



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



# Instrumentation du glacier de Bonne Pierre en 2025

Mars 2026

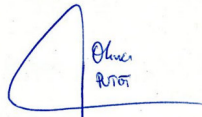
Etabli par :



Agence RTM Alpes du Nord  
Office National des Forêts

Service RTM de l'Isère  
9 quai Créqui  
38026 Grenoble cedex  
Tel : 04.76.22.31.50  
Mail : [rtm.grenoble@onf.fr](mailto:rtm.grenoble@onf.fr)

Date du dernier enregistrement	Désignation du document	Maitre d'ouvrage	Nombre de pages
08/04/2026	Instrumentation du glacier de Bonne Pierre en 2025	Etat (Direction Départementale des Territoires de l'Isère, DGPR)	42

	Nom Prénom	Fonction
<b>Auteurs</b>	Antoine Blanc <sup>1</sup> , Olivier Gagliardini <sup>2</sup> , Emmanuel Thibert <sup>2</sup> , Julien Brondex <sup>2</sup> , Christophe Ogier <sup>4</sup> , Mylène Bonnefoy-Demongeot <sup>2</sup> , Eric Larose <sup>3</sup> , Diego Cusicansqui <sup>3</sup> , Jakub Kokowski <sup>3</sup>	<sup>1</sup> RTM de l'Isère <sup>2</sup> Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE) <sup>3</sup> Institut des Sciences de la Terre (ISTERRE) <sup>4</sup> ETH Zurich
<b>Contributeurs</b>	Kristian Royer <sup>1</sup> , Benoit Llamas <sup>1</sup> , Clément Roussel <sup>1</sup> , Thierry Chevallier <sup>2</sup> , Nicolas Bertrand <sup>2</sup> , Christophe Girardon <sup>2</sup> , Manon Garnier <sup>2</sup> , Julien Charron <sup>2</sup> , Aurore Seignemartin <sup>2</sup> , Tommy Bulle <sup>2</sup> , Richard Bonnet <sup>2</sup> , Simon Filhol <sup>3</sup> , Victor Ramseyer <sup>4</sup> , Alexis Buffet <sup>4</sup> , Firmin Fontaine <sup>4</sup> , Olivier Laarman <sup>4</sup> , Emmanuel Le Meur <sup>4</sup> , Bruno Jourdain <sup>4</sup> , Laurent Arnaud <sup>4</sup> , Sarah Gourgaud <sup>5</sup> , Baptiste Camus <sup>5</sup> , Arthur Perrin <sup>5</sup>	<sup>1</sup> RTM de l'Isère <sup>2</sup> Parc National des Écrins (PNE) <sup>3</sup> Centre d'Étude de la Neige (CEN) <sup>4</sup> Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE) <sup>5</sup> Institut des Sciences de la Terre (ISTERRE)
<b>Relecteurs</b>	Yannick Robert <sup>1</sup> , Matthieu Schmitt <sup>1</sup> , Bruno Demolis <sup>2</sup>	<sup>1</sup> RTM de l'Isère <sup>2</sup> Référent national ROGP au RTM
<b>Validation</b>	Olivier Putot	Chef du service RTM de l'Isère 

Version	Date	Observations
V0.1	20/03/2026	V0.1 pour relectures internes et externes
V0.2	31/03/2026	Mise à jour suite aux relectures
<b>V1</b>	<b>08/04/2026</b>	<b>Version validée</b>

Photo de couverture : lac supraglaciaire de Bonne Pierre le 6 juin 2025 @ Nicolas Bertrand, Parc National des Ecrins



# Sommaire

<b>1. Introduction</b>	<b>4</b>
1.1. Contexte	4
1.2. Cadre de travail	4
1.3. Objectifs	4
<b>2. Actions mises en œuvre</b>	<b>6</b>
2.1. Visites de terrain du PNE	6
2.2. Prises de vue	6
2.3. Capteurs de hauteur d'eau	7
2.4. Essais de traçage	7
2.5. Capteurs sismologiques	8
2.6. Capteur de hauteur d'eau dans le torrent, jaugeages au sel et modélisation hydrologique	8
2.7. Acquisitions d'images satellites	9
2.8. Acquisitions topographiques	9
2.9. Acquisitions géophysiques	10
2.10. Modélisation des barrières hydrauliques	10
2.11. Synthèse	11
<b>3. Résultats : le lac supraglaciaire</b>	<b>12</b>
3.1. Observations visuelles	12
3.1.1. Période de fonte	12
3.1.2. Suite de la saison	15
3.2. Dynamique de remplissage et de vidange du lac	17
3.3. Connexion du lac au torrent de Bonne Pierre	20
3.4. Interprétations	21
3.4.1. Processus de remplissage et de vidange du lac	21
3.4.2. Lien entre l'apparition du lac et l'enneigement	21
<b>4. Résultats : le glacier de Bonne Pierre</b>	<b>25</b>
4.1. Caractérisation et évolution du glacier	25
4.1.2. Evolution de la topographie de surface	26
4.1.3. Vitesses de déplacements de surface	28
4.2. Débit du torrent émissaire	30
4.3. Potentiel de rétention d'eau à la base du glacier	32
4.3.1. Modélisation des barrières hydrauliques	32
4.3.3. Observations du géophone BER22 en 2025	36
<b>5. Synthèse</b>	<b>37</b>
5.1. Principaux apprentissages	37
5.2. Caractérisation de l'aléa glaciaire	41



# 1. Introduction

## 1.1. Contexte

Dans la nuit du 20 au 21 juin 2024, une crue majeure du torrent des Etançons a impacté le hameau de la Bérarde. Plus de 300 000 m<sup>3</sup> de matériaux ont été exportés par le torrent de Bonne Pierre, affluent rive gauche du torrent des Etançons, et 200 000 m<sup>3</sup> se sont déposés sur le cône de déjection du torrent des Etançons au niveau du hameau. Cet événement n'a pas d'égal dans l'historique connu du torrent et n'a pas été observé à minima depuis plusieurs siècles. Il n'a fort heureusement pas causé de victimes, mais a nécessité l'évacuation de plus de 100 personnes par hélicoptère et a impacté plus de 60 bâtiments ainsi que les différents réseaux (route, électricité, AEP, assainissement).

Un travail de rétro-analyse de la crue a été conduit en 2024 par le RTM en étroite collaboration avec la communauté scientifique, pour le compte de l'Etat. Ce travail met en avant les différents facteurs ayant mené à la crue du 21 juin : une disponibilité en matériaux importante sur les pentes fortes du torrent de Bonne Pierre, un épisode de pluie sur neige notable, et un phénomène glaciaire au niveau du glacier de Bonne Pierre. La crue du 21 juin 2024 est désormais considérée comme la crue de référence du torrent des Etançons à la Bérarde (voir rapport de rétro-analyse<sup>1</sup>). Trois articles scientifiques ont fait suite au travail de rétro-analyse (Mainieri et al., 2025<sup>2</sup> ; Ogier et al., preprint<sup>3</sup> ; Filhol et al., preprint<sup>4</sup>).

La rétro-analyse apporte des éléments tangibles sur la contribution glaciaire à la crue par une analyse de la temporalité de l'évènement. Le phénomène glaciaire semble lié à la vidange d'un lac supraglaciaire temporaire d'environ 100 000 m<sup>3</sup> sous le glacier de Bonne Pierre. Ce lac apparaissait de manière temporaire les années précédentes, sans que sa vidange annuelle ne génère de débits significatifs. Des incertitudes fortes persistent sur les processus à l'origine du remplissage et de la vidange plus ou moins rapide de ce lac, ainsi que sur le fonctionnement plus global du glacier de Bonne Pierre et la possibilité de rétentions d'eau à l'intérieur ou à la base du glacier.

En accord avec la municipalité de Saint-Christophe-en-Oisans, il a été proposé de mettre en observation le glacier de Bonne Pierre en 2025 pour mieux comprendre son fonctionnement. Le présent rapport synthétise les actions mises en place en 2025 et les principaux apprentissages et hypothèses sur le fonctionnement du glacier et du lac.

## 1.2. Cadre de travail

Cette action d'instrumentation pilotée par le service RTM de l'Isère a été menée en collaboration avec le Parc National des Ecrins (PNE), l'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), l'Institut des Sciences de la Terre (ISTERRE) et le Centre d'Etude de la Neige de Météo France (CEN). EDF-DTG a aussi ponctuellement contribué à l'action sur le volet hydrologique. Cette action s'inscrit dans le Plan national d'actions pour la prévention des risques d'origines glaciaire et périglaciaire financé par le ministère en charge de l'Ecologie (DGPR). Elle a également été financée par la Direction Départementale des Territoires de l'Isère.

L'instrumentation mise en place a pour objectif d'améliorer la connaissance sur le glacier de Bonne Pierre. **Elle n'est pas configurée pour assurer une surveillance du lac ou du glacier.**

Les différentes actions mises en place en 2025 ont fait l'objet d'un rapport par chaque producteur (laboratoire de recherche, prestataire) agrégés dans un document Annexe. Le présent rapport synthétise les différentes actions mises en place et les principaux apprentissages.

## 1.3. Objectifs

Les principales questions qui se posent en amont de la saison 2025 sont les suivantes :

- Est-ce que la vidange rapide de 2024 permettra une nouvelle formation du lac en 2025 ?
- Quelle est la période d'apparition, de niveau maximal, et de disparition du lac ?

---

<sup>1</sup> <https://www.onf.fr/vivre-la-foret/+/246e::rapport-de-retro-analyse-de-levenement-de-la-berarde.html>

<sup>2</sup> Mainieri et al., *Les aspects géomorphologiques de la crue torrentielle du torrent des Etançons à la Bérarde du 21 juin 2024*, Géomorphologie : relief, processus, environnement, vol. 31 - n° 4 | 2025, 253-263

<sup>3</sup> Ogier et al., *Potential glacier contributions to the 2024 La Bérarde flood*, preprint NHSS

<sup>4</sup> Filhol et al., *Compound Drivers and Spatial Connectivity led to the Devastating Debris Flood in the Village of La Bérarde*, June 2024, French Alps, preprint NHSS

- *Quelles sont le volume et les vitesses de remplissage et de vidange du lac ?*
- *Quelles sont les processus à l'origine de la formation et de la vidange du lac ?*
- *Y a-t-il une connectivité hydraulique identifiable entre le lac et le torrent émissaire du glacier ?*
- *Existe-t-il d'autres réservoirs d'eau intra-glaciaires et est-il possible d'en estimer les volumes relativement à celui mesurable pour le lac en surface du glacier ?*
- *Est-ce que le glacier de Bonne Pierre joue un rôle tampon dans l'hydrologie du bassin versant ?*

Il paraît bien évidemment utopiste de penser pouvoir répondre complètement à toutes ces questions, étant donné les limites des méthodes et outils à disposition pour comprendre un tel appareil glaciaire. De plus, les environnements glaciaires sont évolutifs, et les éléments de compréhension basés sur des observations peuvent devenir invalides à l'avenir. Cela n'empêche pas la mise en place d'actions **permettant d'apporter des éléments de réponse à ces questions**. C'est l'objet de l'instrumentation du glacier de Bonne Pierre en 2025.

## 2. Actions mises en œuvre

Nous présentons dans cette première partie les différentes actions mises en œuvre en 2025 sur le glacier de Bonne Pierre, que ce soient des actions de terrain - observation visuelle, instrumentation, campagne de mesure - ou du traitement de données (modélisations, analyses).

### 2.1. Visites de terrain du PNE

Le Parc National des Ecrins a effectué 12 visites de terrain entre le 9 avril et le 25 septembre. L'itinéraire suivi par les agents du Parc passait par le front du glacier puis par la zone du lac supraglaciaire. Chaque visite a fait l'objet de prises de vues depuis des points fixes puis d'un compte rendu illustré. Ces documents sont agrégés dans le rapport Annexe. La fréquence des visites a été rapprochée sur la période de présence du lac supraglaciaire, avec 6 visites entre le 23 mai et le 24 juin. La fréquence des visites avant et après cette période a été mensuelle. Les visites ont parfois été couplées à des missions des laboratoires ou du RTM afin que le Parc apporte un appui logistique ou technique à l'instrumentation.



Figure 1: Agent du PNE au fond de la dépression principale du lac supraglaciaire le 9 mai. Source : PNE.

**Objectif :** *Disposer d'un suivi visuel régulier de l'évolution du lac supraglaciaire et du glacier de Bonne Pierre.*

### 2.2. Prises de vue

Trois appareils photos ont été installés par le RTM avec l'aide du PNE (Figure 2) :

- Un piège photo Reconyx a été installé sur un gros bloc situé en rive gauche du torrent de Bonne Pierre à 100 m du front du glacier. L'objectif est de visualiser le chenal torrentiel à l'exutoire du glacier ;
- Un piège photo Reconyx a été installé sur un gros bloc situé en amont et en rive droite des dépressions accueillant le lac supraglaciaire, sur le glacier. L'objectif est de visualiser le lac supraglaciaire temporaire ;
- En complément du précédent appareil, une caméra grand angle Tikee a été installée sur la moraine latérale rive droite du glacier, au niveau du lac. Cette caméra est installée sur un mât d'environ 2 m de hauteur, fixé à un bloc situé dans le talus nord de la moraine (plus stable que le talus sud en érosion constante). L'objectif est aussi de visualiser le lac, avec une vue plus plongeante que le piège photo Reconyx.



Figure 2: Gauche : Emplacement des appareils photo sur fond orthophoto 2024 (IGN). Droite : Appareils installés, de haut en bas : Reconyx front, Reconyx lac, Tikee.

Les pièges photos Reconyx ont été installés le 23 avril, et la caméra Tikee a été installée le 11 juin. Les trois appareils ont été désinstallés le 9 octobre. La fréquence de prise de vue est de 5 minutes pour les appareils Reconyx et de 15 minutes pour la caméra Tikee (compromis entre fréquence et poids des images). Les photos sont prises entre 5h30 et 22h30. Des timelapses ont été produits pour chacun des trois appareils sur toute la période de prise de vue.

**Objectif :** *Disposer d'un suivi visuel à haute fréquence temporelle de l'évolution du lac supraglaciaire et du front du glacier de Bonne Pierre.*

### 2.3. Capteurs de hauteur d'eau

Trois piézomètres autonomes ont été installés par l'IGE dans les dépressions de surface accueillant le lac supraglaciaire. Un quatrième capteur mesurant la pression atmosphérique a été installé sur la moraine latérale. La pression d'eau mesurée par les piézomètres est ainsi corrigée de la pression atmosphérique pour obtenir des valeurs de hauteur d'eau. Au-delà des observations qualitatives issues des visites de terrain et des appareils photo, ces capteurs permettent ainsi des observations quantitatives sur le remplissage et la vidange du lac.

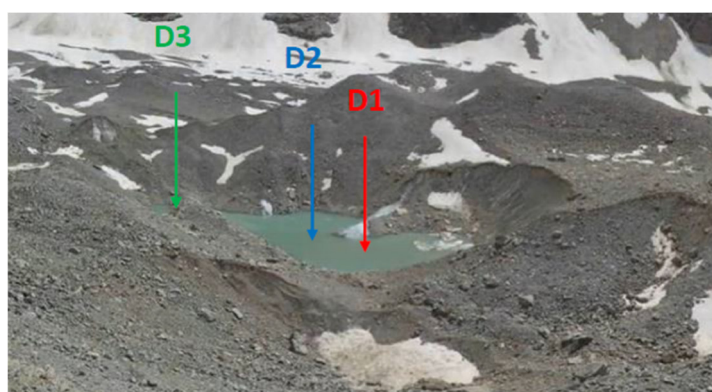


Figure 3: Localisation approximative des piézomètres dans le lac en 2025 (vue depuis la moraine rive droite). Source : IGE

Les capteurs D2 et D3 ont fourni des mesures au pas de temps 5 minutes du 18 avril au 24 juin. Le capteur D1 a fourni des mesures au pas de temps une minute du 5 mai au 24 juin.

**Objectif :** *Mesurer l'évolution de la hauteur d'eau dans le lac supraglaciaire.*

### 2.4. Essais de traçage

Deux essais de traçage ont été réalisés, le 18 juin et le 13-14 octobre. Ces essais consistent en une injection d'un traceur en un certain point d'un écoulement (ici de la Rhodamine) puis en une mesure de

la concentration de ce traceur dans l'écoulement en aval. Les concentrations mesurées et le temps de décalage entre l'injection et la mesure donnent des informations sur la connectivité hydraulique entre le point d'injection et le point de mesure. Pour les deux essais, l'injection a été effectuée au niveau de la dépression aval du lac, et la mesure de concentration au niveau du torrent émissaire du glacier de Bonne Pierre.



Figure 4: Rhodamine dans la dépression aval du lac avant a vidange complète, le 18 juin 2025. Source : IGE.

**Objectif :** Qualifier la connexion entre le lac supraglaciaire et le torrent de Bonne Pierre.

## 2.5. Capteurs sismologiques

Trois géophones ont été installés par ISTERRE le 23 avril en aval du glacier et sur le glacier :

- Un géophone en rive droite du torrent de Bonne Pierre, à environ 150 m du front du glacier ;
- Deux géophones sur le glacier, à proximité directe des dépressions du lac (en rive droite et en aval).



Figure 5: Emplacement des trois géophones installés par ISTERRE en 2025 (source : ISTERRE)

Les capteurs ont été opérationnels jusqu'à mi-septembre voire fin septembre pour le BER22.

Les géophones mesurent les vibrations du sol et du glacier. Dans le cas du sol, les mesures ont été utilisées pour tenter de reconstituer le débit du torrent puisqu'un lien existe entre les turbulences de l'écoulement et les modes de vibration du sol à certaines fréquences. Dans le cas du glacier, le rapport des vibrations horizontales et des vibrations verticales permet de formuler des hypothèses sur le contact entre le glacier et les matériaux sous-jacents (glacier en contact avec le sol, décollement, présence de cavités).

**Objectifs :** Estimer des débits à l'exutoire du glacier et identifier d'éventuelles cavités sous/intra-glaciaires.

## 2.6. Capteur de hauteur d'eau dans le torrent, jaugeages au sel et modélisation hydrologique

Une prestation de mesure du débit du torrent de Bonne Pierre a été commandée au bureau d'étude ATEAU. Un capteur de hauteur d'eau a été installé sur un gros bloc en rive droite du torrent 110 m en aval du glacier. Les données de hauteur d'eau du torrent sont disponibles au pas de temps 10 minutes

entre le 13 juin et le 7 octobre. En parallèle, 20 mesures directes du débit par dilution au sel ont été effectuées au cours de 6 campagnes étalées dans la saison. Ces mesures permettant d'établir une relation entre la hauteur d'eau et le débit (courbe de tarage), qui est ensuite appliquée aux mesures de hauteur d'eau en continu afin d'obtenir une estimation du débit du torrent sur toute la saison. En parallèle, ATEAU a installé un pluviomètre à proximité du torrent du 18 août au 7 octobre.

Le rapport de la prestation de ATEAU est présent dans le rapport Annexe.



Figure 6: Gauche : capteur de hauteur d'eau. Droite : mesure par dilution au sel (injection et mesure des salinomètres en aval). Source : ATEAU.

Afin de confronter les débits observés du torrent aux débits attendus, une modélisation du débit du torrent de Bonne Pierre en sortie de glacier a été effectuée par EDF-DTG à l'aide du modèle hydrologique Mordor. Une note technique présentant la méthode mise en place pour cette modélisation est aussi présente dans le rapport Annexe.

*Objectifs : Estimer des débits à l'exutoire du glacier, estimer l'influence du remplissage et de la vidange du lac sur les débits, estimer le rôle joué par le glacier sur l'hydrologie du bassin versant.*

## 2.7. Acquisitions d'images satellites

7 images satellite Pléiades à haute résolution ont été commandées par ISTERRE et le CEN en 2025 sur la zone d'étude élargie. Ces images - du 20 mars au 9 novembre - fournissent des orthophotographies de la région et ont été traduites en modèle numérique de surface (MNS). Ces données permettent une analyse de la dynamique du glacier : évolution de l'épaisseur, évolution des champs de vitesses.

*Objectif : Estimer l'évolution de la topographie de surface et des vitesses de surface en incluant les images satellites les plus récentes.*

## 2.8. Acquisitions topographiques

Une prestation de lidar sous drone a été commandée à l'entreprise STYX4D sur la totalité du glacier afin d'avoir une topographie de surface actualisée. Le vol drone a été réalisé le 9 octobre 2025. Cette campagne donne accès à une orthophotographie du glacier, et à un modèle numérique de terrain (MNT). Le rapport de la prestation est inclus dans le rapport Annexe. La différence entre ce MNT et les MNT de 2024 (juin, octobre) permet d'analyser de manière précise l'évolution de la topographie de surface.



Figure 7: Vol drone du 9 octobre 2025. Source : STYX4D.

En parallèle, un vol photogrammétrique a été effectué par le RTM au niveau du lac supraglaciaire rapidement après sa disparition, le 24 juin. Ce vol fournit une orthophotographie et un modèle numérique de surface de la zone. Cette donnée topographique précise, couplée aux mesures de hauteur d'eau dans le lac, permettent d'estimer l'évolution du volume du lac en 2025.

**Objectifs :** Mesurer l'évolution de la topographie de surface du glacier entre 2024 et 2025, estimer l'évolution du volume d'eau dans le lac.

## 2.9. Acquisitions géophysiques

Une première campagne de radar sous hélicoptère a été menée le 6 novembre 2024 dans le cadre d'une prestation commandée à l'ETH Zurich. Les résultats de cette première campagne sont remobilisés dans le présent rapport, et le livrable de l'ETHZ est inclus au rapport Annexe.

Une seconde campagne radar a été effectuée par l'IGE le 26 février 2026, cette fois-ci sous drone et au sol. L'objectif de cette campagne a été de préciser les premiers résultats obtenus par l'ETHZ en couvrant des zones spécifiques avec une meilleure résolution spatiale.

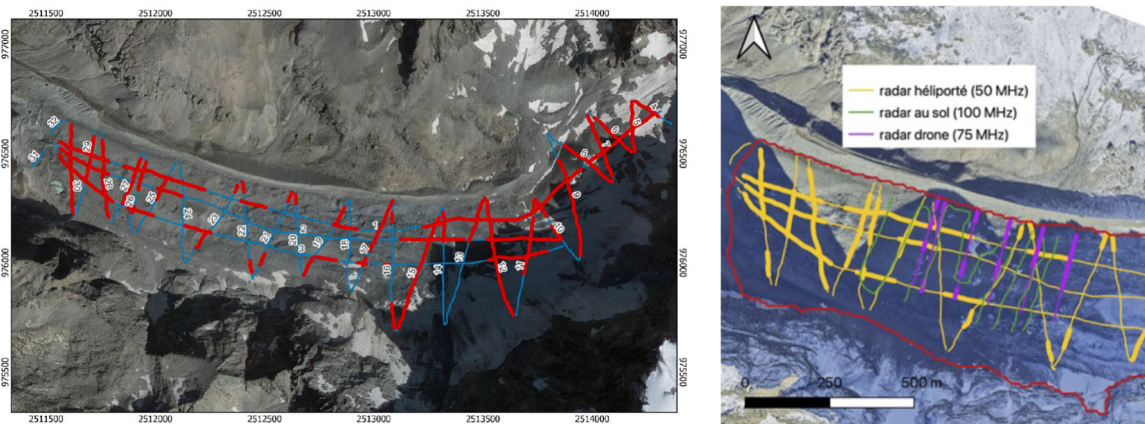


Figure 8 : Gauche : profils radar effectués par hélicoptère le 6 novembre 2024 sur la totalité du glacier (ETHZ). Droite : profils radar effectués au sol (vert) et sous drone (violet) à proximité de la zone du lac le 26 février 2026 (IGE).

**Objectif :** Estimer les épaisseurs de glace et la topographie sous-glaciaire, repérer d'éventuelles anomalies pouvant correspondre à des cavités intra-glaciaires.

## 2.10. Modélisation des barrières hydrauliques

Le glacier de Bonne Pierre possède une pente de surface faible et une topographie de surface chahutée, le rendant favorable à la présence de barrières hydrauliques capables de retenir l'eau à sa base : les variations d'épaisseur de glace jouent sur la pression exercée par la glace, et ainsi sur les écoulements d'eau à la base qui ne suivent pas directement la topographie de surface (redirections, points de blocage).

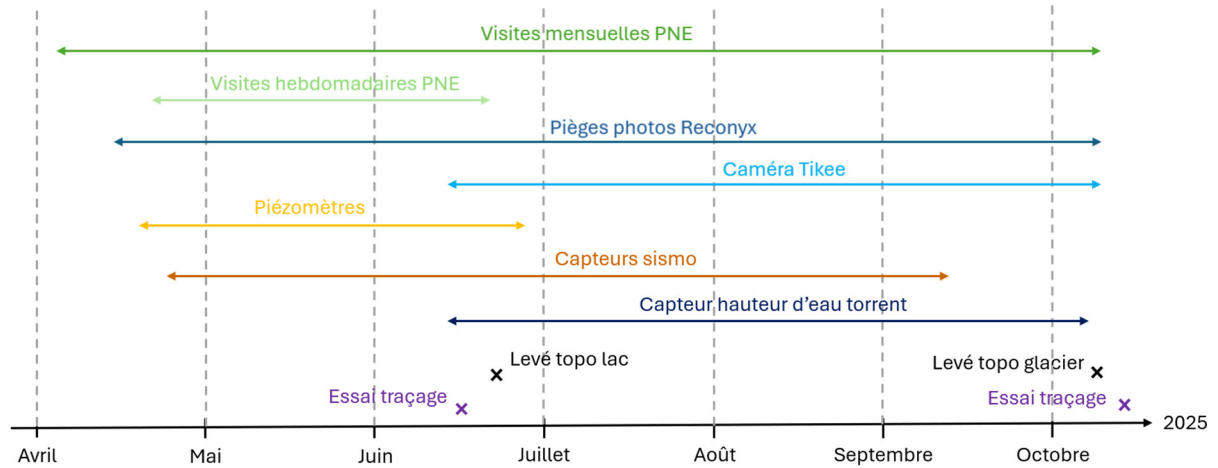
Un travail de modélisation des barrières hydrauliques a été effectué sur le glacier de Bonne Pierre par

l'ETH Zurich en lien avec l'IGE. Ce travail théorique se base sur la topographie de surface (obtenue par lidar) et sur la topographie sous-glaciaire (estimée par radar) afin de modéliser les points de blocages des écoulements sous-glaciaires et les potentiels volumes d'eau retenus. Ce sujet est émergent dans le monde de la recherche, et fait actuellement l'objet de la soumission d'un article scientifique.

Objectifs : Analyser si la morphologie du glacier est favorable à la rétention d'eau (poche d'eau mécaniques) – Analyser les grands axes d'écoulements à la base du glacier.

## 2.11. Synthèse

La Figure 9 propose une représentation simplifiée de la couverture temporelle des principales actions de terrain et instrumentations effectuées en 2025. Ces actions représentent une trentaine de visites.



### 3. Résultats : le lac supraglaciaire

Nous abordons dans cette partie les observations de 2025 au niveau du lac supraglaciaire. Afin de faciliter la lecture des descriptions et interprétations, la Figure 10 propose une nomenclature pour les différentes zones abordées, situées en rive droite du glacier vers 2560 m d'altitude.

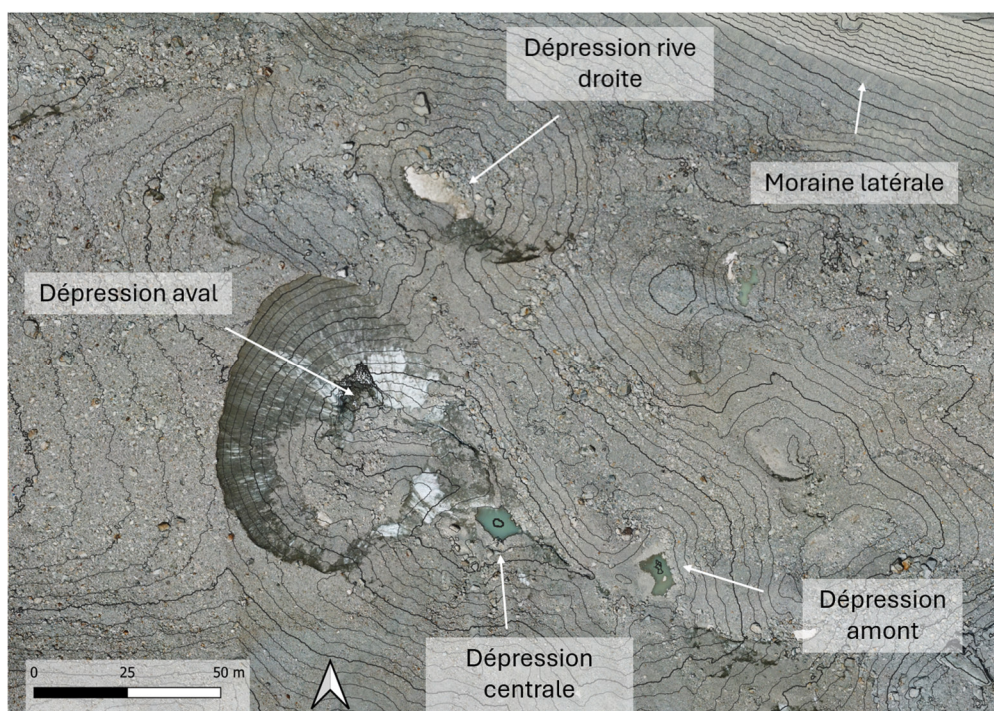


Figure 10 : Lac supraglaciaire vide le 24 juin 2025 (vol photogrammétrique RTM). Les courbes de niveau sont représentées à 5 m (traits épais) et à 2 m (traits fins).

La dépression aval est la plus importante, et est connectée à un entonnoir plongeant dans le glacier au niveau duquel le lac se vidange. Le 17 juin 2024, avant la crue du 21 juin, le lac couvrait l'ensemble des dépressions identifiées dans la Figure 10.

#### 3.1. Observations visuelles

##### 3.1.1. Période de fonte

Les visites de terrain ont débuté le 9 avril. A cette date, le bassin versant est encore largement enneigé et le lac est absent. La dépression centrale laisse apparaître de l'eau sous la neige, qui ne correspond pas à un véritable remplissage du lac, mais plutôt à un remplissage isolé de cette petite dépression de surface (Figure 11).

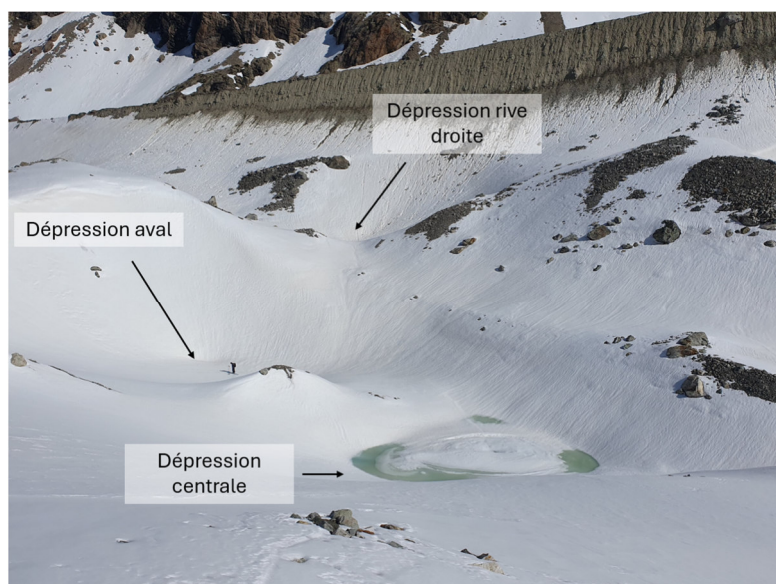


Figure 11: Zone du lac le 9 avril 2025. Source : PNE.

Ce petit remplissage de la dépression centrale est aussi partiellement visible sous la neige lors des visites du 28 avril et du 9 mai. A ces dates, le lac n'est toujours pas présent. Des crevasses circulaires sont visibles dans la neige en bordure de la dépression aval, signe d'un affaissement local pouvant être lié à un petit remplissage éphémère suivi d'une vidange sous la neige (Figure 12).

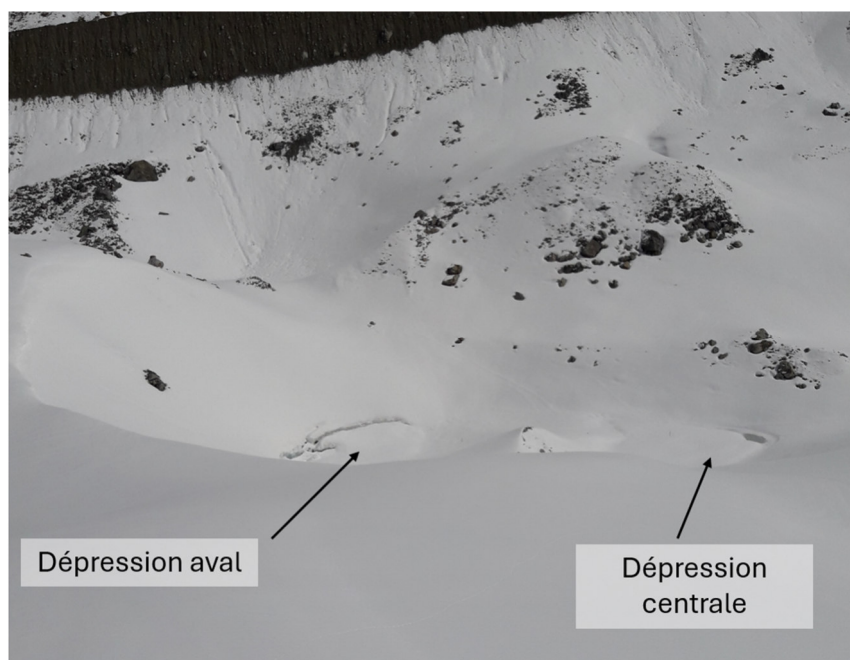


Figure 12: Zone du lac le 9 mai 2025. Source : PNE.

Le véritable remplissage du lac s'amorce le 23 mai par la dépression aval. A cette date, le niveau d'eau dans la dépression aval ne permet pas la connexion à la dépression centrale. Le niveau plus élevé observé le 28 mai permet une connexion du lac à la dépression centrale. Le niveau du lac est encore plus important le 6 juin, permettant une connexion à la dépression amont, tandis que l'enneigement aux abords du lac est fortement réduit (Figure 13).

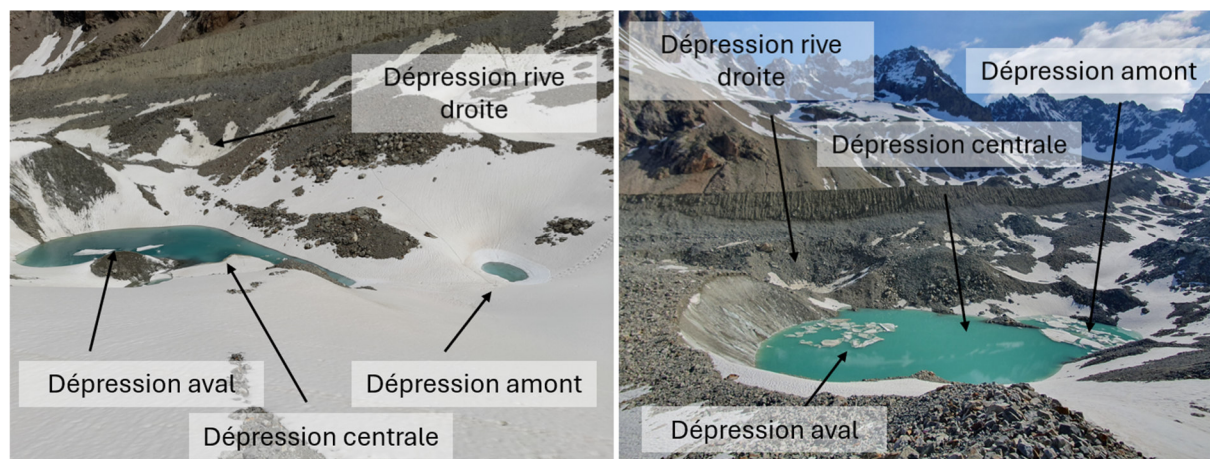


Figure 13: Zone du lac le 28 mai et le 6 juin. Source : PNE.

Le niveau du lac est plus faible le 11 juin (marnage observé), signe que le volume maximal du lac a été atteint entre le 6 et le 11 juin en 2025. Le niveau maximal du lac en 2025 n'a donc pas permis une connexion à la dépression rive droite, contrairement à 2024. La décroissance du niveau du lac s'est ensuite poursuivie de manière régulière sur plusieurs jours, et le lac est complètement vide lors de la visite du 24 juin.

L'évolution globale du lac en 2025 est bien retranscrite par les images du piège photo présent sur le glacier (vue différente, depuis l'amont en rive droite du glacier). Ces images permettent de préciser les dates d'apparition, de niveau maximum, et de disparition du lac.

Le remplissage de la dépression aval observé le 23 mai par le PNE était déjà amorcé le 22 mai. Néanmoins, la dynamique de remplissage a été quasi nulle jusqu'au 26 mai, date à partir de laquelle le remplissage du lac devient continu (Figure 14). Le niveau maximal est observé aux alentours du 8 juin, avant une décroissance progressive et régulière du niveau.

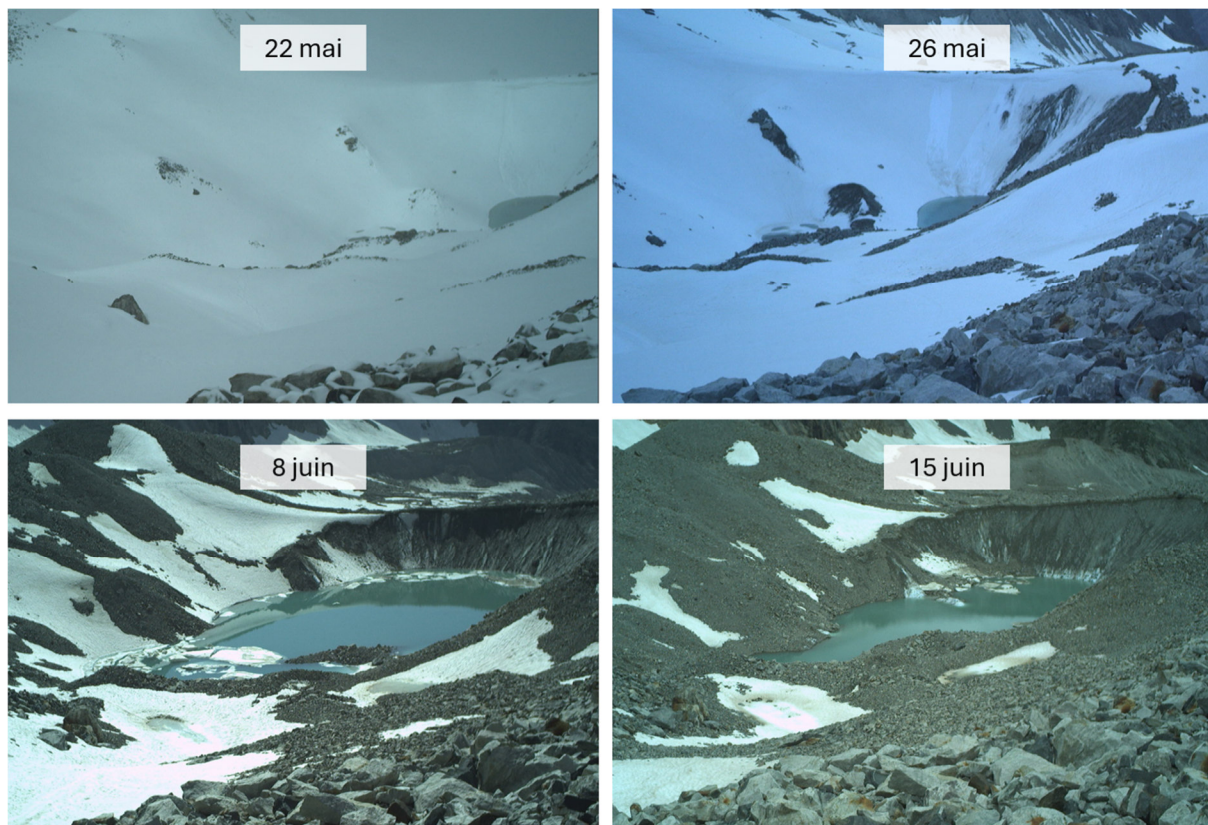


Figure 14: Photos du Reconyx installé sur le glacier en amont du lac, à 4 dates différentes.

La caméra grand angle présente sur la moraine capte bien la disparition du lac. Elle met en évidence une déconnexion de la dépression aval et de la dépression centrale le 19 juin, suivie de la disparition totale du lac dans la même journée (Figure 15). La couleur rose de l'eau dans la dépression aval est liée à l'essai de traçage effectué par l'IGE à cette date.

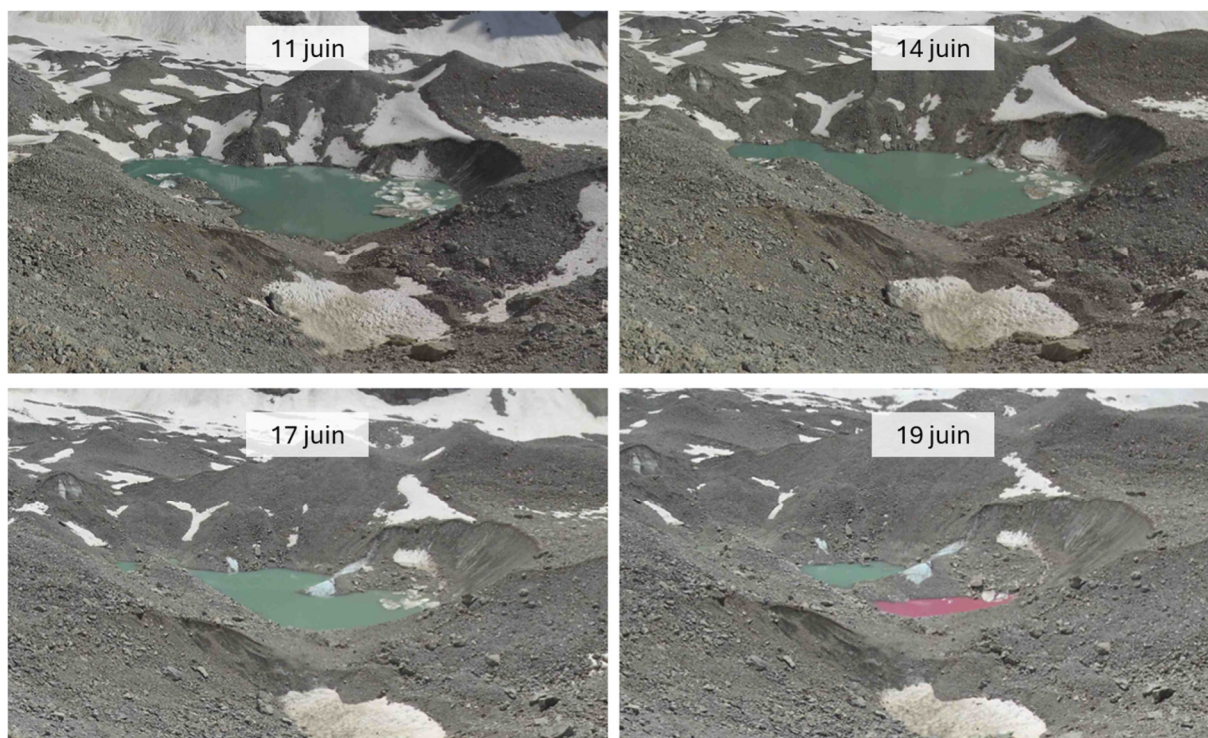


Figure 15: Décroissance du niveau du lac observé depuis la moraine rive droite.

En résumé, les observations visuelles montrent que le lac supraglaciaire temporaire de Bonne Pierre s'est reformé en 2025. Le véritable remplissage du lac s'est amorcé le 26 mai, le niveau maximal du lac a été atteint aux alentours du 8 juin, et la disparition du lac a été observée le 19 juin.

Il est à noter qu'aucun écoulement de surface significatif n'a été observé en amont du lac lorsque ce dernier était présent (pas de bédrière ou d'écoulement significatif entendu sous la neige ou les débris

rocheux). Un faible écoulement a été observé en surface le 24 juin, après la disparition du lac. Les eaux arrivant de l'amont transitent par la dépression centrale (petite flaqué) avant de surverser dans une bédrière vers la dépression aval puis dans l'entonnoir plongeant dans le glacier (Figure 16).

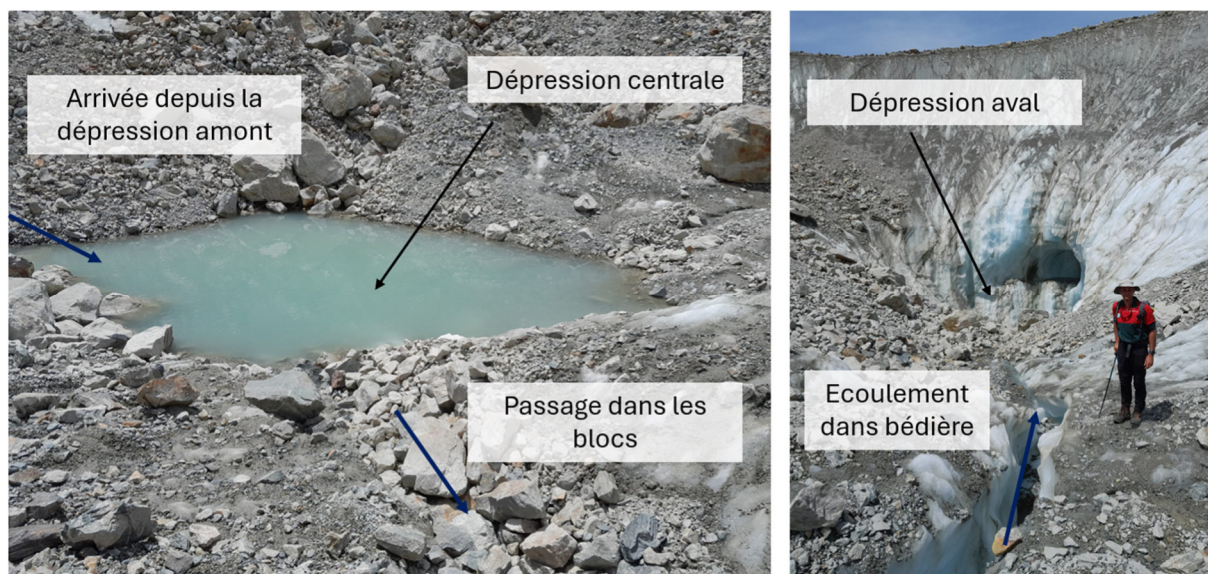


Figure 16: Dépression amont et vue vers la dépression aval le 24 juin.

### 3.1.2. Suite de la saison

Les visites de terrain effectuées par la suite ont toujours trouvé le lac vide. Néanmoins, les pièges photos mettent en évidence certaines périodes de remplissage de la dépression aval à la suite d'épisodes de précipitations. Le volume associé à ces remplissages éphémères est très faible, puisque le niveau du lac peine à atteindre la cote permettant une connexion avec la dépression centrale. Nous abordons néanmoins chacun de ces épisodes, en faisant le lien avec la chronique de précipitations Antilope sur le bassin versant du glacier de Bonne Pierre (Antilope : lame d'eau radar corrigée par les pluviomètres, donnée Météo France).

Le 20 juin, au lendemain de la disparition du lac, un orage de 25 mm est observé entre 15h et 18h (pic d'intensité marqué de 13 mm/h entre 15h et 16h). La dépression aval se remplit dès 16h30 et atteint son niveau maximal autour de 19h30 (Figure 17). La dépression se vide ensuite progressivement et disparaît le 21 juin à 11h30. Les dépressions centrales et amont contiennent aussi de petites quantités d'eau.



Figure 17: Vue sur la zone du lac depuis la moraine après l'orage du 20 juin.

Dans la nuit du 20 au 21 juillet, un épisode de précipitations apporte 30 mm entre 0h et 8h (pic d'intensité régulier de 5 mm/h environ entre 1h et 6h). La dépression aval se remplit dans la nuit et le remplissage se poursuit au lever du jour entre 6h et 9h (Figure 18). Le niveau se maintient toute la journée du 21 juillet, et la dépression est vide le 22 juillet à 11h.

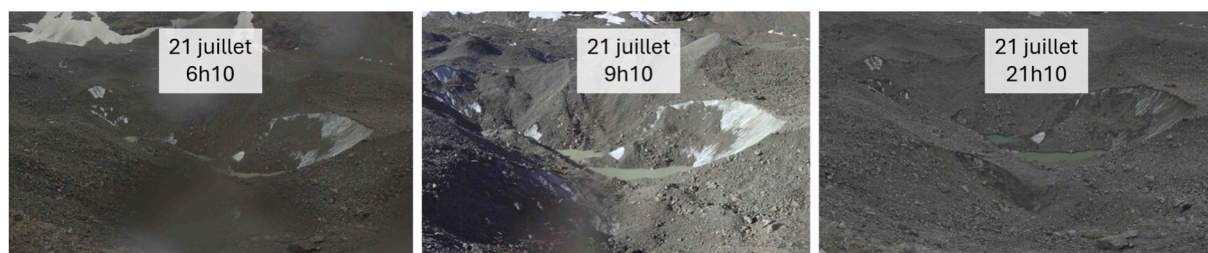


Figure 18: Vue sur la zone du lac après les précipitations de la nuit du 20 au 21 juillet.

Un très faible remplissage de la dépression aval est observé le 28 août suite à un épisode de 24 mm

entre 3h et 13h (intensités régulières et faibles, de l'ordre de 2 à 3 mm/h). La dépression aval se remplit dès 11h45 et le niveau maximal est atteint à 13h15 (Figure 19). Ce niveau se maintient quasiment jusqu'à la fin de journée.



Figure 19: Vue sur la zone du lac après les précipitations du 28 août.

Un orage est observé juste après cet épisode, en soirée du 28 août avec 11 mm entre 21h et 0h (pic d'intensité de 7 mm/h entre 22h et 23h). Cet épisode fait repartir à la hausse le niveau de la dépression aval, qui est déjà à son maximum au lever du jour le 29 août. Le niveau se maintient jusqu'à la mi-journée avant de baisser (Figure 20). La dépression est vide au lever du jour le 30 août.



Figure 20: Vue sur la zone du lac après les précipitations dans la nuit du 28 au 29 août.

Un dernier épisode de précipitations est observé entre le 21 au 22 septembre, avec 38 mm entre 16h et 5h (pic d'intensité de 5 mm/h entre 17h et 19h). Le niveau d'eau maximal est observé dès le lever du jour, et est suffisamment élevé pour permettre une connexion avec la dépression centrale (Figure 21). L'abaissement du niveau d'eau est de nouveau très lent et la dépression se vide complètement le 23 septembre à 16h.



Figure 21: Vue sur la zone du lac après les précipitations du 21 au 22 septembre.

En résumé, un remplissage de la dépression aval est observé à 5 reprises au cours de l'été à la suite d'épisodes de précipitations. Il est difficile de qualifier le déphasage entre les précipitations et le remplissage de la dépression, puisque 3 épisodes sur 5 ont eu lieu dans la nuit en l'absence d'images sur la zone du lac, et que chaque épisode de précipitations est associé à des cumuls et des intensités différentes pouvant mener à des réponses hydrologiques différentes. La vidange de la dépression semble en revanche relativement lente.

Nous mettons en regard les épisodes de précipitations observés sur toute la saison avec le remplissage de la dépression aval (Figure 22).

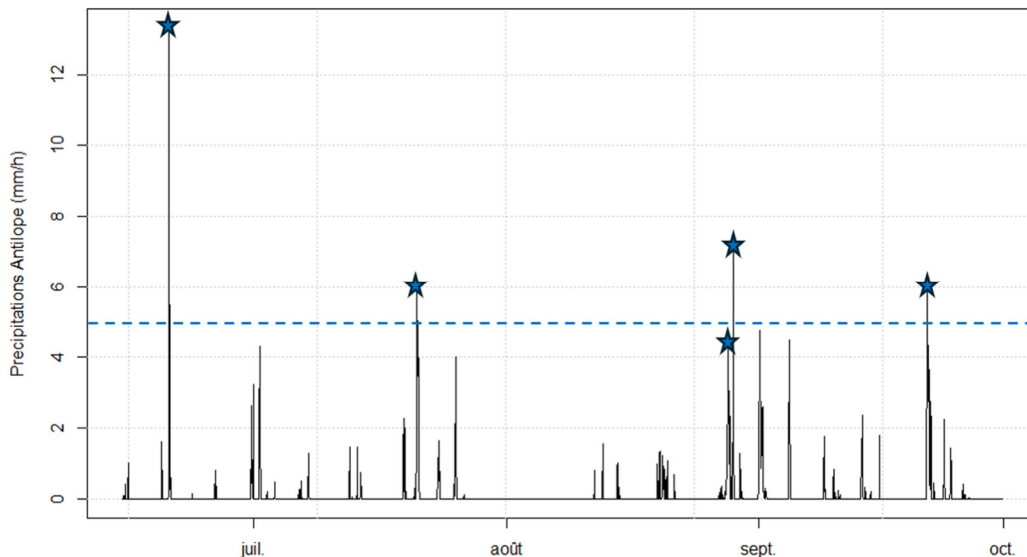


Figure 22: Intensités horaires de précipitations sur le bassin versant du glacier de Bonne Pierre (4.7 km<sup>2</sup>) au cours de la saison estivale 2025 selon la lame d'eau Antilope. Les étoiles indiquent les dates de remplissage de la dépression aval. La ligne en pointillés met en avant un seuil d'intensité permettant le remplissage de la dépression aval.

Ce graphique montre que la dépression aval ne se remplit que pour les épisodes de précipitation les plus significatifs de la saison. Les épisodes associés à un remplissage de la dépression aval semblent associés à des intensités horaires supérieures à 5 mm/h et/ou à des cumuls de précipitations supérieurs à 25 mm. Ces chiffres sont à considérer comme des ordres de grandeur étant donné les incertitudes fortes : échantillon trop réduit pour estimer des seuils robustes, et incertitudes du produit Antilope. Par exemple, le lac ne se remplit pas à la suite de l'épisode du 1<sup>er</sup> septembre associé à un cumul de l'ordre de 27 mm selon Antilope. Le pluviomètre local, installé par ATEAU à la fin de l'été, mesure un cumul plus faible de l'ordre de 20 mm.

### 3.2. Dynamique de remplissage et de vidange du lac

L'installation de 3 piézomètres au fond des dépressions du lac a permis de bien capter l'évolution de la hauteur d'eau dans le lac. Dans cette partie, nous abordons essentiellement le remplissage et la vidange du lac du mois de fin mai/juin, puisque les remplissages éphémères à la suite d'épisodes de précipitations ne sont pas significatifs d'un point de vue de la hauteur d'eau et du volume du lac. Deux remplissages éphémères de la dépression amont sont aussi mesurés par le piézomètre D3 entre le 1<sup>er</sup> mai et le 6 mai et entre le 15 mai et le 23 mai, mais sont associés à de faibles hauteurs d'eau (1.5 m).

La Figure 23 présente l'évolution de la hauteur d'eau dans le lac en 2025 à l'aide du piézomètre présent dans la dépression aval. Une première élévation du niveau du lac est visible entre le 22 et le 23 mai avant une diminution jusqu'au 24 mai. Comme observé sur les pièges photo, le véritable remplissage du lac est amorcé le 25/26 mai, et le niveau maximal est atteint aux alentours du 8 juin (cote maximale 2566 m). La disparition totale du lac est effectivement observée le 19 juin. La forme de la courbe en cloche symétrique suggère des dynamiques de remplissage et de vidange proches, s'étalant sur deux semaines environ pour chacune de ces phases en 2025.

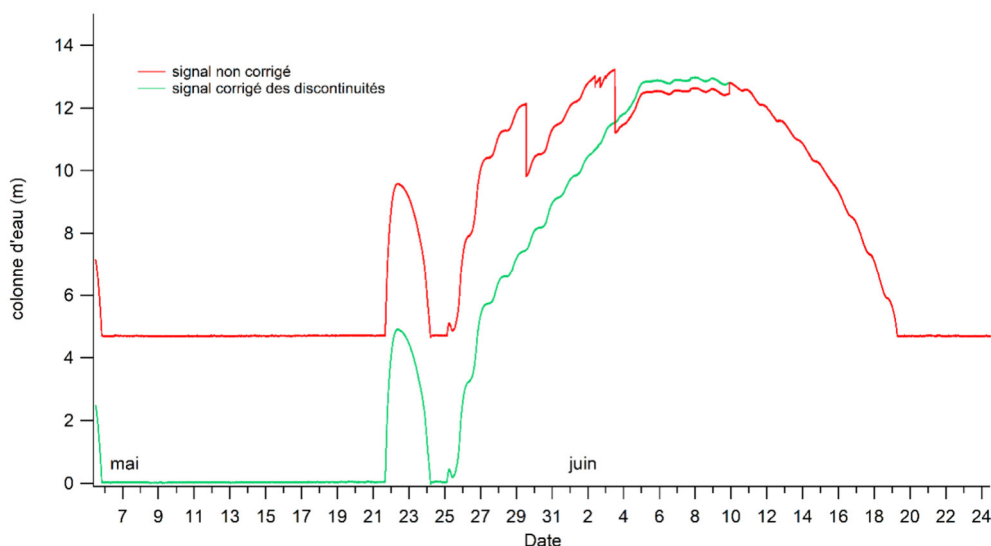


Figure 23: Evolution de la colonne d'eau selon le piézomètre le plus pertinent, avant et après correction du signal. La courbe verte, corrigée des discontinuités observées dans les données brutes, montre un niveau d'eau différent en début en fin de période, alors que le lac est bel et bien absent. Cette erreur de 4.7 m est probablement due à un déplacement du capteur. Source : IGE.

Le couplage des hauteurs d'eau à la topographie de surface mesurée le 24 juin 2025 permet d'analyser l'évolution temporelle du volume du lac. Le volume maximum du lac atteint autour du 8 juin 2025 est estimé à environ **28 000 m<sup>3</sup>** (Figure 24, Figure 25), **soit un volume beaucoup plus faible que les 95 000 m<sup>3</sup> estimés en 2024** (niveau du lac plus haut en 2024). Ce volume maximal semble se maintenir plusieurs jours entre le 5 juin et le 9 juin (plateau observé sur la courbe rouge de la Figure 25).

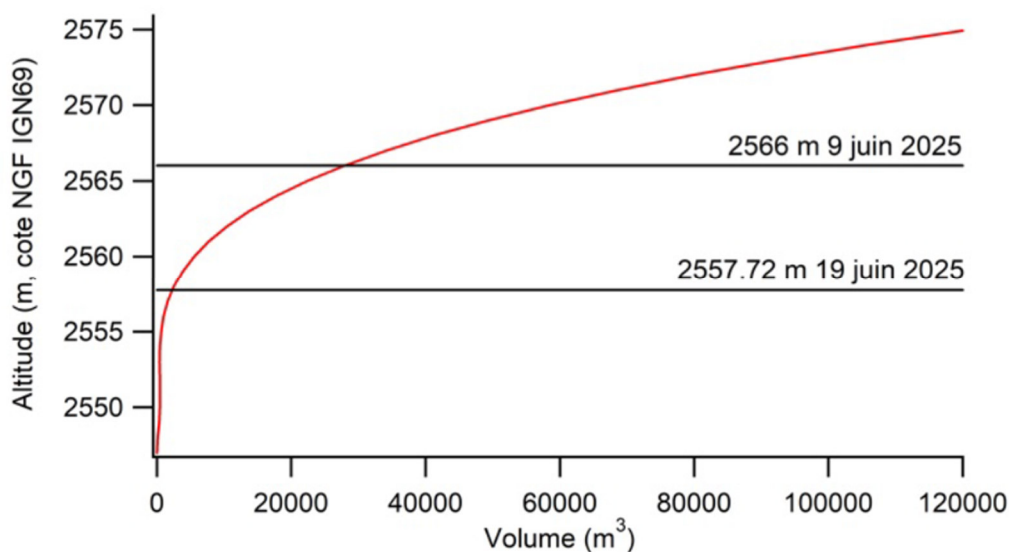


Figure 24: Bathymétrie du lac issue du levé drone du 24 juin 2025. Les deux altitudes aux 9 et 19 juin indiquent la plage de débattement de la cote de surface libre du lac pendant la vidange fournie par le Diver D1 et son calage en altitude. Source : IGE.

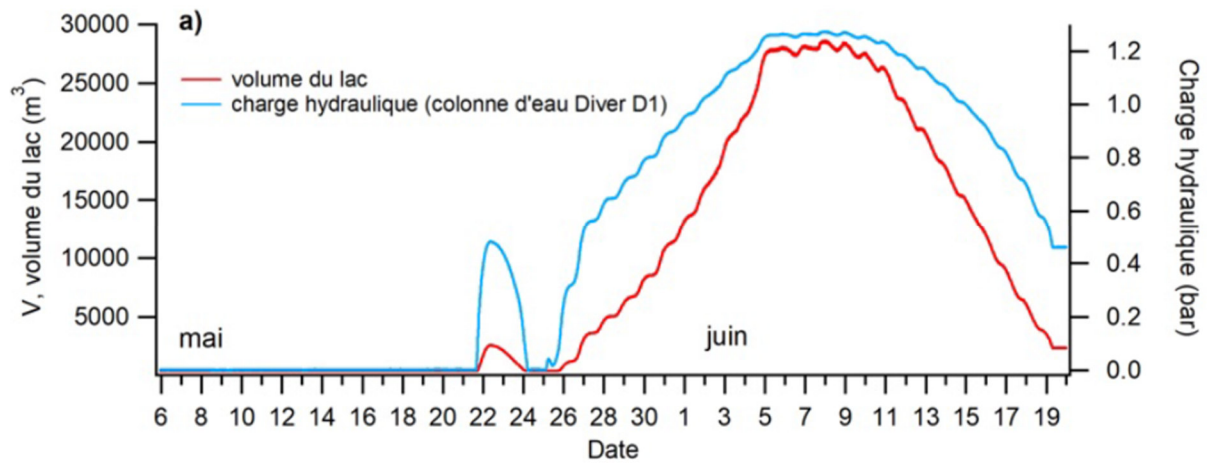


Figure 25: Volume du lac et charge hydraulique correspondant au débatement de la surface libre du lac au-dessus du capteur D1. Source : IGE.

La dynamique de vidange du lac a été analysée, puisqu'elle correspond à la phase d'évolution du lac la mieux captée par les piézomètres (pas de saut dans les mesures). La Figure 26 présente l'évolution de la cote du lac et du volume du lac lors de la vidange de 2025, entre le 10 juin et le 19 juin.

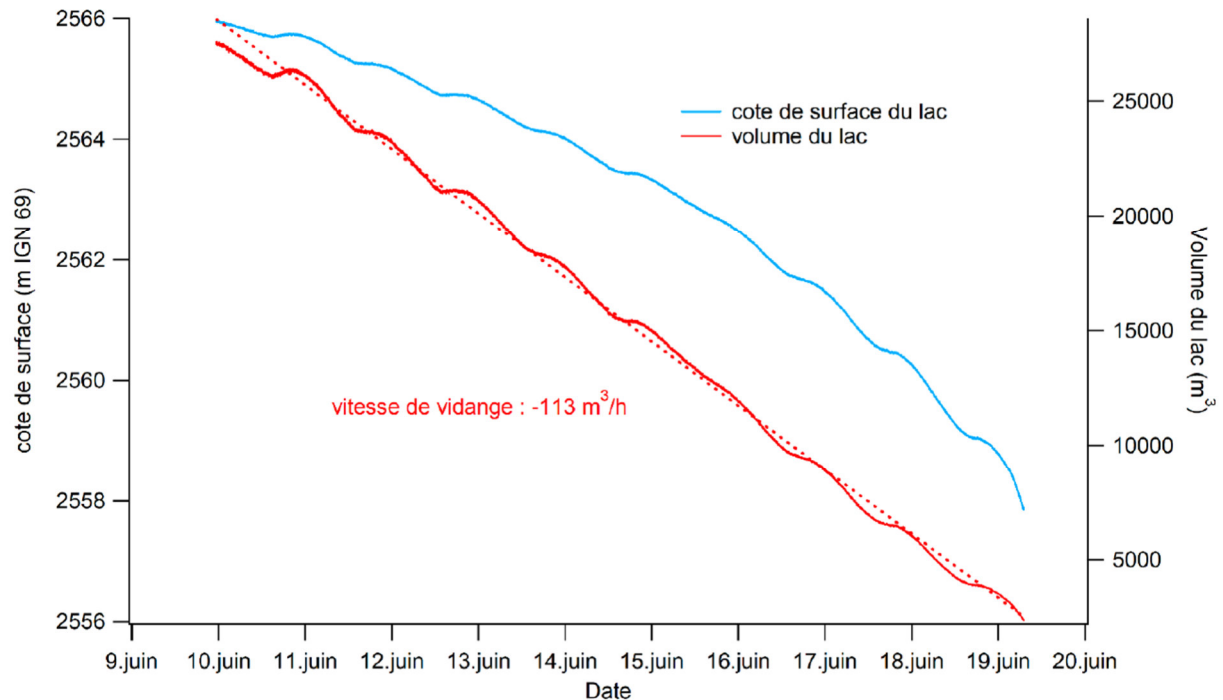


Figure 26: Evolution de la cote du lac et du volume du lac entre le 10 juin et le 19 juin. Source : IGE.

Sur la phase de vidange analysée entre le 10 et le 19 juin, un volume de 26 200 m<sup>3</sup> s'est vidangé de façon relativement lente. Le débit de vidange est remarquablement régulier sur toute la période (courbe rouge), de l'ordre de 113 m<sup>3</sup>/h. Cela correspond à 2700 m<sup>3</sup>/jour et à 30 l/s. Des fluctuations journalières sont aussi observées autour de cette vidange régulière. La Figure 27 illustre ces fluctuations journalières en soustrayant la tendance de fond de -113 m<sup>3</sup>/h, et en rapprochant ces signaux journaliers des températures de l'air. Ces variations journalières du volume du lac peuvent être interprétées au premier ordre comme liées à des changements d'alimentation sous contrôle météorologique.

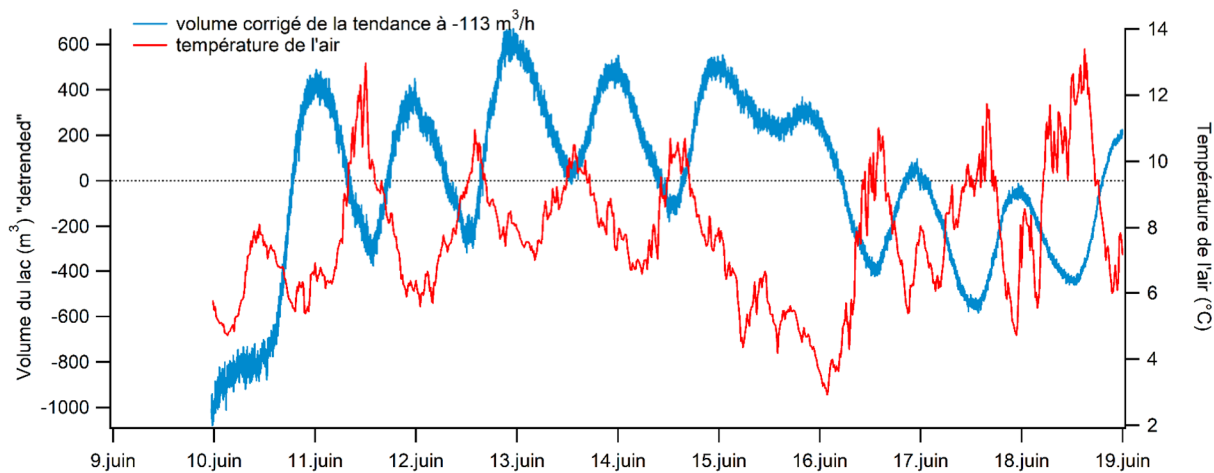


Figure 27: Evolution du volume du lac entre le 10 et le 19 juin sans la tendance de fond de  $-113 \text{ m}^3/\text{h}$ . Le signal est mis en regard des températures de l'air mesurées à Saint-Christophe-en-Oisans. Les heures sont en UTC. Source : IGE.

Ce graphique illustre que le maximum de remplissage journalier du lac est atteint vers 1h/2h du matin (heure locale). Cela correspond à un déphasage de l'ordre de 11h avec le pic de température journalier observé vers 14h/15h. Le pic de fonte est lui aussi déphasé par rapport au pic de température, avec un pic de débit journalier simulé vers 18h/19h (voir partie 4.2). Cette période de la journée correspond bien aux vitesses maximales de remplissage du lac sur la Figure 28, ce qui traduit une bonne cohérence entre les drivers météo et les modulations observées du volume du lac pendant la phase de vidange.

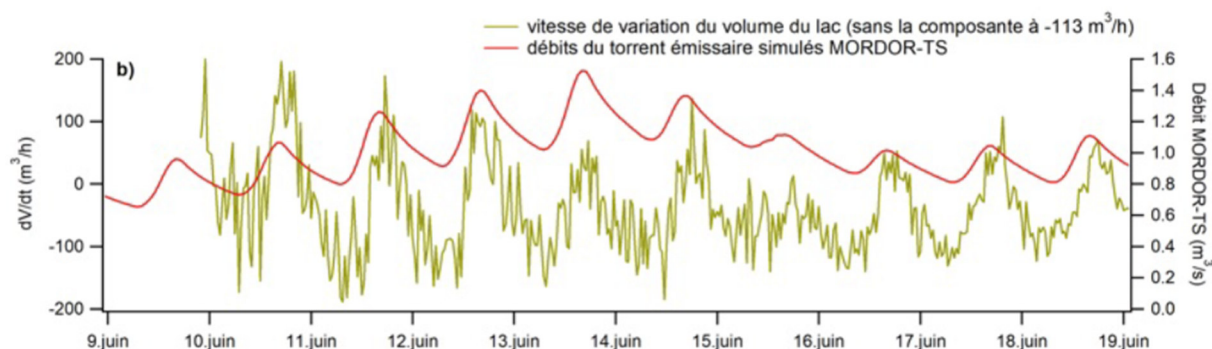


Figure 28: Vitesse de variation du volume du lac centrée autour de la tendance à  $-113 \text{ m}^3/\text{h}$  et débits du torrent émissaire du glacier simulés par MORDOR. Source : IGE.

### 3.3. Connexion du lac au torrent de Bonne Pierre

Le traçage effectué la veille de la disparition du lac, le 18 juin, n'a pas permis d'établir si le lac était effectivement connecté au front du glacier. Un signal est mesuré 5h après l'injection, mais une contamination lors de la visite des appareils est suspectée. Il est très probable que les concentrations en Rhodamine mesurées soient inférieures aux seuils de détection. Cela peut être liée à la faible concentration en Rhodamine étant donné le rapport entre les débits estimés de vidange du lac (30l/s) et les débits mesurés dans le torrent au front du glacier ce jour-là, de l'ordre de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  (facteur 1 à 20 environ).

Le traçage du 13-14 octobre a été effectué avec un débit beaucoup plus faible du torrent, de l'ordre de 50 l/s. Le traceur a été injecté le 13 octobre à 15h15 au niveau de la dépression aval du lac, et le maximum de détection du traceur dans le torrent est détecté vers 0h40 le 14 octobre, soit 9h30 après l'injection (Figure 29). Il est à noter que les niveaux de concentration mesurés sont ici encore en limite des seuils de détection. Néanmoins, si on considère cette détection comme positive, il y a bien connectivité entre le lac et le torrent émissaire. Le transfert est très lent (1.24 m/min) et le taux de restitution est très faible, de l'ordre de 0.35% (0.13 g sur les 37.28 g injectés). Ces résultats s'expliquent très probablement par de trop faibles débits de circulation d'eau dans le réseau glaciaire (traceur piégé dans des réservoirs, restitution sur le temps long sous le seuil de détection). Il n'est donc pas possible d'extraire d'autres informations quantitatives de ce traçage.

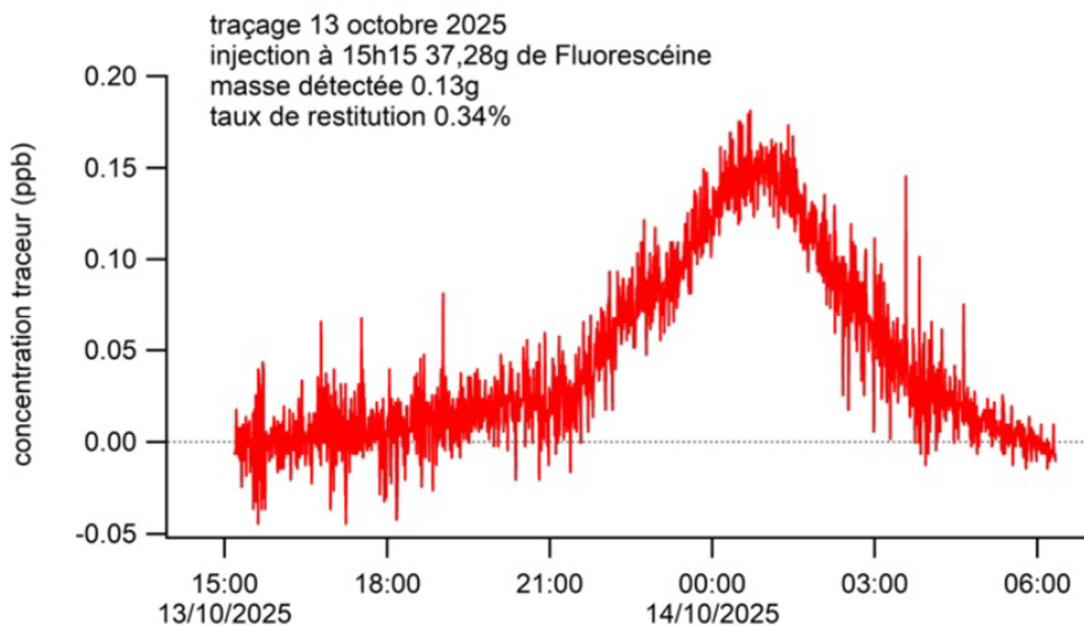


Figure 29: Courbe de détection du traçage à la Fluorescéine des 13-14 octobre 2025, en partie par milliard. Source : IGE.

## 3.4. Interprétations

### 3.4.1. Processus de remplissage et de vidange du lac

Les observations effectuées en 2025 permettent de progresser sur la compréhension du fonctionnement du lac supraglaciaire temporaire du glacier de Bonne Pierre. Nous abordons ci-dessous les principaux éléments de compréhension et interprétations des observations.

Dans un premier temps, l'apparition du lac en 2025 met en évidence que les chenaux intra-glaciaires ou sous-glaciaires ayant permis la vidange rapide du lac par la rive droite en juin 2024 se sont refermés, a minima sur une certaine partie de leur linéaire. L'apparition puis la vidange progressive du lac en 2025 suggère que le lac a repris un fonctionnement proche de celui observé entre 2016 et 2023 avec une vidange s'étalant sur plusieurs jours, sans générer de débits significatifs à l'aval.

Cette vidange progressive suggère que le lac n'est pas étanche (présence d'un débit de fuite) contrairement à la plupart des lacs glaciaires alpins. L'évolution du volume du lac serait donc le résultat de la différence entre le débit entrant et le débit de fuite :

- **Le lac se remplit** lorsque le débit entrant est supérieur au débit de fuite :  $Q_{in} > Q_{out}$  ;
- **Le niveau du lac se stabilise** lorsque le débit entrant est égal au débit de fuite :  $Q_{in} = Q_{out}$  ;
- **Le lac se vide** lorsque le débit entrant est inférieur au débit de fuite :  $Q_{in} < Q_{out}$ .

Par ailleurs, la dynamique de la vidange très régulière de 2025 entre le 10 et le 19 juin suggère que la variation de la charge dans le lac (perte de 9 m de hauteur d'eau) est négligeable vis-à-vis de la variation de la charge totale de la colonne d'eau dans le glacier. En effet, une décroissance progressive du débit de vidange du lac aurait été attendue en passant d'une charge de 9 m d'eau à 0 m. Ici, la vidange constante suggère que cette variation de 9 m est négligeable par rapport à la charge totale pilotant la vidange du lac, très probablement beaucoup plus grande. Cela suggère que le point de blocage par lequel transite le débit de fuite **se situe beaucoup plus bas en altitude que les dépressions de surface accueillant le lac, très probablement à la base du glacier**. Cela est cohérent avec un débit de fuite passant sous la glace plutôt que dans la glace, puisqu'une connexion hydraulique à l'intérieur du glacier avec une charge importante aboutirait à un emballement de la vidange (fonte de la glace menant à une augmentation de la section du conduit et ainsi du débit, entraînant un emballement). Néanmoins, la localisation de ce point de blocage par lequel transite le débit de fuite à la base du glacier n'est pas connu.

### 3.4.2. Lien entre l'apparition du lac et l'enneigement

Au regard de ces éléments, il semble cohérent que le lac apparaisse de manière récurrente au mois de juin, qui correspond au pic de fonte nivale à ces altitudes. La fonte nivale permet des apports en eau soutenus sur une période continue ( $Q_{in} > Q_{out}$ ). Plus ponctuellement, les épisodes de précipitations permettent un tel déséquilibre entre débits entrants et débit de fuite, mais de manière beaucoup plus éphémère.

L'analyse de l'enneigement du bassin versant apparaît donc pertinente pour caractériser les périodes d'apparition et de disparition du lac – et indirectement son volume potentiel. Deux analyses parallèles sont proposées :

- Une analyse du lien entre la disparition du lac et l'enneigement au cours des 4 dernières années. Sur ces années passées, les dates exactes d'apparition du lac, de volume maximal, et de disparition du lac ne sont pas connues. Néanmoins, la période de disparition du lac est encadrée grâce aux images satellites Sentinel-2 (fréquence de 6 jours si ciel clair, ce qui n'est pas toujours le cas) ;
- Une analyse du lien entre apparition, date de volume maximal, et disparition pour l'année 2025. Cette analyse a le désavantage de ne s'appuyer que sur une année. Néanmoins, l'évolution du lac est connue de manière précise.

Dans les deux cas, la caractérisation de l'enneigement du bassin versant est effectuée grâce à la hauteur de neige mesurée à la station nivose des Ecrins. Cette nivose se situe dans le vallon de Bonne Pierre à 2970 m d'altitude. Cette donnée ne représente pas un enneigement spatialisé (mesure locale), mais apparaît comme une très bonne approximation de l'enneigement du bassin versant (notamment de l'étendue de la couverture neigeuse) : la nivose est proche de l'altitude médiane du bassin versant du glacier de Bonne Pierre, et la variabilité spatiale de l'enneigement est principalement expliquée par l'altitude et l'orientation (faible variabilité spatiale des cumuls de précipitations hivernaux à l'échelle de quelques km<sup>2</sup>).

#### Disparition du lac sur les saisons passées

La Figure 30 présente l'évolution de la hauteur de neige à la nivose des Ecrins ces dernières années, ainsi que les périodes encadrant la disparition du lac selon les images Sentinel-2 (étoile colorée = dernière image avec lac visible ; étoile blanche = première image avec lac absent). Les saisons antérieures à 2021-2022 ne sont pas affichées car la disponibilité des images Sentinel-2 sans nuages ne permet pas de bien encadrer la période de disparition du lac (période d'un mois ou plus).

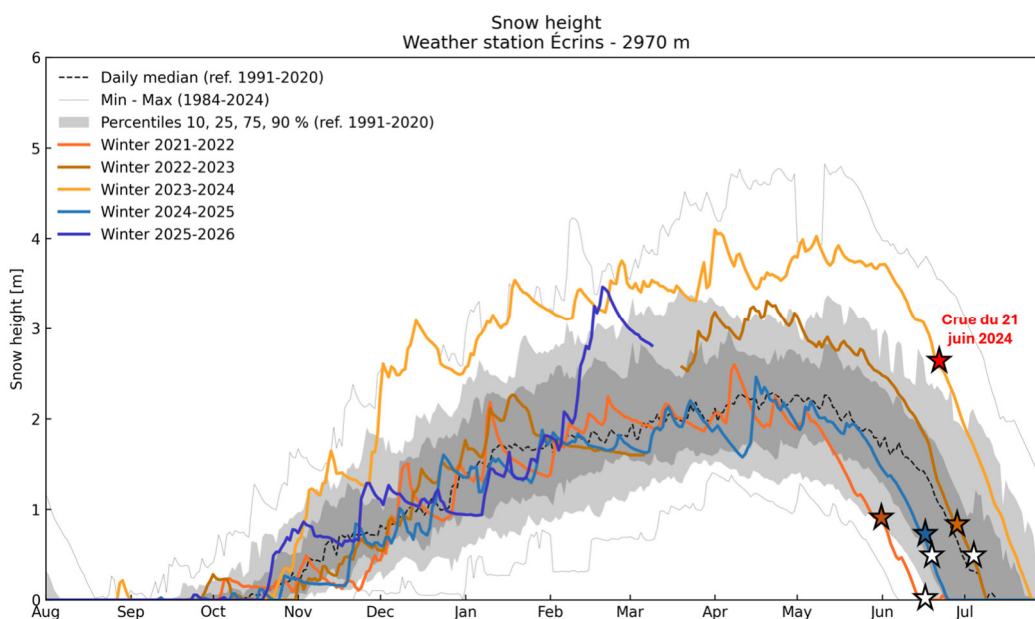


Figure 30: Hauteur de neige à la nivose des Ecrins pour plusieurs saisons récentes. Les minima, maxima, et quantiles d'enneigement sur la période de référence 1991-2020 sont affichés en arrière-plan. Nous avons placé approximativement les dernières dates de lac visible (étoiles colorées) et les premières dates de lac absent (étoiles blanches) pour encadrer la période de disparition du lac. Source : CEN.

Sur les saisons récentes, nous notons :

- **En 2021-2022** : un enneigement proche de la normale jusqu'au début du mois de mai mais une fonte beaucoup plus rapide que la normale ensuite. Le lac disparaît entre le 29 mai (90 cm de neige) et le 18 juin (0 cm) ;
- **En 2022-2023** : un enneigement devenant largement excédentaire mi-avril (quantile 90%) suivi d'une fonte rapide permettant une date de déneigement dans les normes 1991-2020. De l'eau est encore visible dans le lac le 28 juin (80 cm de neige) et le lac n'est plus visible le 3 juillet (60 cm de neige). Le niveau du lac en 2023 semble proche du niveau atteint en 2024 (Figure 31) ;
- **En 2023-2024** : un enneigement est très excédentaire toute la saison (> quantile 90%). La crue

du 21 juin 2024 est associée à une vidange rapide du lac (encore 273 cm de neige le 20 juin) ;

- **En 2024-2025** : un enneigement proche de la normale voire légèrement déficitaire jusqu'à la mi-mai, avant une fonte plus rapide que la normale. Le lac disparaît le 19 juin (60 cm de neige).

La disparition du lac en 2025, associée à une hauteur de neige de 60 cm à la nivose, est cohérente avec les disparitions du lac observées en 2022 et 2023 (entre 0 cm et 90 cm, et entre 60 cm et 80 cm).



Figure 31: Gauche : lac le 19 juin 2023 (transmission Lucas Perillon en 2024). Droite : lac le 13 juin 2024 (récupération Camp2Camp en 2024).

L'enneigement de la saison 2025-2026 se place pour le moment entre celui de la saison 2022-2023 et de la saison 2023-2024, entre les quantiles 75% et 90% de hauteur de neige selon la période de référence 1991-2020.

#### Apparition, niveau maximal et disparition du lac en 2025

La Figure 32 présente l'évolution des températures maximales journalières et de la hauteur de neige à la nivose des Ecrins au cours du printemps et de l'été 2025, ainsi que les dates d'apparition, de niveau maximal, et de disparition du lac. Nous retenons les éléments suivants :

- Une température moyenne journalière positive à 2970 m d'altitude de manière durable permet d'amorcer la fonte nivale printanière sur ce bassin versant de haute altitude. **L'amorce de la fonte nivale correspond bien à la date d'apparition du lac en 2025.** L'apparition du lac semble donc pilotée au premier ordre par l'élévation de la température de l'air qui amorce une fonte durable. A cette période, la quantité de neige n'est pas limitante ( $Q_{in} > Q_{out}$ ) puisque l'enneigement est maximal à la suite des accumulations hivernales ;
- La date de niveau maximal du lac et la date de disparition du lac semblent quant à elles plutôt reliées à la quantité de neige présente sur le bassin versant (plus rigoureusement l'étendue de la couverture neigeuse du bassin versant), guidant la durée pendant laquelle les apports en eau pourront être supérieurs au débit de fuite ( $Q_{in} > Q_{out}$ ). En 2025, le niveau maximal du lac ( $Q_{in} = Q_{out}$ ) est atteint le 8 juin pour une hauteur de neige d'environ 130 cm à la nivose. Après cette date, la quantité de neige devient limitante puisqu'une diminution du niveau du lac est observée ( $Q_{in} < Q_{out}$ ), et le lac disparaît lorsque la hauteur de neige atteint 60 cm environ.

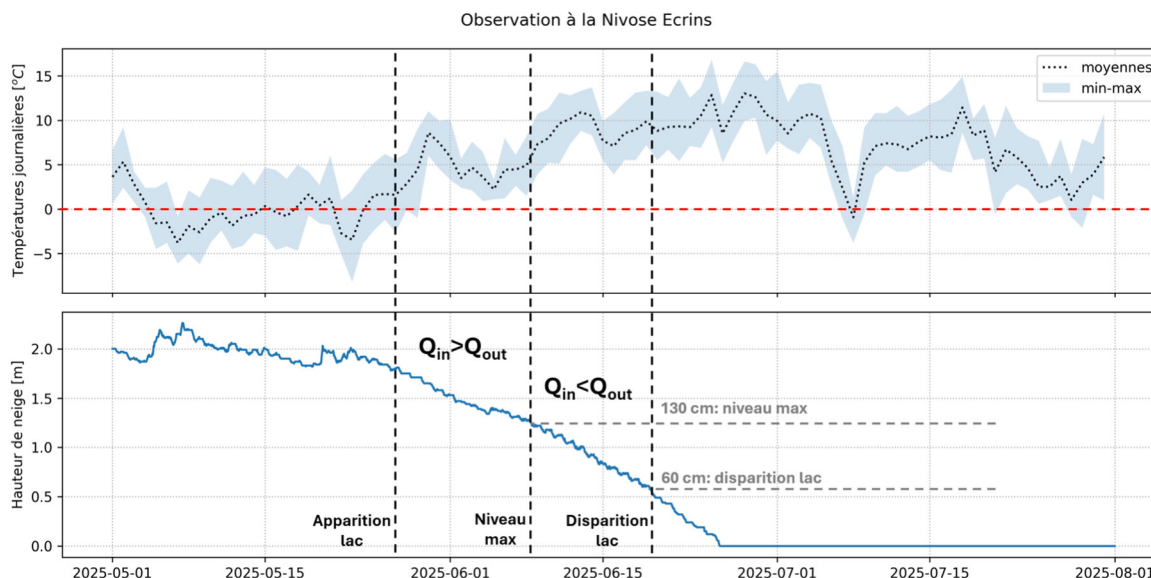


Figure 32: Température journalière (moyenne, minimum, maximum) et hauteur de neige à la station nivose des Ecrins au printemps/été 2025. Les dates marquantes de l'évolution du lac sont mises en évidence. Source : CEN

L'apparition du lac semble ainsi directement liée à l'amorce d'une fonte nivale significative et durable. La durée de vie du lac et son volume semblent plutôt liés à la quantité de neige disponible sur le bassin versant.

En 2025, le remplissage du lac de 28 000 m<sup>3</sup> a été associé à une perte de hauteur de neige de 54 cm à la nivose (passage de 184 cm à 130 cm), soit un remplissage d'environ 500 m<sup>3</sup> par cm de fonte. Selon ce ratio, l'épaisseur de neige présente au-dessus du seuil de 130 cm à l'amorce de la fonte permettrait une estimation du volume potentiel du lac (environ 40 000 m<sup>3</sup> pour une hauteur totale de 2 m de neige, 65 000 m<sup>3</sup> pour 2.5 m, 95 000 m<sup>3</sup> pour 3 m...). Il est néanmoins difficile d'établir une loi générique à partir d'une seule saison de mesure, et le volume le remplissage du lac est aussi lié à la dynamique de la fonte (une fonte très lente aboutit à des débits plus faibles, de manière plus durable). Par ailleurs, la topographie de surface des dépressions pilote aussi le volume maximal pouvant être contenu dans le lac.

**Les différents points de repère abordés dans cette partie sont à prendre avec beaucoup de précaution :**

- **Ils se basent sur l'hypothèse d'un lien direct entre enneigement et dynamique du lac. D'autres facteurs entrent néanmoins probablement en jeu : 1) le débit de fuite ( $Q_{out}$ ) qui pilote le système ne se maintient pas nécessairement à un niveau constant au fil des saisons ou pendant la saison, 2) c'est aussi le cas du débit entrant ( $Q_{in}$ ) qui pourrait varier selon l'évolution de l'organisation des réseaux de drainage du bassin versant ;**
- **Ils sont construits à partir d'une seule année d'observation, ou à partir d'approximations sur quelques années d'observations ;**
- **Ils n'intègrent pas les précipitations qui peuvent contribuer à la dynamique de remplissage.**

Notamment, la disparition du lac le 19 juin 2025 est observée alors que les débits du torrent de Bonne Pierre associés à la fonte nivale se maintiennent à un niveau soutenu jusqu'à début juillet (voir partie 4.2). Cela suggère que les apports en eau liées à la fonte restent importants à l'échelle du bassin versant, même après la disparition du lac.

## 4. Résultats : le glacier de Bonne Pierre

### 4.1. Caractérisation et évolution du glacier

#### 4.1.1. Épaisseurs de glace

La campagne de radar héliporté par l'ETH Zurich le 6 novembre 2024 a permis d'estimer les épaisseurs de glace du glacier de Bonne Pierre, avec une fréquence d'antenne de 50 MHz. Il est néanmoins à noter que l'interface entre le glacier et le socle rocheux est très mal capturée par les signaux radar sur toute la partie centrale du glacier, allant approximativement de la zone du lac à l'amont des dépôts de l'écroulement de 2016 (traits bleus sur la Figure 8). Sur cette zone, le modèle d'interpolation utilisé prend ainsi beaucoup de poids.

La Figure 33 montre les épaisseurs de glace mesurées/estimées sur le glacier de Bonne Pierre à l'automne 2024. Les épaisseurs atteignent localement 130 m, et sont globalement les plus importantes sur la partie centrale du glacier située en fond de vallon (de l'ordre de 100 m). Les deux zones de plus forte épaisseur semblent distinctes, avec une séparation globalement située au niveau du lac supraglaciaire sous lequel les épaisseurs de glace sont de l'ordre de 70 m.

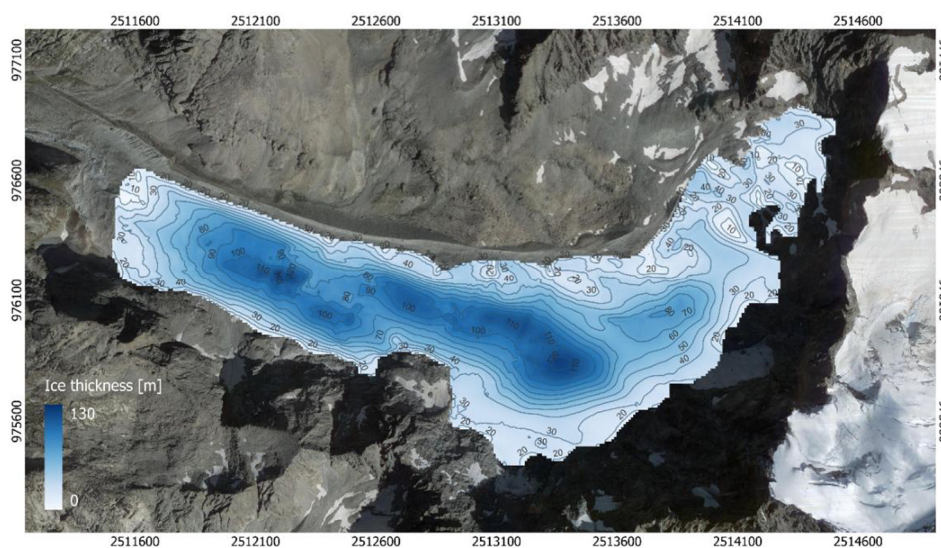


Figure 33: Épaisseurs de glace à l'automne 2024 estimées par les mesures radar et l'algorithme GlATE. Source : ETHZ

La Figure 34 met bien en évidence la forme en U du vallon sous-glaciaire, mais aussi la difficulté du radar à bien détecter le socle rocheux sur toute la partie centrale (absence de traits rouges) avec des zones associées à une incertitude de plus de 20 mètres.

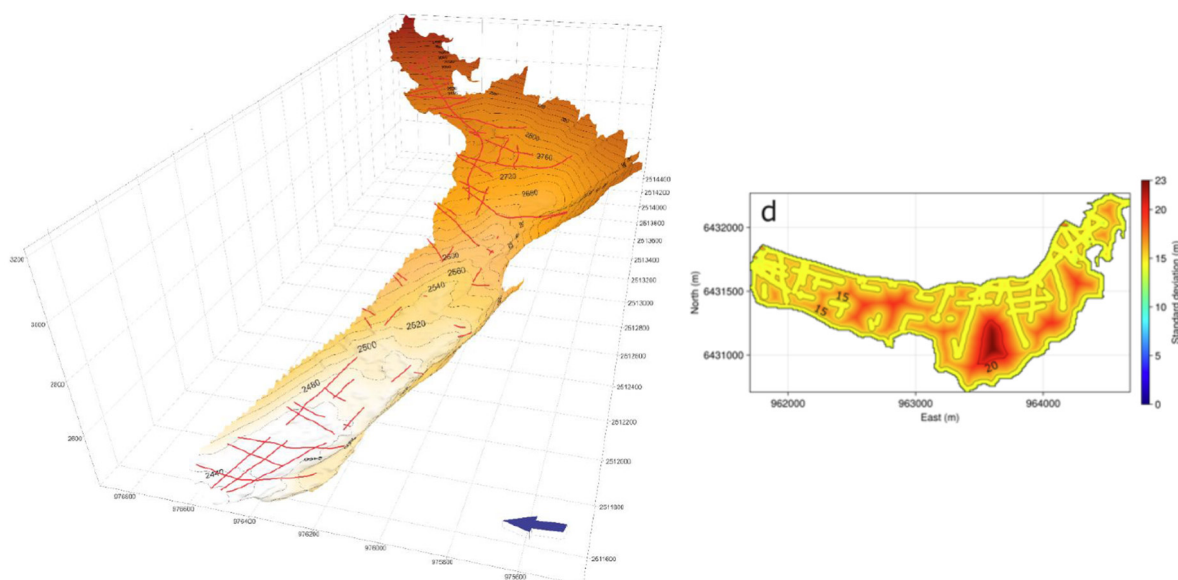


Figure 34: Gauche : topographie sous-glaciaire en 3 dimensions. Les traits rouges mettent en évidence les zones où le socle rocheux a été interprété avec succès par les mesures radar. Source : ETHZ. Droite : incertitudes sur l'altitude du

socle rocheux pour le glacier de Bonne Pierre en octobre 2024. Source : Figure tirée de Ogier et al., 2026.

Le levé radar de l'IGE du 26 février 2026 couvre une surface beaucoup plus restreinte à proximité de la zone du lac supraglaciaire. Le radar sol n'a pas permis de détection du socle rocheux avec une fréquence de 100 MHz. Le radar drone a permis une détection partielle du socle rocheux avec une fréquence de 75 MHz. La comparaison du MNT sous-glaciaire de l'ETHZ avec les profils du radar drone montre un bon accord entre les deux données, avec un socle rocheux détecté à une altitude plus basse pour la mesure de l'IGE en février 2026 (Figure 35).

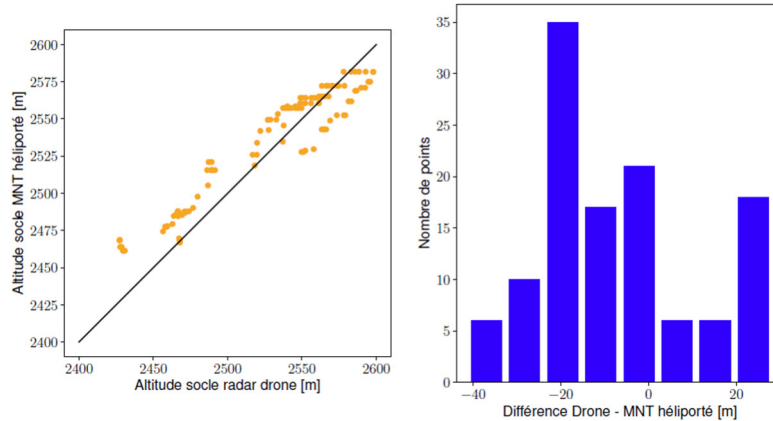


Figure 35: Gauche : comparaison des altitudes du socle obtenues avec le radar sous drone et à partir du MNT du radar hélicoptéré. Droite : histogramme des différences d'altitude entre les données radar sous drone et le MNT du radar hélicoptéré. Sur le panel de gauche, les alignements horizontaux de points correspondent à des clusters de points du radar sous drone qui sont localisées dans une même cellule du MNT hélicoptéré. Source : IGE.

#### 4.1.2. Evolution de la topographie de surface

Les différences de modèles numériques de surface ou de terrain permettent d'analyser la perte d'épaisseur du glacier de Bonne Pierre. Ces pertes d'épaisseur sont révélatrices de la fonte, mais permettent aussi de détecter des évolutions morphologiques du glacier : apparition et évolution des dépressions de surface, effondrements de surface... En complément des travaux déjà effectués en 2024 dans la rétro-analyse, deux nouvelles cartes d'évolution récente ont été produites.

La première carte de la Figure 36 présente la différence d'épaisseur selon les MNS Pléiades du 15 juillet 2025 et du 30 août 2023. Elle montre une réponse du glacier de Bonne Pierre à la fonte toujours très hétérogène. Une zone centrale conserve un signal d'épaississement localisé, cohérent avec le secteur recouvert par les dépôts de l'écroulement de 2016. La langue terminale et la zone du lac montrent des pertes d'épaisseur plus marquées. Sur cette période, le bilan de masse est estimé à  $-0.95 \pm 0.5$  m d'eau par an, cohérent avec une couverture détritique réduisant l'ablation locale.

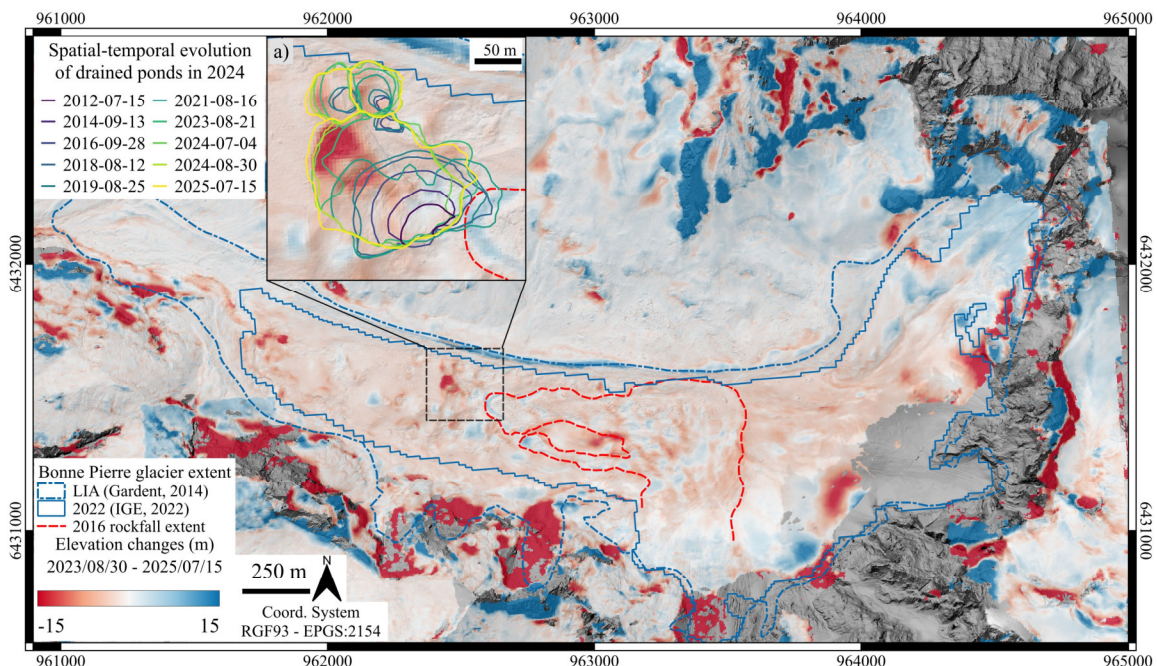


Figure 36: Carte des changements d'altitude entre 2023 et 2025. Les contours du glacier, des dépressions du lac, et des dépôts de l'écroulement de 2016 sont identifiés. Source : ISTERRE.

Ces motifs spatiaux sont bien observés entre le 28 juin 2024 et le 9 octobre 2025, par différence de MNT Lidar (Figure 37). En un an, les gains locaux d'épaisseur dans les dépôts de l'écroulement de 2016 atteignent localement 3 m. Les pertes d'épaisseur importantes au niveau des dépressions du lac supraglaciaire et du front du glacier atteignent localement 10 m.

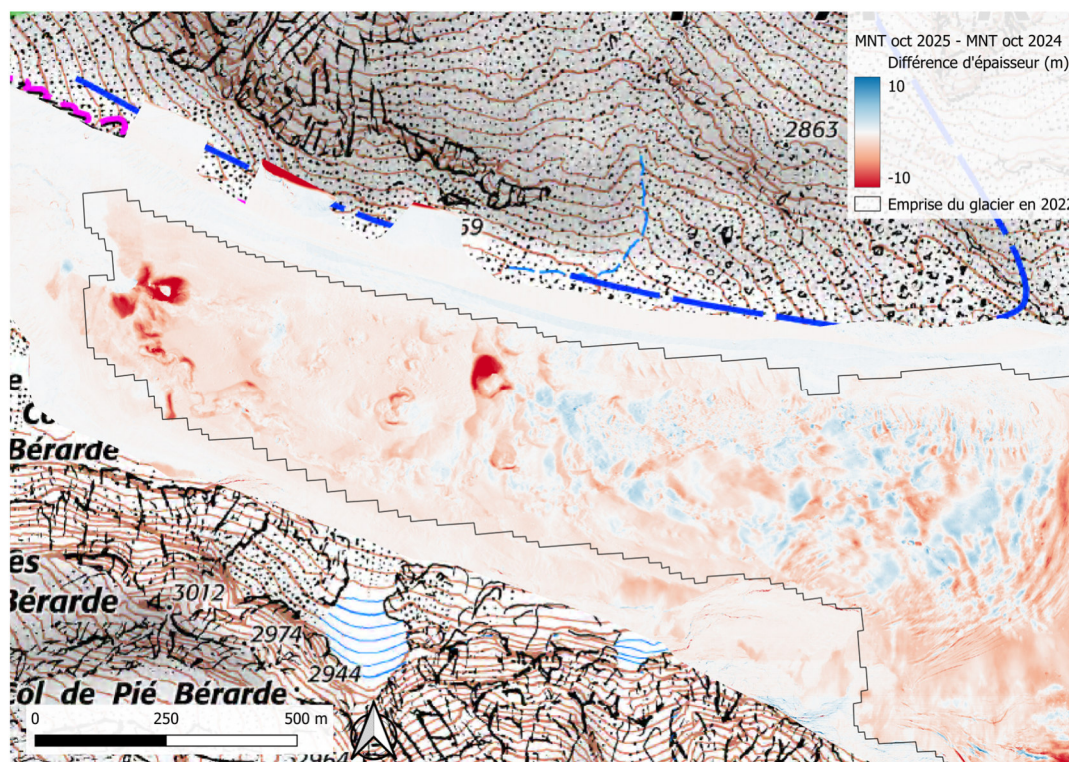


Figure 37: Différence de MNT entre octobre 2025 (STYX4D) et octobre 2024 (Helimap/Sixense).

Il est difficile de caractériser la part de la perte d'épaisseur liée à la dynamique du glacier (toute translation en plan implique des différences d'épaisseurs locales importantes sur des pentes fortes). Néanmoins, il apparaît que les zones de plus fortes pertes d'épaisseurs sont les zones où la glace est à l'air libre, que ce soit au niveau du lac, des autres dépressions de surface, des bédrières présentes en rive gauche ou du front du glacier (Figure 38).

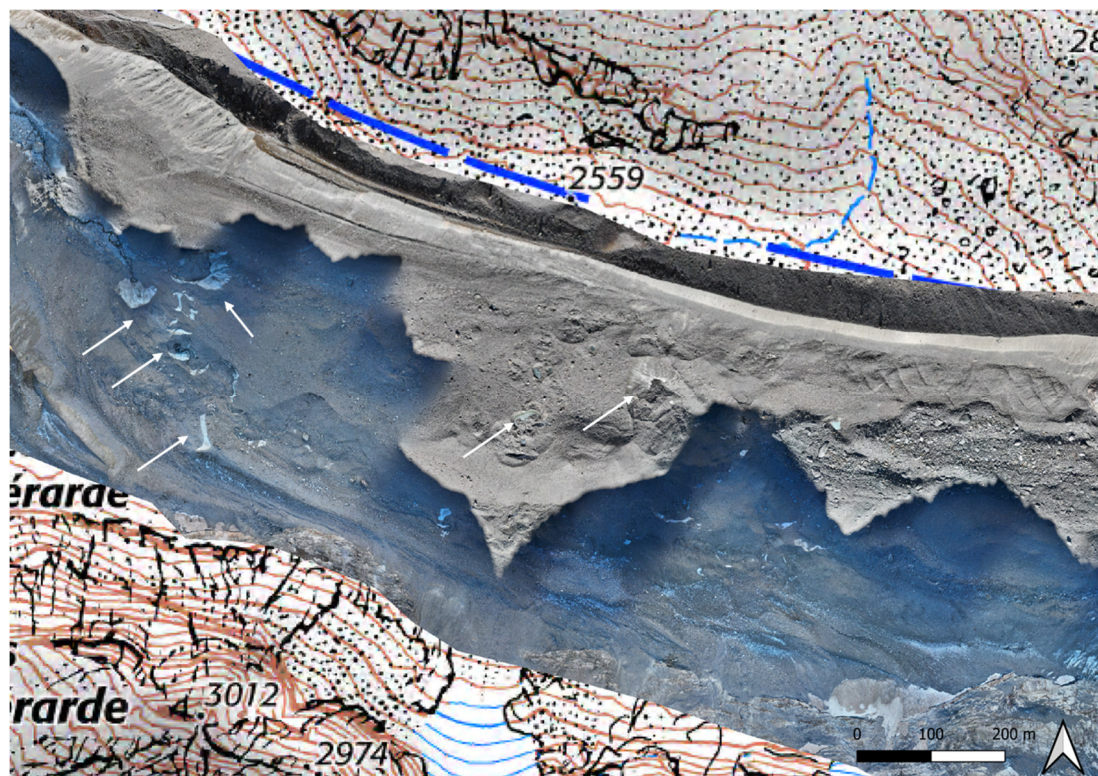


Figure 38: Orthophoto du glacier en octobre 2025 (STYX4D) et principales zones de glace apparentes.

Cela suggère que toute dépression de surface laissant apparaître des berges de glace voit son volume augmenter par amplification de la fonte locale. Dans le cas de dépressions accueillant le lac, le volume estimé du lac selon la topographie du 28 juin 2024 et des traces de marnage était de l'ordre de 95 000 m<sup>3</sup> pour une surface de 14 000 m<sup>2</sup>. Selon la topographie mesurée le 9 octobre 2025, un remplissage des dépressions pour un niveau proche aboutirait à un volume de l'ordre de 120 000 m<sup>3</sup> à 130 000 m<sup>3</sup> pour une surface de 15 000 m<sup>2</sup> (Figure 39). Il est néanmoins très difficile de contraindre la cote maximale du lac étant donné qu'elle semble pilotée par un point bas au nord-ouest permettant des écoulements au sein des blocs à une certaine profondeur (non connue). Une variation de 1 m du niveau à la cote maximale implique des variations de volume importantes (15 000 m<sup>3</sup> pour une surface de 15 000 m<sup>2</sup>).

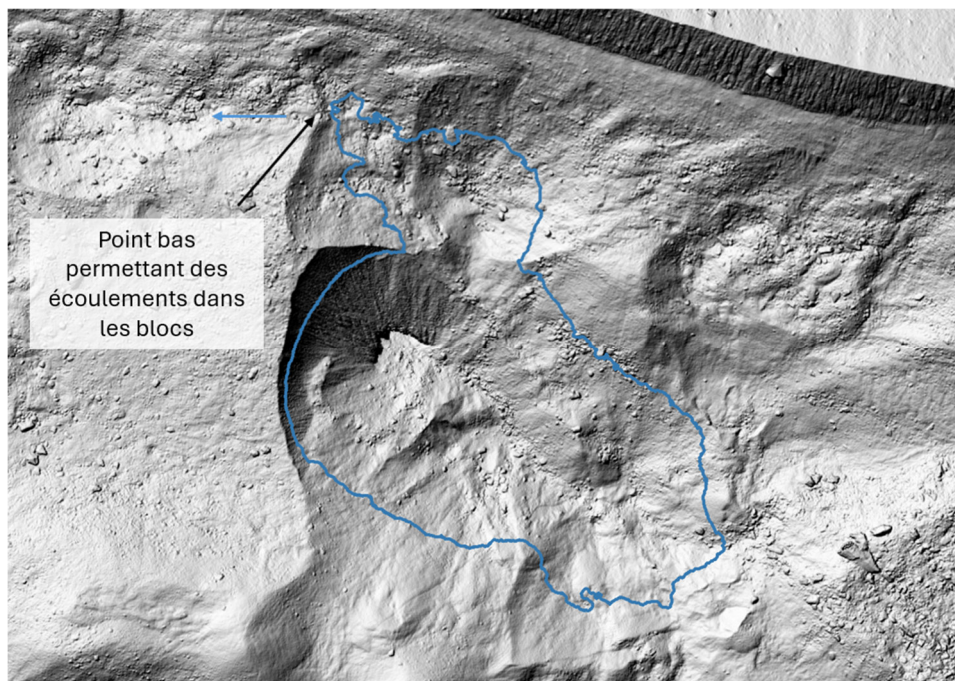


Figure 39: Emprise potentielle du lac selon la topographie de surface d'octobre 2025, pour une surface de 15 000 m<sup>2</sup>. L'ombrage du MNT d'octobre 2025 est représenté en fond.

Par ailleurs, les pertes d'épaisseur importantes mesurées en rive droite du front du glacier sont associées à un effondrement de plafonds de glace au cours de l'été (Figure 40). Cette zone, qui n'a pas été le lieu d'écoulements significatifs en 2025, est celle empruntée par la crue du 21 juin 2024. La crue avait laissé apparaître des voutes de glace entre le front du glacier et la cavité observée environ 100 m en amont. Le recul du front du glacier est important entre 2021 et 2025. Il est de l'ordre de 150 m en rive droite et de 70 m en rive gauche.

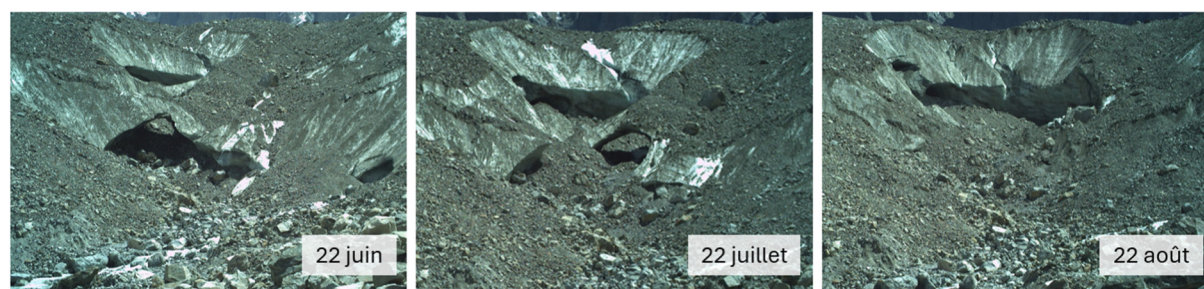


Figure 40: Rive droite du front du glacier de Bonne Pierre vue par le piège photo Reconyx en 2025.

#### 4.1.3. Vitesses de déplacements de surface

Les vitesses du glacier ont été actualisées à partir des images Pléiades de 2025. La Figure 41 met en évidence les vitesses très contrastées du glacier, de l'ordre de 3 à 4 m/an sur la zone en aval du lac (faible pente, glace presque stagnante), et une vitesse de 13 à 15 m/an sur la zone en amont (pente plus forte, dépôts de l'écroulement de 2016).

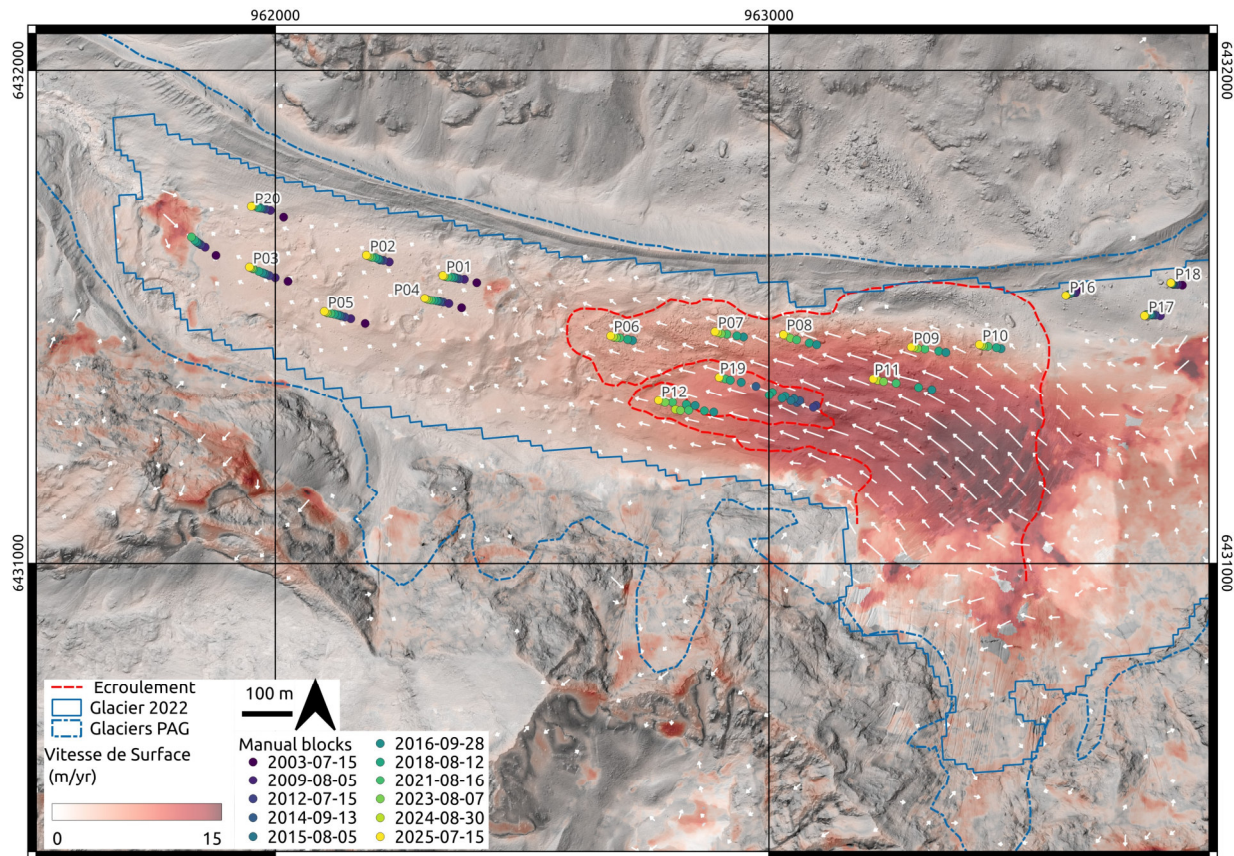


Figure 41: Carte des vitesses de surface du glacier de Bonne Pierre moyennée sur la période 2003-2025 établie à partir des images aériennes et satellitaires à haute résolution (1 m). Source : ISTERRE.

L'analyse de l'évolution de la vitesse de différents blocs identifiés à la surface du glacier montre un ralentissement généralisé sur les deux zones amont et aval, malgré une augmentation de 15% de la vitesse observée entre 2024 et 2025 (Figure 42). Il est difficile de savoir si cette accélération éphémère est liée à la crue du 21 juin 2024.

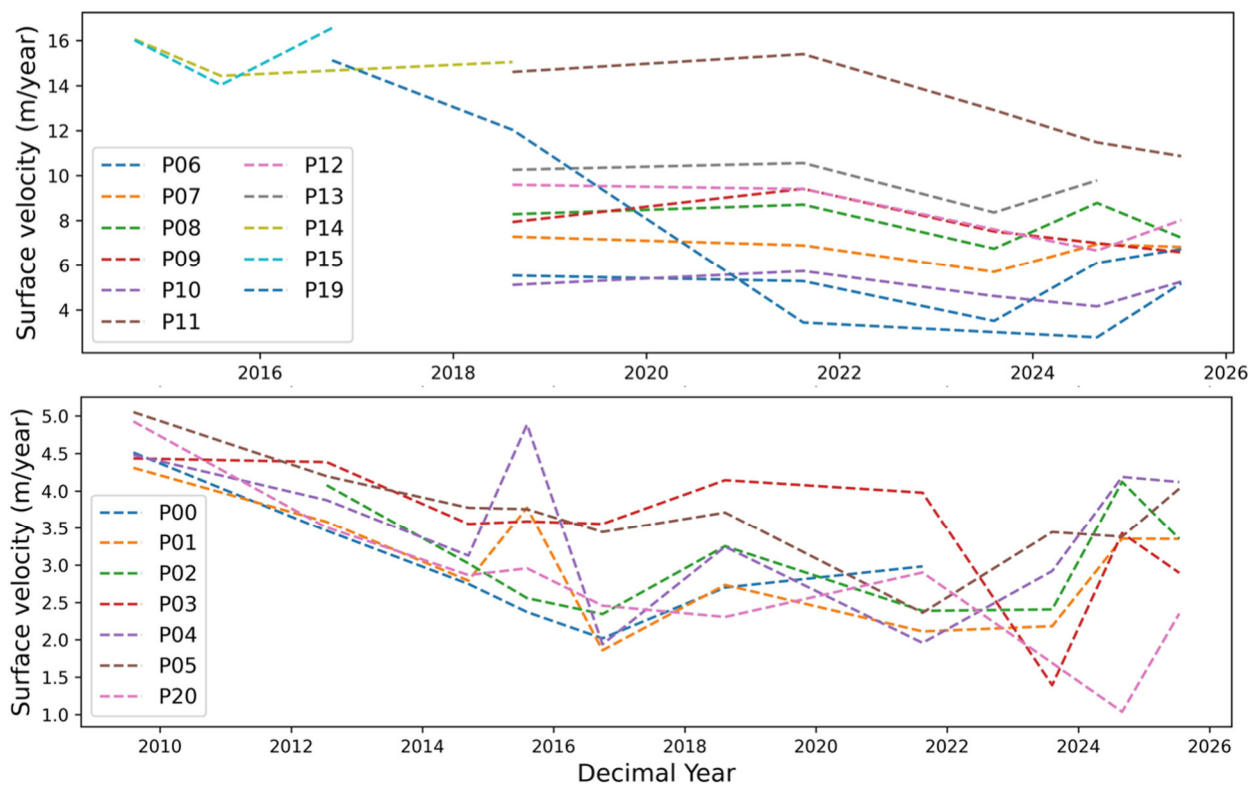


Figure 42: Vitesse de déplacement des blocs identifié en surface sur la Figure 41 pour la partie amont (haut) et la partie aval (bas). Source : ISTERRE.

## 4.2. Débit du torrent émissaire

L'objectif de cette action sur l'hydrologie du torrent de Bonne Pierre est d'identifier si la vidange du lac est perceptible dans les débits du torrent, et d'identifier si le glacier de Bonne Pierre joue un rôle tampon dans l'hydrologie du bassin versant.

Le torrent de Bonne Pierre draine une surface de 4.7 km<sup>2</sup> au niveau du front du glacier. 35% du bassin versant est couvert par le glacier, par lequel transite la totalité des écoulements du bassin (glacier de 1.7 km<sup>2</sup> en 2022).

Le débit du torrent émissaire du glacier a été estimé selon deux méthodes en 2025 :

- Mesure de hauteur d'eau dans le torrent et calibration d'une relation avec le débit à partir de 20 mesures ponctuelles de débit. La relation hauteur/débit utilisée est une loi puissance (voir rapport Annexe). La relation a été calibrée **sur une gamme de débit limitée, entre 0.05 et 1.08 m<sup>3</sup>/s** ;
- Mesure de l'énergie sismique à proximité du torrent par un géophone, et calibration d'une relation avec le débit grâce à la chronique de débit établie grâce au capteur de hauteur d'eau. La période de calibration s'étale du 1<sup>er</sup> août au 15 septembre, période durant laquelle la chronique de débit estimée grâce au capteur de hauteur d'eau paraît fiable.

En parallèle, le débit du torrent a été modélisé grâce au modèle Mordor (EDF) selon deux jeux de forçages météorologiques :

- La température à la nivose des Ecrins et les précipitations Antilope sur le bassin versant (lame d'eau radar corrigée par les pluviomètres) ;
- La température à la nivose des Ecrins et les précipitations du pluviomètre de Saint-Christophe-en-Oisans.

Les modélisations ne tiennent pas compte de l'influence potentielle que peut jouer le glacier de Bonne Pierre sur l'hydrologie du bassin versant. La confrontation des deux estimations aux débits modélisés sur la première partie de saison est illustrée en Figure 43.

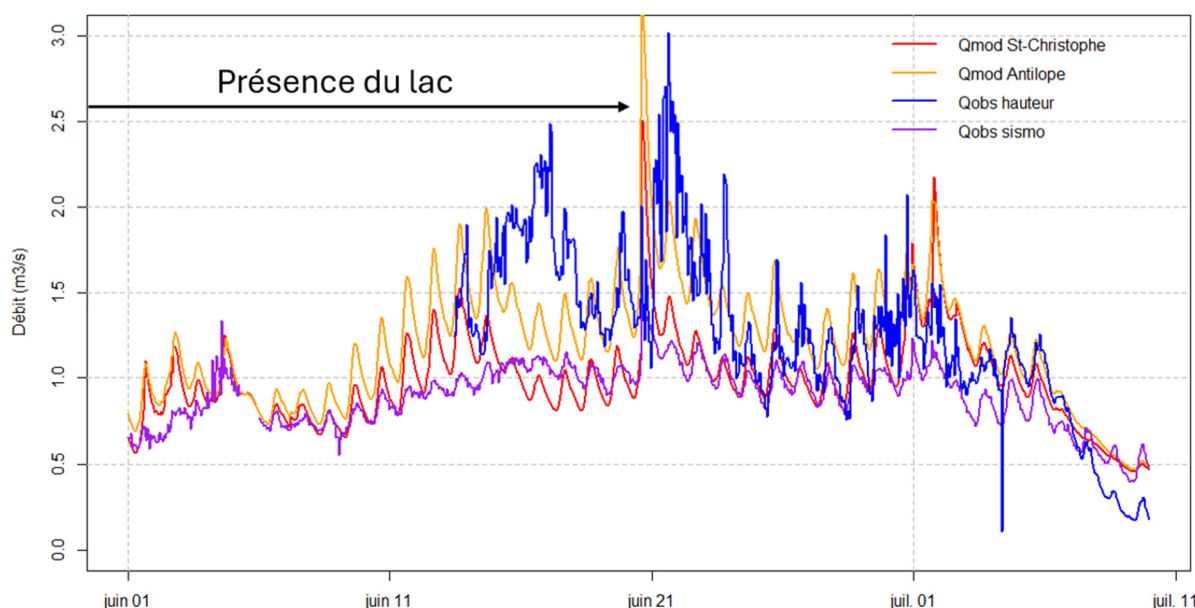


Figure 43: Débits observés et modélisés sur le début de la saison estivale 2025. Les heures sont en UTC. Les débits estimés à partir du capteur de hauteur d'eau situés au-dessus de 1.08 m<sup>3</sup>/s sont grandement dépendants de l'extrapolation permise par la courbe de tarage.

Cette figure met en évidence :

- Une différence d'intensité des débits modélisés entre les deux simulations hydrologiques. Cela est dû à un stock nivale simulé sur le bassin versant plus important avec les précipitations Antilope qu'avec les précipitations de Saint-Christophe. Cela mène à une fonte nivale plus soutenue avec le forçage Antilope, de l'ordre de 1.5 m<sup>3</sup>/s au mois de juin (plutôt 1 m<sup>3</sup>/s pour le forçage Saint-Christophe) ;
- Une bonne cohérence temporelle du débit estimé par le géophone avec les débits simulés, d'un point de vue de la dynamique globale sur le mois de juin et des cycles de fonte diurne. Le pic

de débit journalier est estimé et modélisé aux alentours de 18h/19h heure locale. Nous pouvons noter des cycles diurnes moins marqués dans les observations par le géophone que dans les simulations jusqu'à la mi-juin environ ;

- Une incohérence temporelle du débit estimé par le capteur de hauteur d'eau, par exemple après l'orage du 20 juin (réaction plus tardive du torrent en comparaison aux trois autres chroniques). Cette incohérence est confirmée par l'analyse des images du piège photo (Figure 44). Il est possible qu'elle soit liée au transport solide et aux dépôts dans la vasque accueillant le capteur de hauteur d'eau.

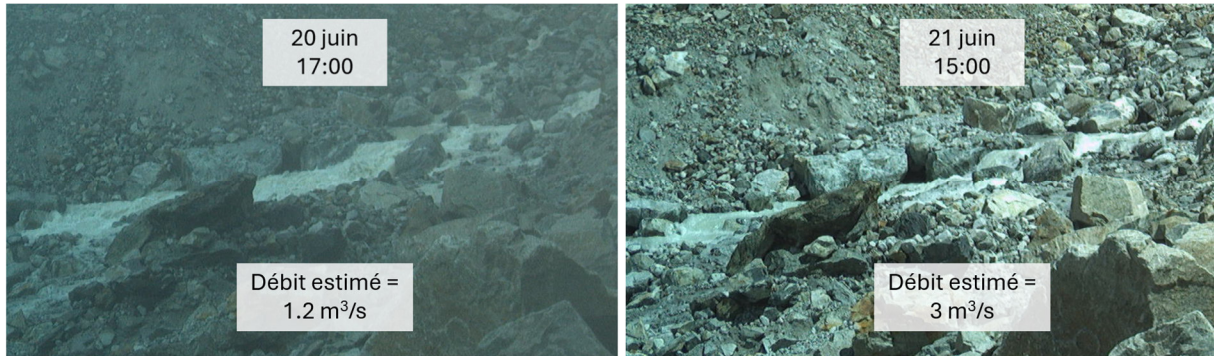


Figure 44: Erreur d'estimation du débit par le capteur de hauteur d'eau lors de l'orage du 20 juin, selon les images du piège photo.

- Un maintien de débits de fonte soutenus jusqu'au début du mois de juillet, tandis que la disparition du lac est observée le 19 juin ;
- L'absence de signature claire liée au remplissage puis à la vidange du lac dans les différentes estimations de débit.

La Figure 45 présente la suite de la saison, avec une meilleure cohérence des différentes estimations.

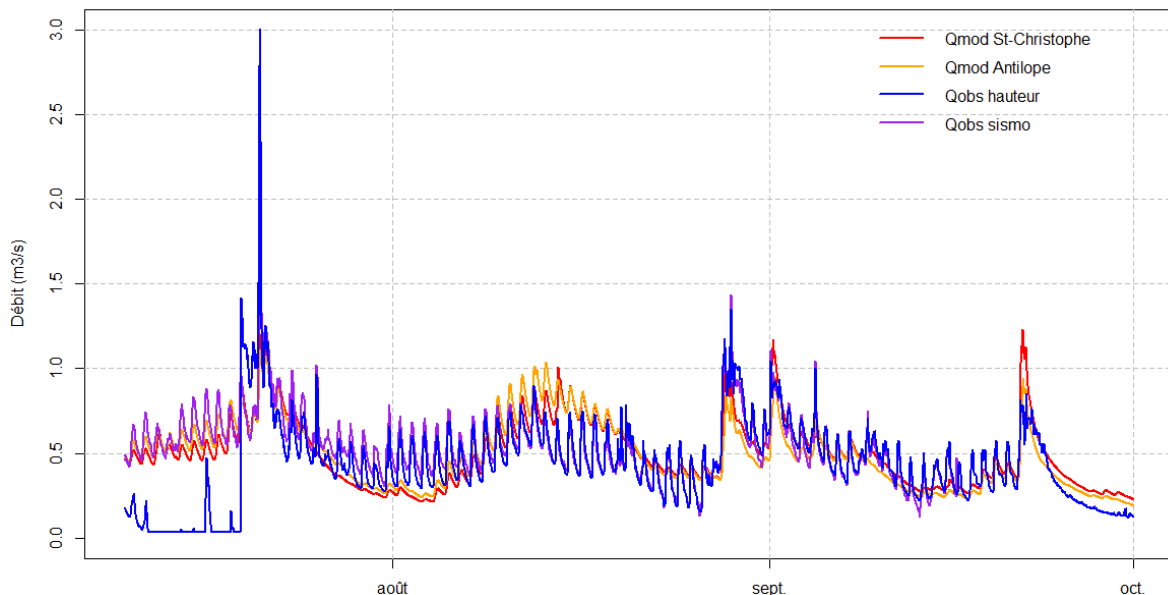


Figure 45: Débits observés et modélisés sur la fin de la saison estivale 2025. Les heures sont en UTC. Les débits estimés à partir du capteur de hauteur d'eau situés au-dessus de 1.08 m<sup>3</sup>/s sont grandement dépendants de l'extrapolation permise par la courbe de tarage.

L'estimation par le capteur de hauteur d'eau est défailante au début du mois de juillet (débit nul), tandis que l'estimation du géophone est proche des débits modélisés. Logiquement, les deux signaux sont cohérents sur la suite de la saison (période de calibration de la relation énergie sismique/débit). Les débits modélisés sont aussi globalement cohérents avec les débits observés, entre 0.5 m<sup>3</sup>/s et 1 m<sup>3</sup>/s. Les épisodes de précipitations sont aussi bien visibles.

Au final, nous retenons les points suivants de l'analyse des débits du torrent émissaire du glacier de Bonne Pierre :

- Les gammes de débits ont été de l'ordre de 1 à 1.5 m<sup>3</sup>/s pendant la période de fonte nivale qui s'est étalée jusqu'au 7 juillet environ, puis de l'ordre de 0.5 m<sup>3</sup>/s à 1 m<sup>3</sup>/s sur le reste de la saison ;

- La vidange du lac en 2025 a eu très peu d'influence sur les débits à l'exutoire du glacier (cohérent avec les estimations de dynamiques de vidange (cf. 3.2)) ;
- Les estimations du débit par le capteur de hauteur d'eau montrent des erreurs lors de la période de fonte et en réaction aux orages, probablement en lien avec l'évolution du lit du torrent. De plus, aucun débit mesuré par dilution n'a dépassé  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  : les débits estimés au-dessus de ce seuil, par exemple en réaction aux orages, sont donc grandement liés à l'interpolation permise par la courbe de tarage (incertitudes fortes) ;
- Les estimations par le géophone montrent un signal temporellement cohérent. L'intensité des débits est là encore associée à une incertitude forte, la relation entre énergie sismique et débit étant calibrée pour des débits inférieurs à  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ .

**Au regard de ces incertitudes, il n'est donc pas possible de traduire les observations et modélisations de débit vis-à-vis du remplissage et de la vidange du lac supraglaciaire, ou plus largement d'un potentiel rôle tampon joué par le glacier.** Le débit de vidange du lac estimé à  $30 \text{ l/s}$  entre le 10 et le 19 juin correspond à la largeur du trait sur les graphiques présentés (3% du signal pour un débit de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Il apparaît donc qu'en 2025, le signal de remplissage et de vidange du lac soit négligeable à l'échelle des débits observés au front du glacier.

### 4.3. Potentiel de rétention d'eau à la base du glacier

#### 4.3.1. Modélisation des barrières hydrauliques

Une modélisation des barrières hydrauliques a été effectuée sur le glacier de Bonne Pierre. Ce travail théorique s'appuie sur la topographie de surface et la topographie sous-glaciaire pour estimer les volumes d'eau pouvant être retenus à la base du glacier par un processus de barrière hydraulique. Un coefficient de flottaison de la glace est aussi considéré, pris par défaut égal à 1. La présence de barrière hydraulique est liée à la présence de dépressions de surface, qui créent une dépression de potentiel hydraulique à la base du glacier et ainsi une zone de stockage potentielle en amont d'un point de blocage lié à une augmentation de l'épaisseur de glace.

La Figure 46 présente la hauteur des poches d'eau potentielles en considérant un coefficient de flottaison égal à 1. Logiquement, la zone du lac supraglaciaire ressort en premier lieu, puisqu'elle correspond aux dépressions de surface les plus importantes sur le glacier de Bonne Pierre. Cette zone est ainsi la plus favorable au stockage d'eau en sous-glaciaire. Il est cependant à noter que la présence du lac à sa cote maximale « gomme » la dépression de surface et ainsi la barrière hydraulique, ne permettant pas de rétention d'eau sous le lac selon cette théorie.

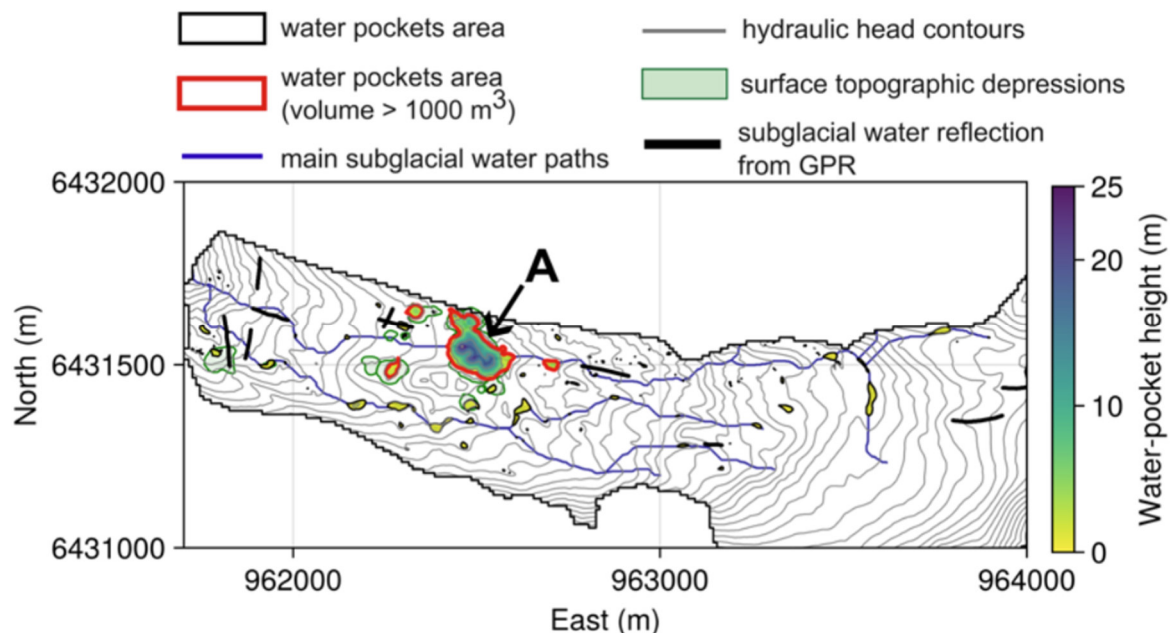


Figure 46: Distribution des hauteurs des poches d'eau sous-glaciaires et des principaux chemins d'écoulement sous-glaciaires (seule la langue du glacier est représentée ici). Le potentiel hydraulique est représenté par les courbes de niveau grises espacées de 10 m. Les poches d'eau potentielles supérieures à  $1000 \text{ m}^3$  sont délimitées en rouge (en violet si elles sont plus petites). Les dépressions les plus importantes à la surface du glacier sont représentées par un ombrage vert. La lettre A indique à la fois l'emplacement de la plus grande poche d'eau ( $148\,000 \text{ m}^3$ ) et celui du lac supraglaciaire observé en juin 2024. Les lignes noires épaisses indiquent les réflexions du radar suggérant la présence d'eau sous-glaciaire. Source : Figure tirée de Ogier et al., 2026.

Selon la modélisation, le volume d'eau maximal pouvant être retenu à la base du glacier de Bonne Pierre en lien avec les barrières hydrauliques est de l'ordre de 160 000 m<sup>3</sup> selon la topographie du 28 juin 2024. La perturbation des différents paramètres (topographie de surface, topographie sous-glaciaire, coefficient de flottaison) sur 1000 simulations montre une diversité de chemins empruntés par l'eau par rapport à la simulation déterministe, ce qui illustre la sensibilité des résultats aux incertitudes sur les données d'entrée du modèle (Figure 47). Le volume moyenné sur l'ensemble de ces simulations est de l'ordre de 230 000 m<sup>3</sup>. Le modèle apparaît **très sensible au coefficient de flottaison de la glace**. Des ordres de grandeur de volume stockés significativement supérieurs peuvent être modélisés selon le coefficient considéré. Il convient donc d'être prudent sur les ordres de grandeur obtenus tant les incertitudes sont importantes.

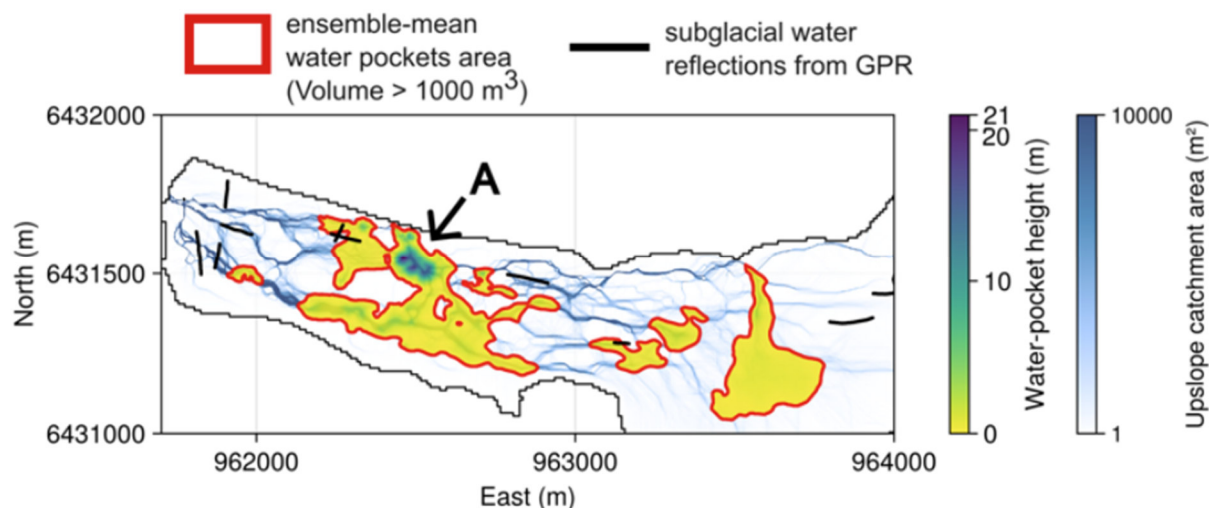


Figure 47: Hauteur moyenne des poches d'eau et bassins versants en amont, calculée à partir de 1 000 réalisations stochastiques du champ de potentiel hydraulique. Seuls les contours fusionnés des poches d'eau sous-glaciaires d'une taille supérieure à 1000 m<sup>3</sup> sont représentés (en rouge). La lettre A indique l'emplacement du lac supraglaciaire observé en juin 2024. Les lignes noires indiquent les réflexions GPR interprétées comme de l'eau sous-glaciaire. Source : Figure tirée de Ogier et al., 2026.

Malgré ces incertitudes, ce travail de modélisation met en évidence le potentiel du glacier de Bonne Pierre à retenir de l'eau à sa base en différents points en lien avec sa topographie de surface chahutée. Deux hypothèses ont été formulées dans le cas où un volume d'eau additionnel au lac aurait été vidangé lors de la crue de 2024 :

- **La formation de cavités sous-glaciaires en amont des barrières hydraulique pendant plusieurs années**, s'étant vidangé en même temps que le lac. Dans cette configuration, la zone principalement concernée est située sous le lac (principale barrière hydraulique). La cavité aurait eu le temps de grossir au fil des ans pendant les périodes où le lac était vide et que les phases de remplissage du lac n'ont pas été capables de casser la barrière hydraulique. Cette rupture survient uniquement en juin 2024 lorsque les fortes pluies et la fonte simultanée de la neige produisent une augmentation rapide du niveau du lac qui dépasse une altitude critique au-delà de laquelle la barrière hydraulique est rompue ;
- **Le stockage temporaire (quelques heures à quelques jours) de l'eau de pluie et de fonte dans le réseau sous-glaciaire**. À cette époque de l'année, le réseau sous-glaciaire reste peu développé et n'est pas capable d'absorber de grosses quantités d'eau. Suite aux fortes pluies et à la fonte du manteau neigeux, il est possible que ce réseau se soit retrouvé saturé avec des pressions d'eau importantes, pouvant localement soulever le glacier si celles-ci s'appliquent sur des surfaces suffisamment grandes (i.e., de dimensions supérieures aux épaisseurs de glace). Les zones d'accumulation de cette eau sont les zones de faibles potentiels hydrauliques, donc identiques à celles des barrières hydrauliques (zone du lac en premier lieu). Les volumes d'eau stockés sont difficilement quantifiables mais pourraient être du même ordre de grandeur que ceux stockés derrière les barrières hydrauliques. Dans ce scénario, le stockage d'eau se fait sur des hauteurs plus petites que pour les barrières hydrauliques mais sur une étendue plus grande. Un décollement temporaire du glacier a d'ailleurs été estimé à proximité de la zone du lac en 2025 (ce point est détaillé en partie 4.3.3) et pourrait être un indice de ce type de fonctionnement.

	Poche d'eau derrière des barrières hydrauliques	Stockage par soulèvement du glacier
Étendue	Limitée	Grande
Hauteur	Grande	Petite
Débits entrants	Faibles	Importants
Pression d'eau	Constante	Variable
Coef. flottaison	$f \approx 1$	$f > 1$
Durée formation	Lente (années)	Rapide (heures, jours)
Durée de vie	Longue	Courte
Signature vidange	Crevasses circulaires	Peu visible

Tableau 1: Principales caractéristiques des modes de stockage de l'eau sous le glacier de Bonne Pierre : dans des poches d'eau derrière les barrières hydrauliques ou par soulèvement du glacier sur de larges étendues.

Ces deux scénarios sont envisageables, et il est possible que ces deux types de stockage co-existent. Par contre, il est peu probable que les volumes maximaux des barrières hydrauliques aient été atteints en juin 2024, notamment à l'aplomb du lac supraglaciaire. En effet, un crevassement, voir des effondrements auraient dû être visibles en surface dans les semaines qui ont suivi la vidange. Ce phénomène a seulement été observé à l'amont du front, où un effondrement a rendu visible une cavité d'environ 10 000 m<sup>3</sup>. Étant donné la géométrie, il est probable que cette cavité ait été présente depuis quelques années et que celle-ci se soit formée derrière une barrière hydraulique.

En conclusion, l'étude des barrières hydrauliques montre que ce mécanisme peut potentiellement stocker des volumes d'eau conséquents, supérieurs à ceux contenus dans le lac supraglaciaire, sur des temps longs ou courts, avec probablement une combinaison des deux. **Néanmoins, il n'est pas possible de quantifier quel volume d'eau sous-glaciaire a effectivement été relâché au moment de l'événement de juin 2024.**

Par ailleurs, ce travail de modélisation des potentiels hydrauliques permet d'estimer le bassin versant sous-glaciaire qui serait drainé au droit de la zone du lac selon la simulation déterministe. Selon ces calculs, le bassin versant sous-glaciaire au droit du lac représente 3.4 km<sup>2</sup>, soit plus de 70% du bassin versant du glacier de Bonne Pierre (Figure 48).



Figure 48: Bassin versant du glacier de Bonne Pierre basé sur la topographie de surface, et bassin versant au droit de la zone du lac estimé grâce à la charge hydraulique.

### 4.3.2. Mesures radar

Au-delà de la mesure des épaisseurs de glace, les investigations radar peuvent permettre de détecter des anomalies dans la glace (cavités, réseau sous-glaciaire développé).

La campagne radar de l'ETHZ a mis en évidence deux zones d'anomalie dans le glacier de Bonne Pierre :

- Un conduit sous-glaciaire développé au centre du glacier d'environ 5 m de hauteur sur environ 80 m de longueur ;
- Une potentielle cavité sous-glaciaire contenant de l'eau à l'extrémité amont du glacier. La structure pourrait mesurer 10 m de hauteur pour environ 40 m à 70 m de largeur sur une longueur potentielle d'environ 100 m. Cela correspond à un volume potentiel de 40 000 à 70 000 m<sup>3</sup>.

Il est important d'avoir en tête que ces résultats sont grandement liés à l'interprétation des signaux radar par les opérateurs, et que la présence effective de ces anomalies/de leur taille/de la présence d'eau est associée à une forte incertitude.

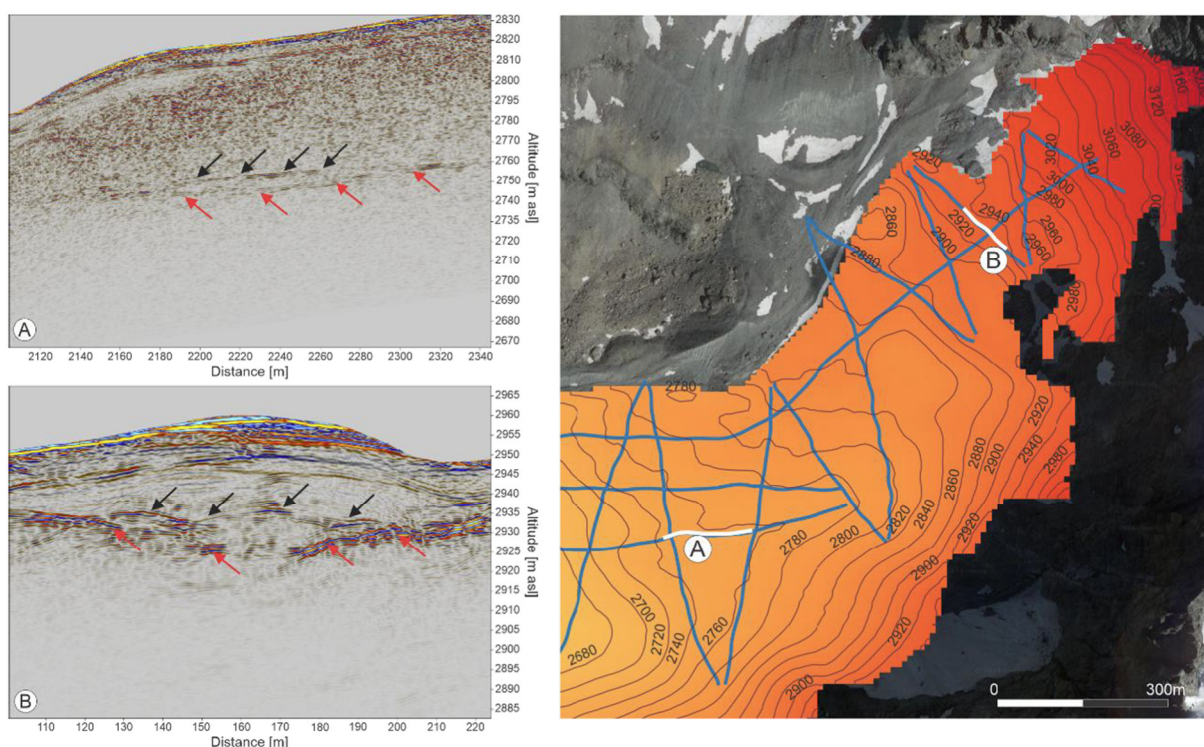


Figure 49: Portion des profils radar avec en flèches noires les zones d'anomalie (A : conduit sous-glaciaire, B: cavité) et en flèches rouge l'interprétation du socle rocheux. La localisation des profils est présentée sur la carte de droite. Source : ETHZ.

La campagne radar de l'IGE en février 2026 a couvert la zone du lac et la zone en aval du lac. Le socle rocheux n'est visible sur aucune des traces du radar sol. Les mesures du radar drone semblent indiquer **un glacier polythermal**. Les premières dizaines de mètres sont très propres, avec très peu de diffraction du signal radar, ce qui peut être caractéristique d'une glace froide. Cette couche n'est pas d'épaisseur constante le long d'un profil, ni d'un profil à l'autre. Sous cette couche, le signal est beaucoup plus perturbé, montrant de nombreuses diffractions du signal radar, ce qui est caractéristique d'une glace sale contenant de nombreuses inclusions. Cette couche serait composée de glace au point de fusion (glace tempérée), avec la présence d'eau dans la matrice de glace. Une faible teneur en eau peut expliquer une diffraction importante du signal radar. L'évolution très brutale des diffractions du signal est caractéristique d'une transition entre de la glace froide (sans eau) et de la glace tempérée (teneur en eau > 0). Par ailleurs, les mesures effectuées ne mettent pas en avant d'anomalie particulière sur les quelques zones survolées.

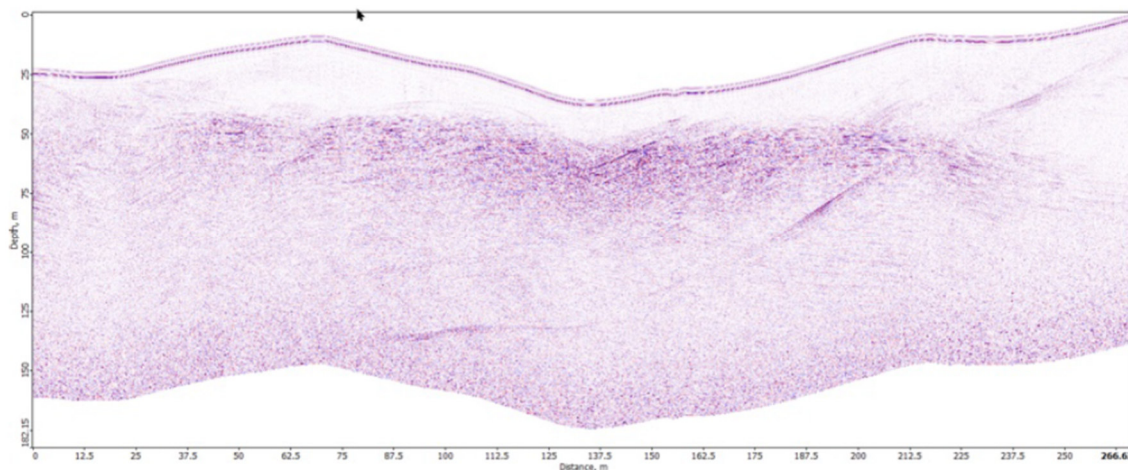


Figure 50: Exemple de profil effectué sous le radar drone (profil transversal au glacier, la rive droite est à droite de l'image). Source : IGE.

Au global, les deux campagnes radar n'ont pas permis une détection du socle rocheux (ou de potentielles anomalies) sur une large zone centrale du glacier, la couche de glace tempérée masquant la base du glacier.

#### 4.3.3. Observations du géophone BER22 en 2025

La mesure des vibrations du glacier par le géophone BER22 situé à une centaine de mètres en aval du lac met en avant une anomalie mécanique temporaire dans ou sous la glace, puisque le rapport entre les vibrations verticales et horizontales est supérieur à 1 sur une certaine période (signal significatif quand rapport V/H supérieur à 1.2, Figure 51). Une augmentation du rapport V/H est observée début mai jusqu'à un plateau autour de 1.4, puis une diminution est observée pendant 3 semaines à partir de fin juin pour retrouver une valeur proche de 1 autour du 10 juillet, ce qui suggère la disparition de l'anomalie mécanique. On peut donc imaginer un décollement du glacier qui se referme ensuite, en lien avec l'évolution de la charge du lac.

Il est intéressant de noter que le rapport V/H augmente aussi à la suite des principaux épisodes de précipitations, plutôt vers des valeurs de 1.2 mais avec une certaine inertie avant de retrouver des valeurs proches de 1 (courbe noire les 20/21 juillet, 28/29 août, 1<sup>er</sup> septembre et 21 septembre).

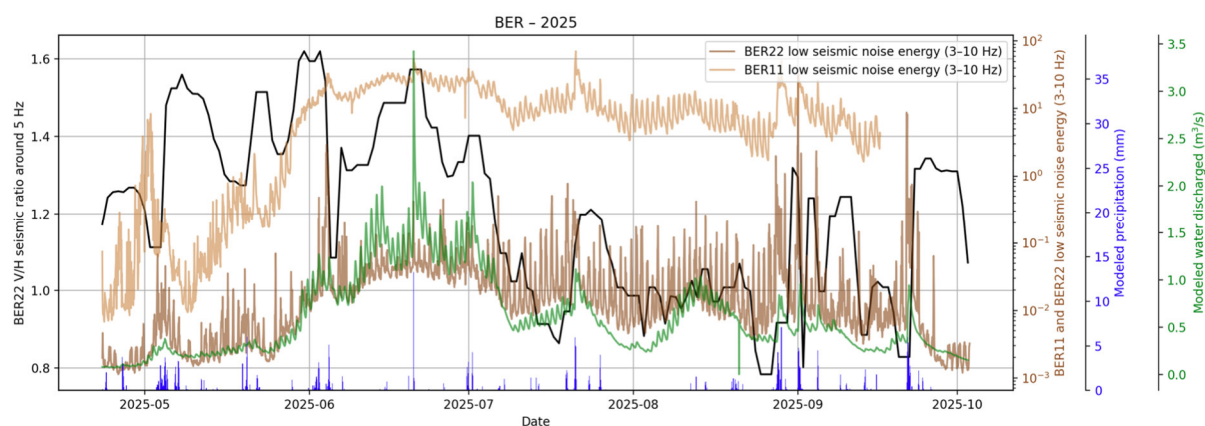


Figure 51: Amplitude du pic V/H au cours de la saison (en noir). Les valeurs >1 marquent la résonance d'une cavité ou d'un décollement basal du glacier. Les précipitations Antilope sont représentées en bleu et les débits modélisés en vert. L'énergie sismique du géophone au front du glacier (BER11) et du géophone sur le glacier (BER22) sont aussi indiquées (proxy du débit). Source : ISTERRE.

Une analyse mécanique du décollement du glacier compatible avec ce signal sismique a été effectuée. Cette analyse permet d'avoir une assez bonne représentation de l'extension horizontale du décollement, mais avec une incertitude forte sur l'extension horizontale. Elle suggère que le signal est cohérent avec un décollement d'une extension horizontale de 100 m par 60 m, que ce soit pour une extension verticale de 1 m (soit un volume potentiel de 6000 m<sup>3</sup>) ou de 10 m (soit un volume potentiel de 60 000 m<sup>3</sup>). L'extension verticale de ce décollement est donc très mal contrainte. Une extension verticale importante (de l'ordre de 10 m ou plus) semble peu probable, puisque la fermeture de cette cavité sous-glaciaire (retour d'un rapport V/H autour de 1) serait associée à des crevasses circulaires visibles en surface.

## 5. Synthèse

### 5.1. Principaux apprentissages

#### Le glacier

Le glacier de Bonne Pierre possède des épaisseurs de glace importantes, supérieures à 100 m sur la partie centrale du glacier. La perte d'épaisseur de glace s'est poursuivie en 2025, avec une forte variabilité spatiale de la fonte. Cette dernière est très marquée là où la glace vive est apparente, ce qui contribue à accentuer les dépressions de surface déjà présentes sur le glacier. Les vitesses du glacier sont faibles sur la partie aval (4 m/an environ) et plus importantes sur la partie amont (13 m/an environ). Le glacier poursuit sa décélération, malgré une augmentation éphémère de la vitesse entre 2024 et 2025. **Globalement, l'évolution du glacier en 2025 s'inscrit dans les tendances de fond mises en évidence dans la rétro-analyse en 2024 : décélération, perte de masse et complexification de la topographie de surface.** Les épaisseurs de glace importantes suggèrent néanmoins que ces dynamiques pourraient se poursuivre sur le long terme.

**La topographie chahutée du glacier de Bonne Pierre semble favorable à la présence de barrières hydrauliques.** Une modélisation suggère que le volume d'eau maximal pouvant être retenu en sous-glaciaire selon ce processus – très probablement de manière temporaire – serait du même ordre de grandeur voire supérieur au volume du lac en 2024. Ces estimations donnent des ordres de grandeur de potentiels maximum selon la topographie de surface, mais n'objectivent pas la présence réelle d'eau dans le glacier. Elles sont aussi très dépendantes des paramètres retenus, et une analyse de sensibilité a montré que des volumes très différents pouvaient être modélisés. Les investigations radar de novembre 2024 ont montré qu'il était difficile de détecter le socle rocheux sous le glacier sur toute la partie centrale. Elles pointent aussi vers une cavité sous-glaciaire potentielle (40 000 à 70 000 m<sup>3</sup>) située à l'extrémité amont du glacier. Les investigations de février 2026 confirment la difficulté à détecter le socle rocheux sur la partie centrale du glacier. Elles suggèrent aussi que le glacier est polythermal, avec une glace froide surmontant une glace tempérée.

Dans le cas où des volumes d'eau supplémentaires auraient été relâchés par le glacier en plus du lac lors de la crue de 2024, deux processus ont été évoqués :

- La vidange de poches d'eau formées sur le temps long en amont de barrières hydrauliques. Des crevasses circulaires et des effondrements devraient apparaître à la surface du glacier après la vidange, ce qui n'a pas été le cas hormis pour la poche d'eau de 10 000 m<sup>3</sup> proche du front ;
- La mise en pression plus temporaire du réseau sous-glaciaire (période de fonte, épisode de pluie) en amont des barrières hydrauliques qui permet un soulèvement du glacier sur de grandes surfaces et un stockage d'eau du même ordre de grandeur, sans que des indices de surface ne soient visibles après la vidange.

Ces deux types de stockage peuvent co-exister à la base du glacier. Dans tous les cas, dans le cas où de tels processus auraient été à l'œuvre en juin 2024, **il n'est pas possible de chiffrer le volume d'eau relâché lors de la crue.**

#### Le lac

Le lac supraglaciaire temporaire de Bonne Pierre s'est reformé en 2025, et l'exutoire en rive droite du glacier a été inactif en 2025. Cela signifie que les chenaux intra-glaciaires ou sous-glaciaires ayant permis la vidange rapide de 2024 par la rive droite se sont refermés entre 2024 et 2025, a minima sur une partie de leur linéaire (effondrement, regel). Le lac s'est vidangé progressivement en 2025 sans générer de débits significatifs. Cela suggère que le glacier a repris un fonctionnement **proche de celui observé avant 2024.**

La durée de vie du lac de Bonne Pierre en 2025 a été de **25 jours**, entre le 26 mai et le 19 juin. Le niveau maximal du lac a été atteint aux alentours du 8 juin, pour un volume maximal estimé à **28 000 m<sup>3</sup>**. Ce volume est bien inférieur aux 95 000 m<sup>3</sup> estimés en juin 2024.

**Le lac de Bonne Pierre n'est pas étanche, contrairement à la plupart des lacs glaciaires alpins présents de manière pérenne.** Un débit de fuite semble présent et permet au lac de disparaître progressivement chaque année (sauf en 2024). Le lac se remplit quand les apports en eau sont supérieurs au débit de fuite, tel qu'observé de manière pérenne lors de la fonte nivale ou de manière ponctuelle à la suite d'épisodes de précipitations. L'apparition saisonnière du lac semble liée à l'amorce de la fonte nivale (en lien avec la température de l'air), tandis que la durée de vie du lac et son volume semblent dictés par la quantité de neige présente sur le bassin versant. Des indicateurs simples (températures et hauteur de neige à la nivose des Ecrins) ont été présentés dans ce rapport afin de

qualifier les dates d'apparition, de niveau maximal, et de disparition du lac. **Les chiffres avancés sont pensés comme un outil empirique de premier ordre. Ils sont associés à de fortes incertitudes et peuvent ne plus être valables d'une saison à l'autre au regard de l'évolution du système. Ils peuvent néanmoins servir de points de repère à ajuster au regard des observations à venir, et pourraient être complétés par d'autres indicateurs plus complexes.**

Le point de blocage par lequel transite le débit de fuite se situe très probablement à la base du glacier dans les rochers et sédiments qui composent le socle rocheux, **à une altitude beaucoup plus faible que celle du lac. La position exacte de ce point de blocage n'est pas connue.**

**Par ailleurs, un décollement du glacier en aval du lac a été mesuré entre le mois de mai et le mois de juillet** (période plus longue que la présence du lac), sur une surface d'environ 60 m par 100 m selon les premières estimations. L'épaisseur de ce décollement temporaire n'est pas connue.

Au final, deux hypothèses sont formulées sur le fonctionnement du glacier de Bonne Pierre au droit du lac supraglaciaire.

#### Hypothèse 1 : Point de blocage à la base du glacier et remplissage par la surface

La Figure 52 présente de manière simplifiée le fonctionnement du lac selon l'hypothèse 1 sous forme de coupe longitudinale du glacier (profil en long).

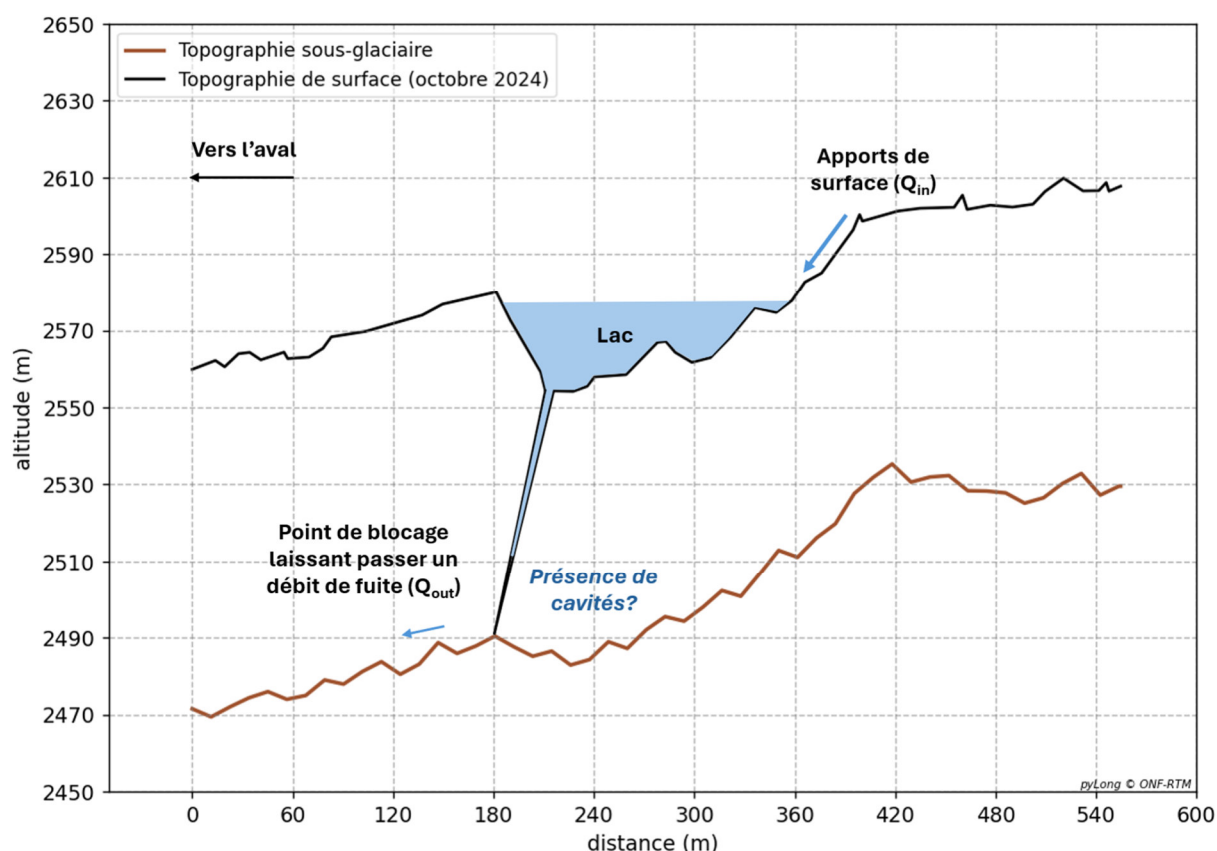


Figure 52: Représentation schématique du fonctionnement du glacier au droit du lac selon l'hypothèse 1.

Dans cette configuration, **les apports en eau de fonte depuis la surface constituent la totalité des apports en eau du lac.** Le point de blocage sous le glacier laisse passer un débit de fuite : l'équilibre entre les apports de surface et le débit de fuite pilote le niveau du lac. La présence d'une cavité sous-glaciaire temporaire ou permanente en amont du point de blocage est possible.

Dans ce mode de fonctionnement, le bassin versant drainé au droit du lac est difficile à caractériser : considérer l'ensemble du bassin versant topographique maximiserait les apports, étant donné que des infiltrations dans le glacier ont très probablement lieu en amont. Les apports en eau seraient alors relativement locaux.

#### **Deux arguments peuvent appuyer cette hypothèse :**

- Aucune alimentation en eau n'a été observée depuis la surface lors du remplissage du lac en 2025, mais il ne peut donc pas être exclu que des apports de surface non visibles sous la neige et les blocs contribuent au remplissage du lac depuis l'amont. La faible vitesse de remplissage (proche de la vitesse de vidange selon les piézomètres, de l'ordre de 30 l/s) ne requiert pas nécessairement des apports en eau très importants en cas de débit de fuite faible ;

- La disparition du lac le 19 juin 2025 s'opère alors que l'enneigement à proximité du lac et en amont est très réduit. Néanmoins, à l'échelle du bassin versant, l'enneigement permet encore un maintien de débits de fonte soutenus sur le torrent de Bonne Pierre jusqu'au début du mois de juillet. Cela militerait pour des apports en eau relativement « locaux » au lac (disparition du lac liée au déneigement du bassin versant de surface drainé).

### Hypothèse 2 : Point de blocage à la base du glacier et remplissage par la base

La Figure 53 présente de manière simplifiée le fonctionnement du lac selon l'hypothèse 2 selon la même coupe.

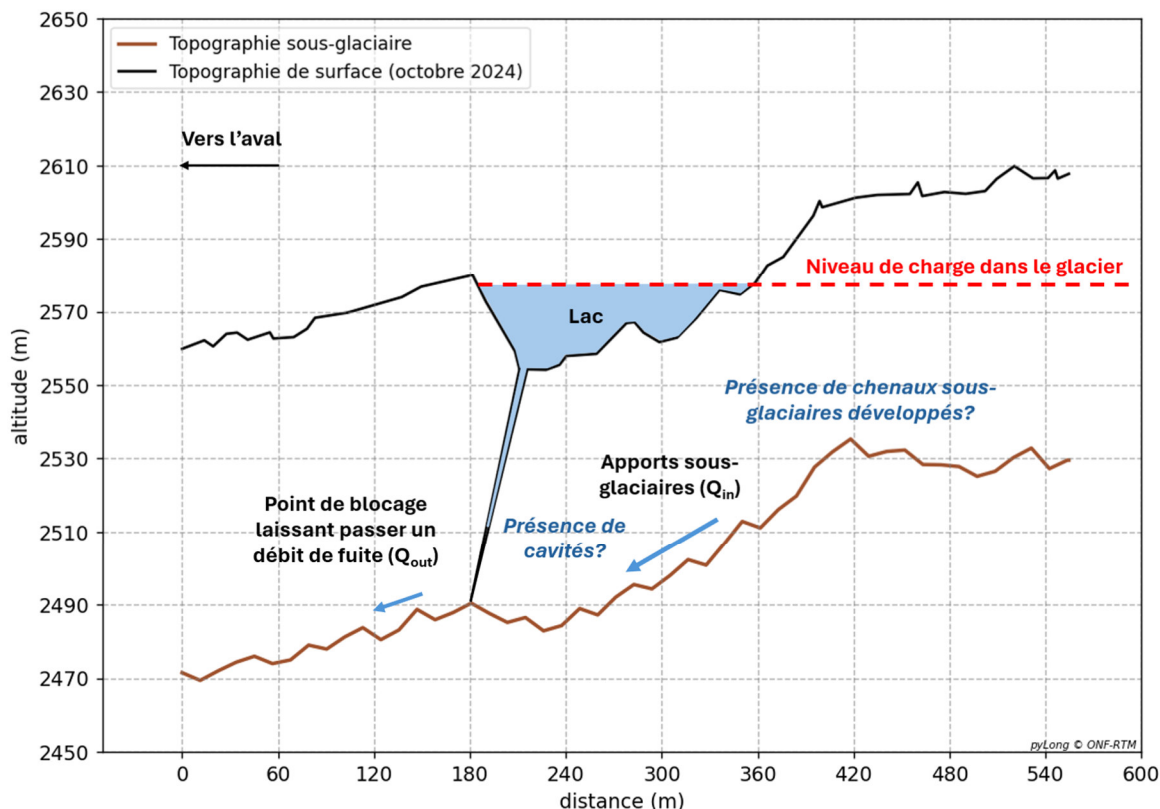


Figure 53: Représentation schématique du fonctionnement du glacier au droit du lac selon l'hypothèse 2.

Dans cette configuration, **le lac est connecté au réseau de drainage sous-glaciaire**. Les apports en eau depuis la surface seraient négligeables, et le lac se remplirait principalement par la base, **en agissant comme une cheminée d'équilibre du réseau sous-glaciaire**. Les débits entrants ( $Q_{in}$ ) et le débit de fuite ( $Q_{out}$ ) sont alors plus conséquents que dans l'hypothèse 1, car le bassin versant drainé est plus grand. Dans ce mode de fonctionnement, **le niveau du lac représenterait le niveau de charge dans le glacier, avec une influence amont importante**. La présence d'une cavité sous-glaciaire temporaire en amont du point de blocage est possible, tout comme la présence de réseaux sous-glaciaires développés, en lien avec cette forte charge saisonnière impactant le réseau de drainage au droit du lac et en amont. En effet, lorsque le niveau du lac est élevé, une mise en flottaison de la glace peut s'opérer, ce qui permet un décollement progressif de la base du glacier et une augmentation du volume d'eau stocké.

La modélisation de la charge hydraulique a montré que le chenal sous-glaciaire au droit de la zone du lac drainait potentiellement 70% du bassin versant du glacier (3.4 km<sup>2</sup>). Dans le mode de fonctionnement évoqué, le débit de fuite serait alors conséquent puisque les débits observés au front du glacier sont proches des débits modélisés, y compris au mois de juin.

#### **Quatre arguments peuvent appuyer cette hypothèse :**

- L'absence d'apports en eau au lac visibles depuis la surface réduit la probabilité de l'hypothèse 1 (cf. partie précédente) ;
- Un chenal sous-glaciaire semble effectivement passer dans la zone du lac d'après les modélisations des potentiels hydrauliques (Figure 46) ;
- Les vitesses maximales des remplissages journaliers du lac lors de la phase de vidange sont observées au même moment que les débits maximaux journaliers du torrent de Bonne Pierre

au front du glacier. De plus, le volume journalier maximal du lac est observé vers 1h/2h du matin. Cela pourrait suggérer un lien avec un bassin versant relativement conséquent, permettant une certaine inertie du système ;

- La symétrie des dynamiques du remplissage et de la vidange du lac (courbe en cloche symétrique de la cote du lac de la Figure 23) peut donner l'impression de l'évolution d'un niveau de nappe et donc d'un remplissage se faisant par la base du glacier.

A l'heure actuelle, cette hypothèse est privilégiée. **L'instrumentation de 2025 ne permet néanmoins pas d'être conclusif, et il est possible que la réalité soit une combinaison des deux hypothèses (remplissage par la surface et par la base).** De nouvelles actions seront menées en 2026 sur le glacier de Bonne Pierre pour tenter de mieux caractériser le fonctionnement du lac.

## 5.2. Caractérisation de l'aléa glaciaire

Au regard de la compréhension actuelle du glacier et du lac, **la saison la plus critique vis-à-vis de l'aléa glaciaire correspond à la période de fonte nivale**. Selon les années, cette période peut débuter à partir du mois de mai (exemple de 2022) et finir à la mi-juillet (exemple de 2024). La quantité de neige présente sur le bassin versant semble être un bon indicateur de la durée de vie du lac et du volume d'eau stocké. Le volume d'eau potentiellement stocké à la base du glacier au cours de cette période n'est pas connu.

**Le niveau du lac critique, à partir duquel une vidange rapide peut s'enclencher, n'est pas connu.** En 2024, la vidange rapide (probablement quelques heures au lieu de plusieurs jours) a été associée à un lac plein et à un épisode de pluie sur neige notable. De telles conditions correspondent donc aux conditions les plus favorables à une vidange rapide. En 2025, l'enneigement légèrement inférieur aux normales a conduit à un lac plus éphémère, d'un volume environ trois fois plus faible, et à une vidange progressive pendant une dizaine de jours. Il n'est pas possible de savoir si le système en place aujourd'hui a repris un fonctionnement totalement identique aux années précédant 2024 (lac plein + épisode météo intense nécessaires à une vidange rapide), ou si la crue de 2024 a rendu le système plus sensible à une vidange rapide (par exemple, en cas de présence de chenaux résiduels en rive droite facilitant une connexion hydraulique).

La disparition du lac ne peut pas être traduite comme une disparition de tout stockage d'eau temporaire dans le glacier, notamment dans la zone du lac (point de blocage probablement situé à la base du glacier). Néanmoins, **la cote du lac semble être un indicateur de la mise en charge du glacier dans cette zone**. Une absence de lac indique un niveau de charge plus faible qu'en présence du lac, et ainsi une probabilité de vidange rapide plus faible.

Par ailleurs, **une vidange de poche d'eau sous-glaciaire à d'autres périodes de l'année ne peut pas être complètement exclue**. Le glacier de Bonne Pierre semble favorable à la présence de points de blocages du réseau sous-glaciaire en lien avec sa topographie chahutée. Ce mécanisme peut être à l'origine de rétentions d'eau probablement temporaires sous le glacier, par exemple à la suite d'épisodes de précipitations ou de fonte marquée. La cavité observée à 100 m du front en août 2024 - d'un volume d'environ 10 000 m<sup>3</sup> - témoigne de cette susceptibilité, tout comme la potentielle cavité interprétée des données radar (40 000 à 70 000 m<sup>3</sup>) à l'extrémité amont du glacier. Néanmoins à l'heure actuelle, aucune mesure n'a objectivé la présence effective d'eau en sous-glaciaire en réponse à ces potentiels (faible visibilité radar sur la zone centrale du glacier), et le seul phénomène glaciaire observé récemment sur le glacier de Bonne Pierre a eu lieu en présence du lac supraglaciaire.

Les résultats présentés dans ce rapport s'appuient sur les observations de 2025 couplées aux travaux menés dans la rétro-analyse de 2024. Ces résultats apportent des éléments pour les années à venir, **mais ne sont en aucun cas déterministes sur le fonctionnement futur du glacier et du lac**. En effet, **les environnements glaciaires sont en constante évolution** (dynamique du glacier, fonte, évolution des réseaux de drainage). L'évolution entre 2024 et 2025 en est la preuve : fermeture des chenaux en rive droite, reprise d'un fonctionnement proche de celui observé avant 2024.

Le présent rapport traite essentiellement du glacier de Bonne Pierre et ainsi de la contribution glaciaire à un aléa torrentiel. Il n'en reste pas moins que le torrent de Bonne Pierre reste fortement déstabilisé à la suite de la crue de 2024, le rendant plus sensible aux crues courantes - y compris les crues liées à des orages localisés ou à des précipitations plus généralisées, sans composante glaciaire.



**Office National des Forêts**

Agence RTM Alpes du Nord  
Service RTM de l'Isère  
9 quai Créqui  
38000 GRENOBLE