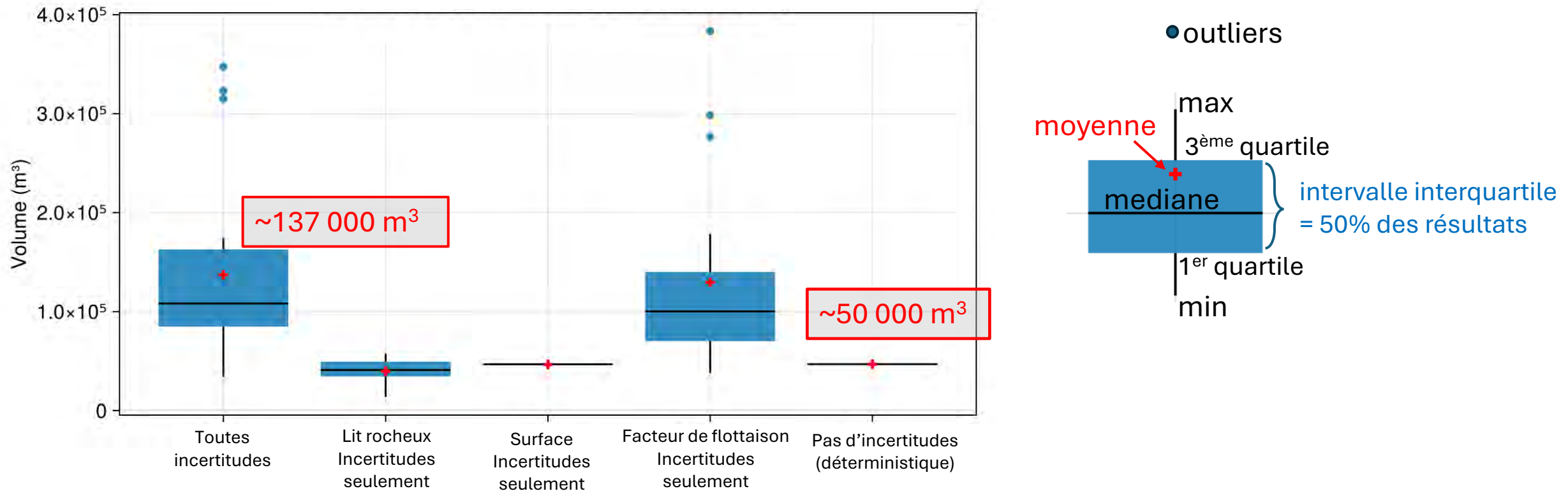


Barrière hydraulique « stable »
l'eau reste piégée = barrière topographique

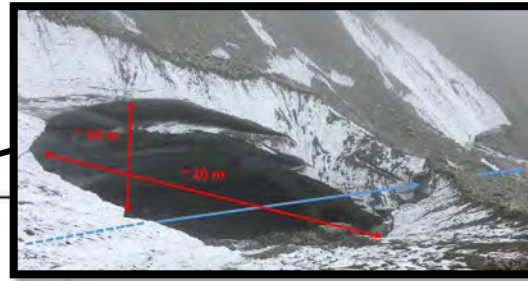
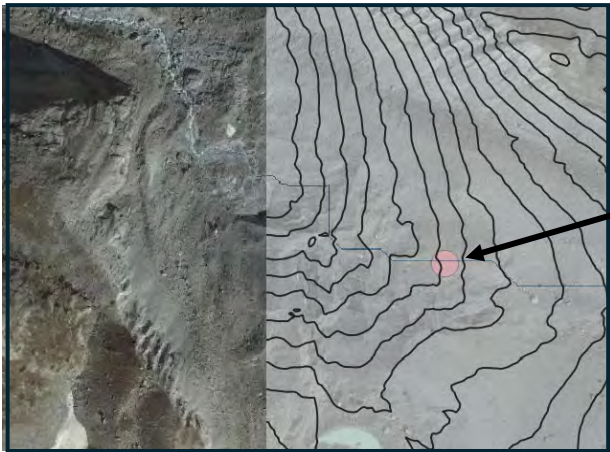


Barrière hydraulique “instable”
Risque de crue

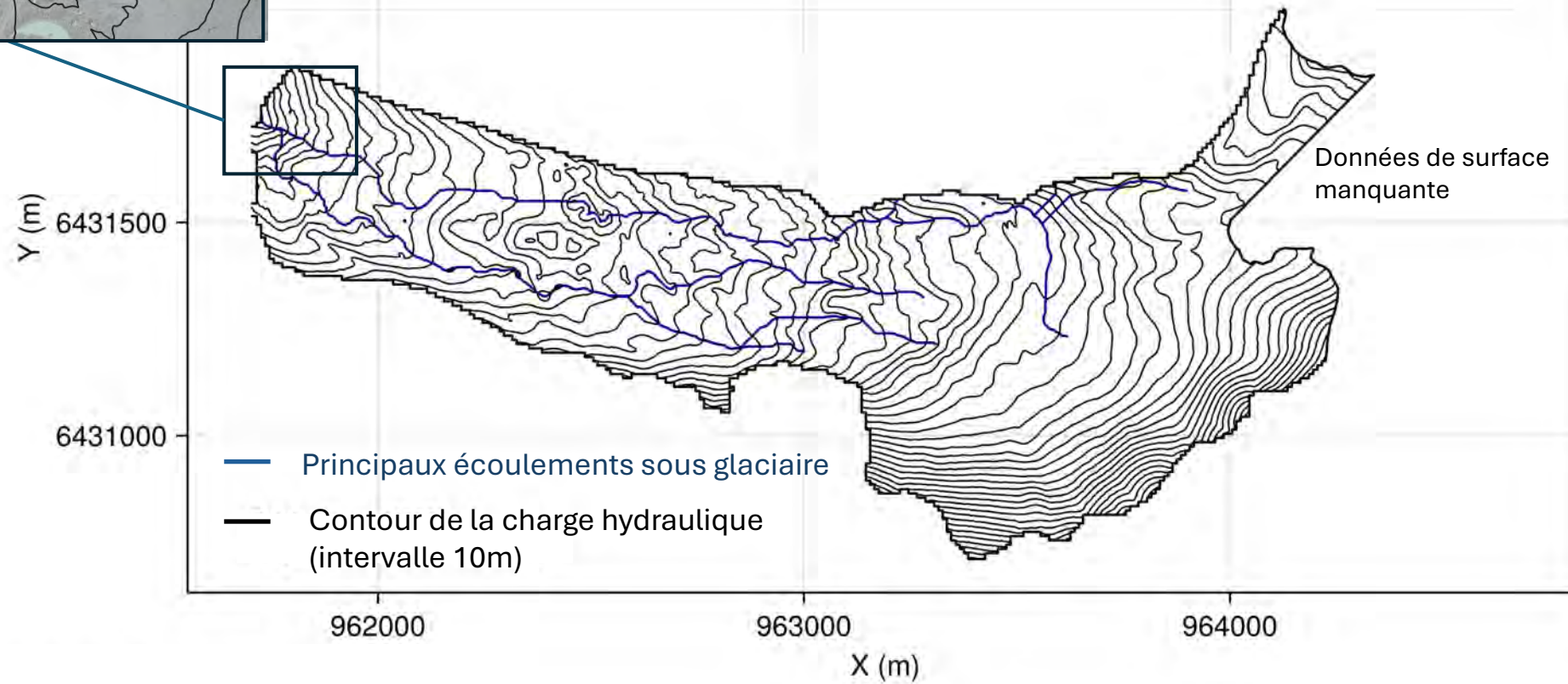
Quel paramètre contribue le plus à l'incertitude dans le calcul du volume des poches d'eau ?

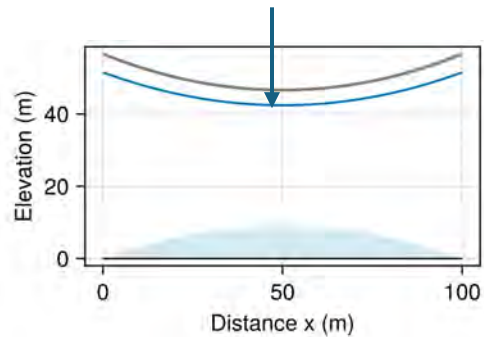


Les possibles **fluctuations spatiales de pression d'eau à la base du glacier** (non contraintes) sont à l'origine de la plus grande **incertitude** du volume des poches d'eau



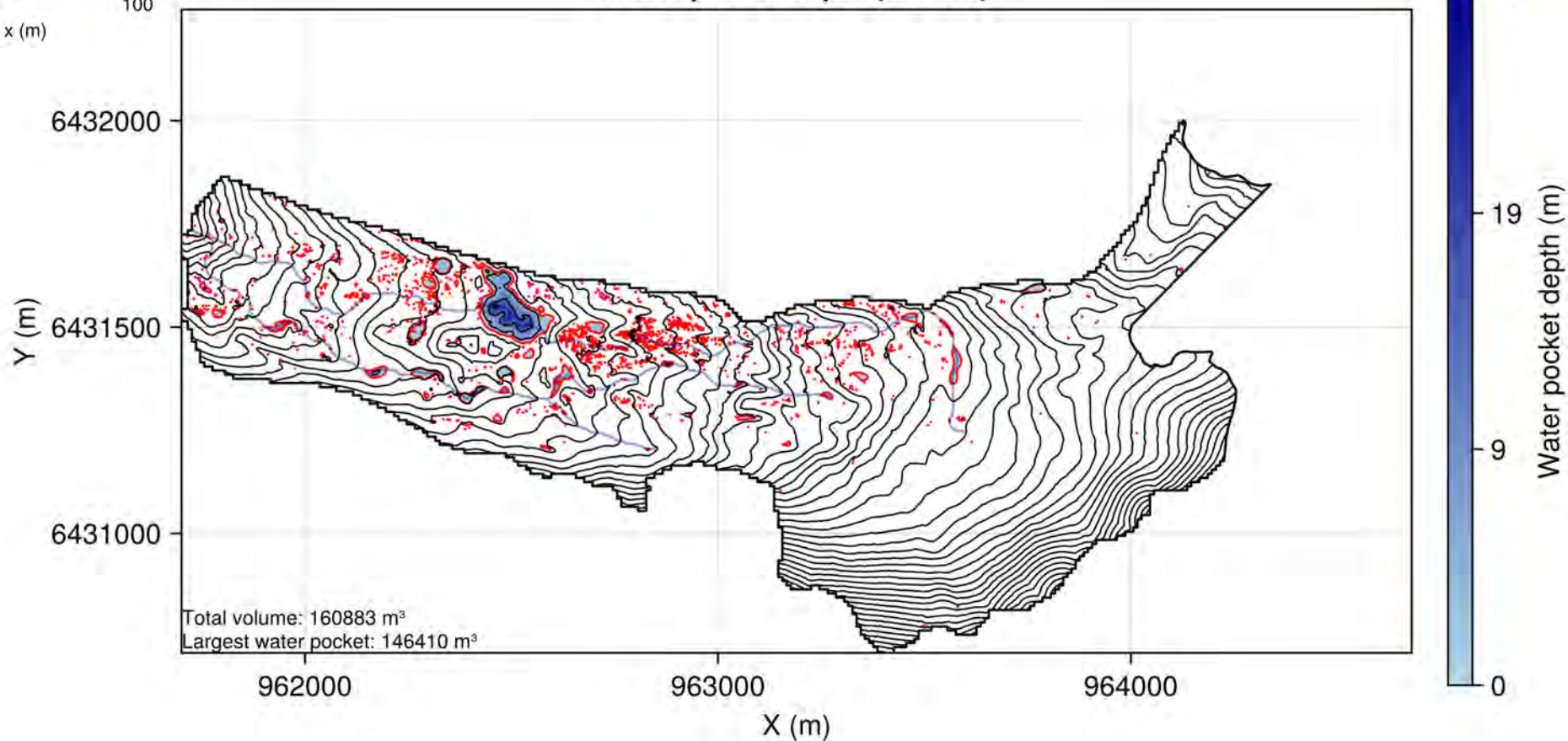
Effondrement d'une cavité observée en aout 2024





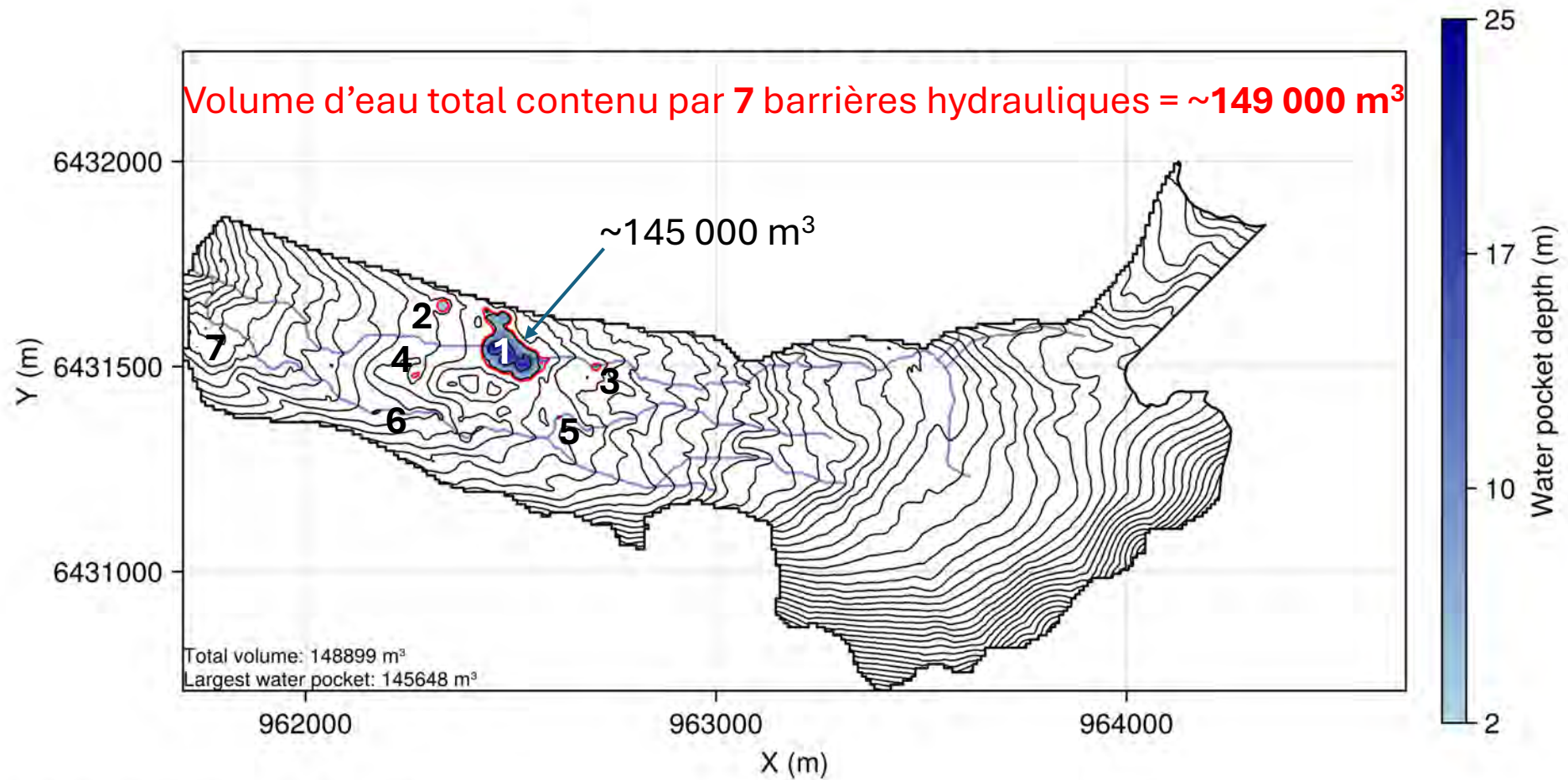
— surface
 — hydraulic head (f=1)
 — bed
 — water pocket depth (f=1)

Water pocket depth (m > 0.0)



Total volume: 160883 m³
 Largest water pocket: 146410 m³

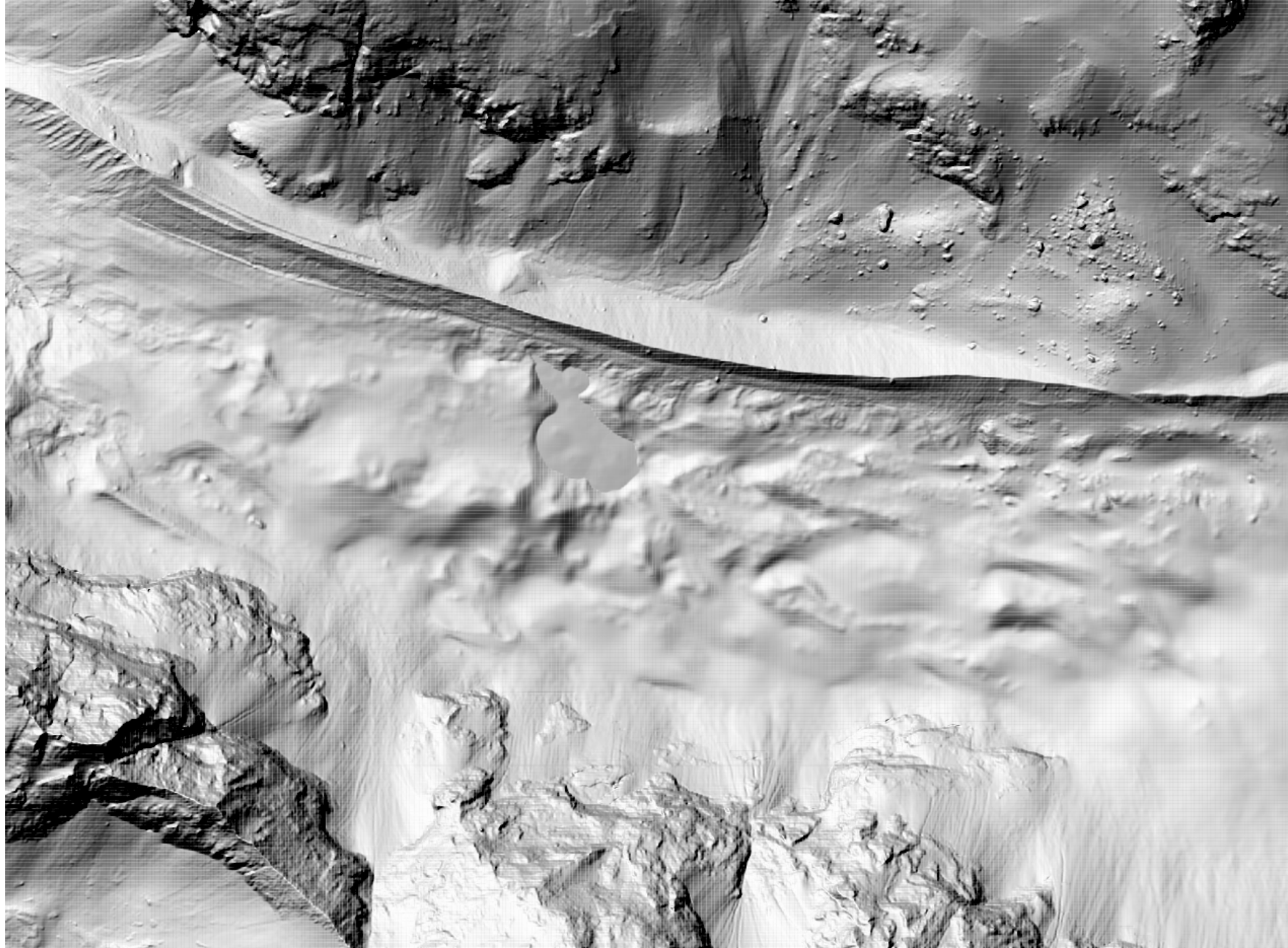
— Hydraulic head (10m intervals)
 — Water pocket outlines
 — Upslope area > 100000 m²

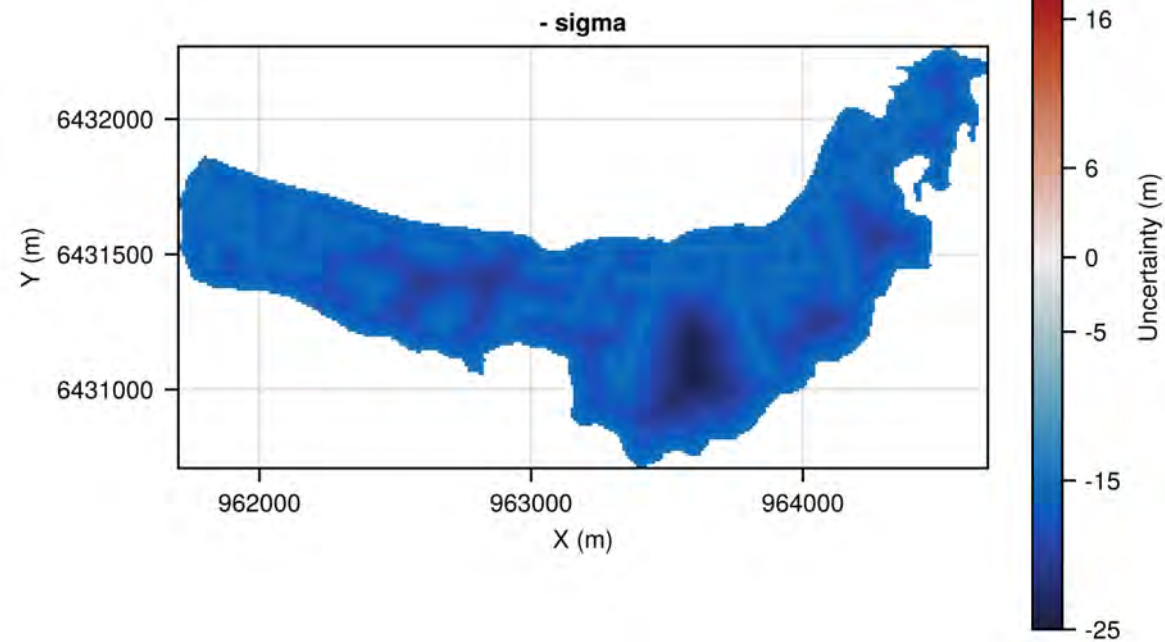
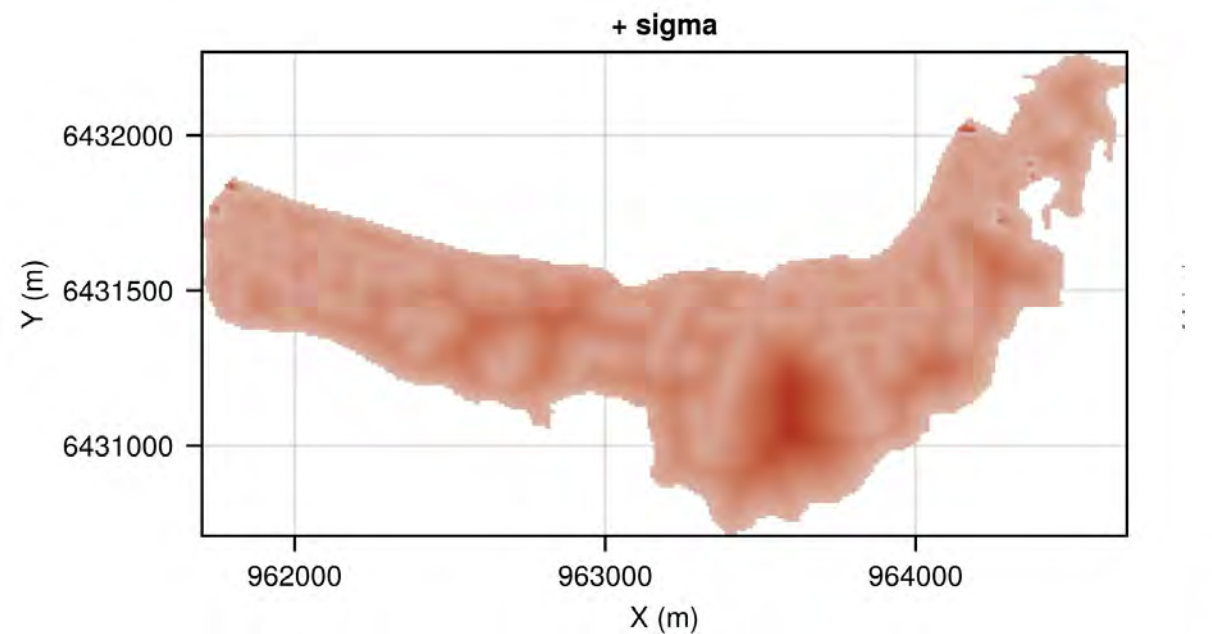
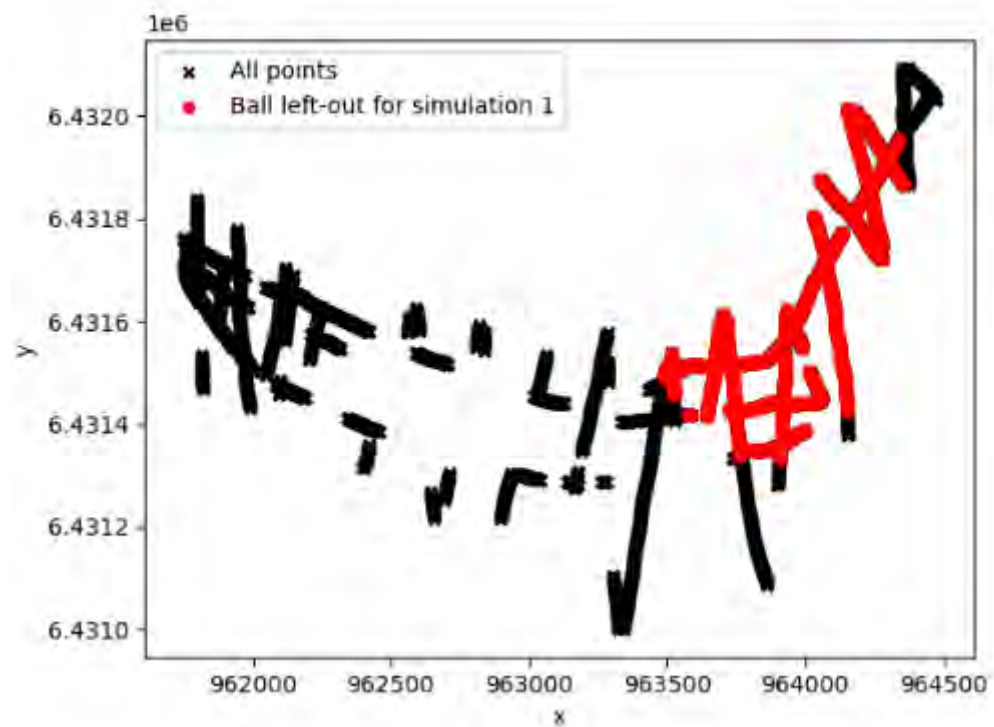


— Principaux écoulements sous glaciaire

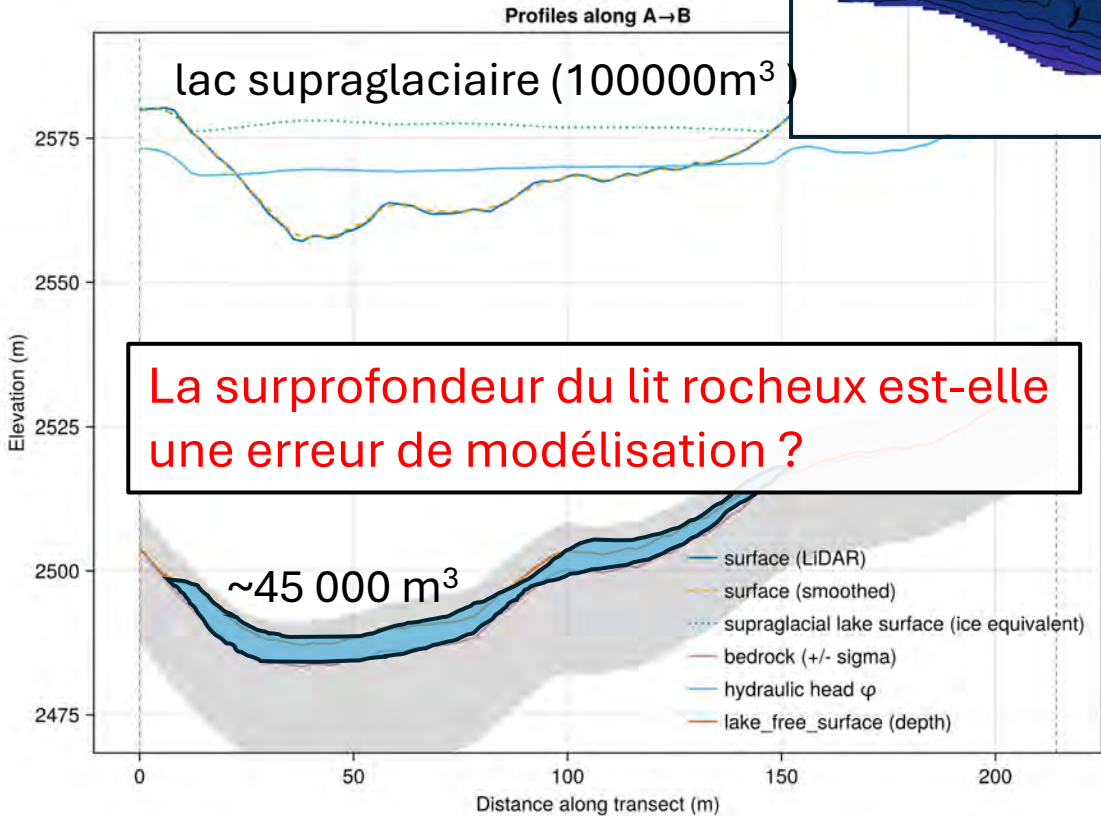
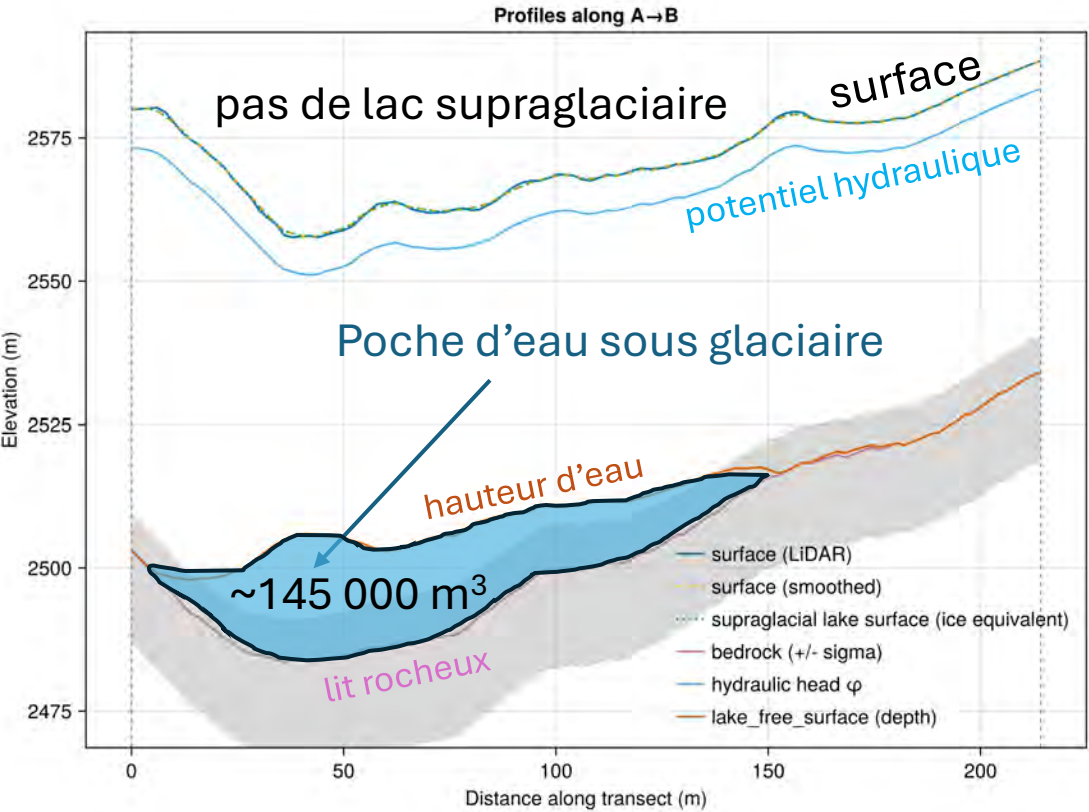
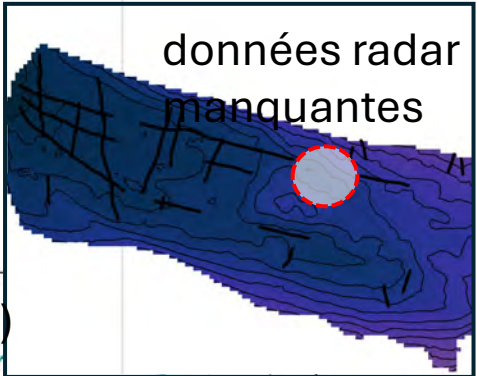
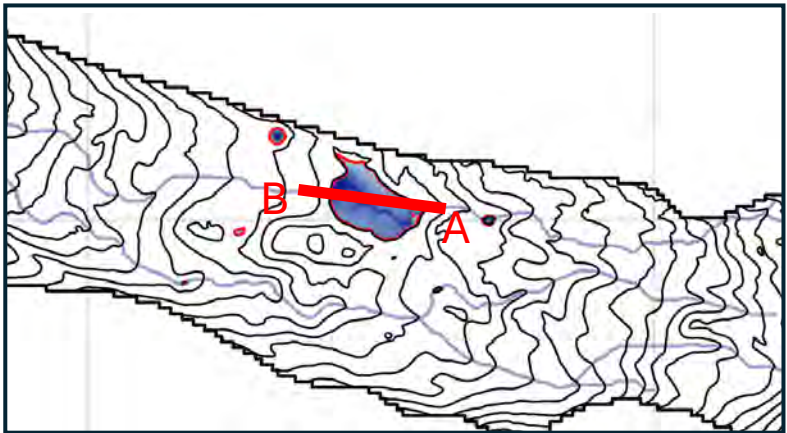
— Contour de la charge hydraulique
(intervalle 10m)

— Poche d'eau et hauteur d'eau associée





Quelle géométrie
pour la poche d'eau
principale ?



Effect of surface smoothing on lake volume

