



Rétro-analyse de la crue du torrent des Etançons du 21 juin 2024

Antoine Blanc, Clément Misset, Robin Mainieri, Benoit Llamas

► To cite this version:

Antoine Blanc, Clément Misset, Robin Mainieri, Benoit Llamas. Rétro-analyse de la crue du torrent des Etançons du 21 juin 2024. ONF-RTM. 2024. <hal-04865442>

HAL Id: hal-04865442

<https://hal.science/hal-04865442v1>

Submitted on 6 Jan 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC0 1.0 - Universal - International License



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Office National des Forêts



rtm

restauration des terrains en montagne



Rétro-analyse de la crue du torrent des Etançons du 21 juin 2024

2024


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

Date du dernier enregistrement	Désignation du document	Maitre d'ouvrage	Nombre de pages
19/12/2024	Rétro-analyse de la crue du torrent des Etançons du 21 juin 2024	Etat (Direction Départementale des Territoires de l'Isère)	73

	Nom Prénom	Fonction
Auteurs	Antoine Blanc, Clément Misset, Robin Mainieri, Benoit Llamas	RTM de l'Isère et Département Risques Naturels – Pôle RTM
Relecteurs	Pierre Dupire, Yannick Robert, Vincent Mano, Matthieu Schmitt, Kristian Royer David Binet Yann Queffelec Partenaires scientifiques	RTM de l'Isère Chef de l'agence RTM Alpes du Nord Département Risques Naturels – Pôle RTM
Contributeurs	Partenaires scientifiques (dans l'ordre du rapport Annexe) : Felix de Montety (LESSEM), Guillaume Piton (IGE), Dominique Laigle (IGE), Frederic Liebault (IGE), Guillaume Chambon (IGE), Alain Recking (IGE), Philippe Frey (IGE), Johan Berthet (EDYTEM), Philipp Schoeneich (PACTE), Laurent Astrade (EDYTEM), Philip Deline (EDYTEM), Denis Roy (Météo France CMAN), Simon Filhol (Météo France-CNRS, CNRM/CEN), Marie Dumont (CNRM/CEN), Pascal Hagenmuller (CNRM/CEN), Simon Gascoin (Cesbio), Emmanuel Paquet (EDF-DTG), Frederic Gottardi (EDF-DTG), Matthieu Le Lay (EDF-DTG), Guillaume Thirel (HYCAR), Noémie Bontemps (ISTerre), Eric Larose (ISTerre), Mickael Langlais (ISTerre), Malgorzata Chmiel (Géoazur), Emmanuel Thibert (IGE), Diego Cusicanqui (ISTerre), Olivier Gagliardini (IGE), Pascal Lacroix (ISTerre), Etienne Berthier (LEGOS), Christian Vincent (IGE), Firmin Fontaine (IGE), Mylène Bonnefoy-Demongeot (IGE), Julien Brondex (IGE), Fatima Karbou (CNRM/CEN), Guillaume James (LJK), Adrien Mauss (Météo France DIROP).	
	Témoins de l'évènement : voir partie 3.1	
Validation	Pierre Verry	Chef du service RTM de l'Isère 

Version	Date	Observations
V0.1	04/12/2024	
V0.2	12/12/2024	Mise à jour suite aux relectures internes et externes
V1	13/12/2024	Version validée



Sommaire

1. Introduction	4
1.1. Contexte	4
1.2. Cadre de travail	6
1.3. Contributions	7
1.4. Données de référence	8
2. La Bérarde et le torrent des Etançons	9
2.1. Présentation du bassin versant des Etançons	9
2.2. Historique sur la Bérarde	11
2.3. Historique des crues	12
3. Déroulé de la crue du 21 juin 2024	17
3.1. Les témoignages	17
3.1.1. Fin mai/début juin	17
3.1.2. Jeudi 20 juin 2024	17
3.1.3. Vendredi 21 juin 2024	20
3.1.4. Samedi 22 juin 2024	25
3.2. Les observations hydrologiques	26
3.3. Les observations sismologiques	28
3.4. Résumé	30
4. Caractérisation de la crue du 21 juin 2024	31
4.1. Le transport solide	31
4.1.1. Bilan sédimentaire	31
4.1.2. Caractérisation de l'évènement	35
4.2. Les évolutions géomorphologiques	37
4.3. Résumé	40
5. Analyse de la situation météorologique et nivale	41
5.1. Les précipitations	41
5.1.1. Contexte météorologique avant l'évènement	41
5.1.2. Précipitations pendant l'évènement	41
5.2. La contribution nivale	44
5.2.1. L'enneigement du bassin versant avant l'évènement	44
5.2.2. La fonte nivale pendant l'évènement	46
5.3. Caractérisation de la lame d'eau totale	47
5.4. Résumé	48
6. Le glacier de Bonne Pierre	49
6.1. Description et évolution	49
6.2. Le lac supraglaciaire	52
6.3. Les observations de terrain	55
6.4. Résumé	60
7. Evaluation de la contribution glaciaire	61
7.1. Temporalité de la crue	61
7.2. Intensité de la crue	62
7.3. Contribution du glacier de Bonne Pierre	62
7.4. Résumé	63
8. Synthèse de la crue du 21 juin 2024 à la Bérarde	64
9. Vision prospective	65
9.1. La quantité de matériaux mobilisables	65
9.2. Le forçage météorologique et nivologique	69
9.3. Le glacier de Bonne Pierre	70
9.4. Scénario de référence	71
9.5. Les autres scénarios	71
9.6. Les crues courantes	71
10. Conclusion	72



1. Introduction

1.1. Contexte

Le hameau de la Bérarde, situé en Isère dans la vallée du Vénéon, a été fortement impacté par la crue du torrent des Etançons dans la nuit du 20 au 21 juin 2024. En parallèle de cet évènement majeur, une crue du Vénéon, et plus généralement des autres affluents de la vallée, a aussi été observée les 20 et 21 juin. La crue du Vénéon a impacté plusieurs enjeux en différents points de la vallée entre la Bérarde et la confluence avec la Romanche (route départementale, campings, gîte).

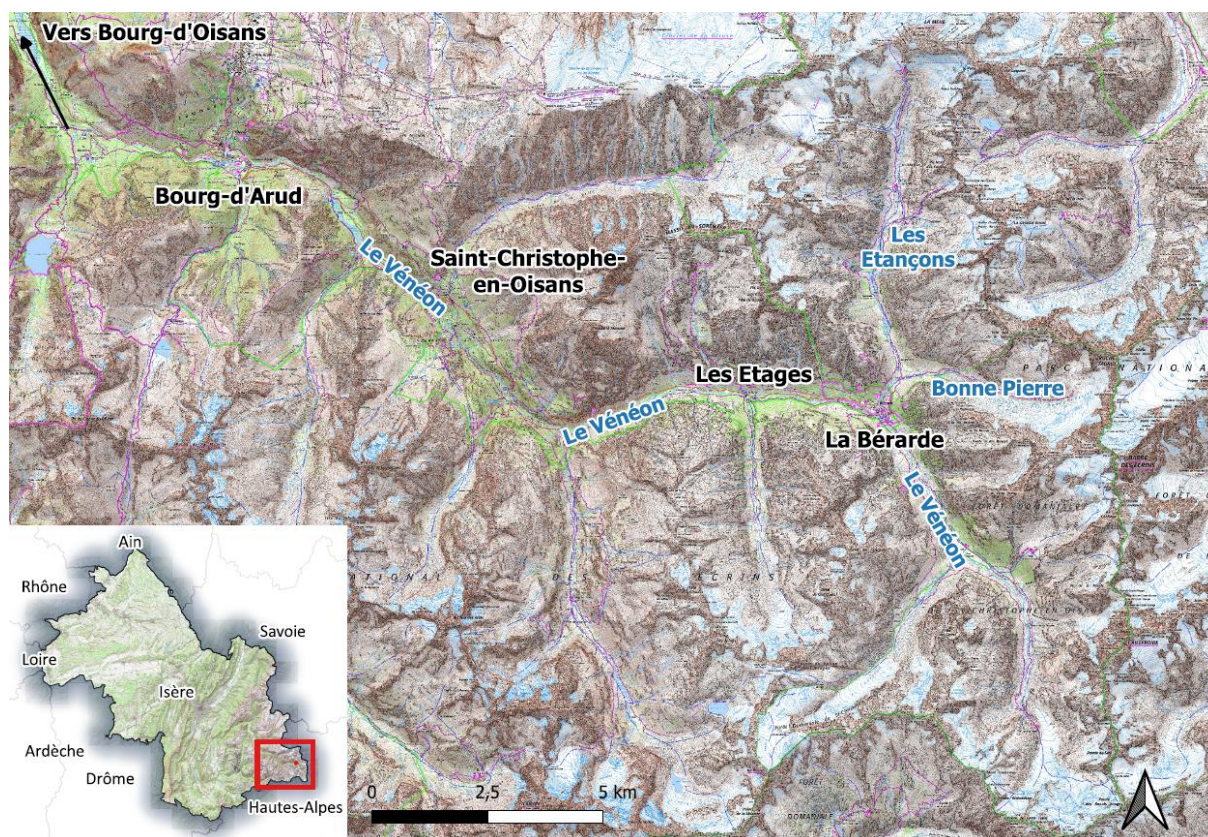


Figure 1: Vallée du Vénéon.

A la Bérarde, le torrent des Etançons a déposé une quantité importante de matériaux sur son cône de déjection puis s'est tracé un nouveau cheminement au cœur du hameau (photo de couverture du rapport prise le 22 juin 2024). Bien que l'évènement n'ait fait **aucune victime**, il a nécessité **l'évacuation de 114 personnes** par hélicoptère dans la matinée du 21 juin. Au total, **66 bâtiments ont été impactés**, dont 16 ont été détruits ou ensevelis. Les bâtiments situés en rive droite du torrent ont subi un engrèvement important, tandis que les bâtiments situés au cœur du hameau ont plutôt été concernés par les incisions liées à la proximité du nouveau tracé du torrent (Figure 2). Les voies de communication et les réseaux du hameau ont aussi été détruits.



Figure 2: Gauche : bâtiment complètement engravé par la crue, partiellement mis à jour (photo du 17 septembre 2024). Droite : chapelle et bâtiments partiellement détruits par les incisions du torrent des Etançons deux jours après l'évènement, le 23 juin 2024.

La période de fin juin 2024 est marquée par d'autres phénomènes naturels majeurs dans les Alpes. On note notamment les crues torrentielles dans le Val d'Aoste les 29 et 30 juin qui ont impacté plusieurs enjeux dans le Valnontey, les vallées de Cognes et de la Dora Baltéa (Figure 3). Ces crues sont liées à un épisode méditerranéen apportant des pluies très intenses (3 salves orageuses) sur un manteau neigeux plus important que la normale.



Figure 3: A gauche : érosion de berge sur le torrent de Grand Eyvia dans le Val de Cognes. A droite : débordements torrentiels dans le centre-ville de Breuil Cervinia (source : analisi dell'evento alluvionale del 29-30 giugno 2024 – protection civile centro funzionale regione autonoma valle d'Aosta).

Des crues ont aussi touché le Valais le 29 juin (en particulier Conches, la vallée de Binn, la Matterhal, la Saastak et la vallée et Rhône) et le Tessin (haut Val Maggia et ses vallées latérales). Elles sont liées à des précipitations orageuses (200 mm en 24h dans le haut Val Maggia selon OFEV) sur une couverture neigeuse abondante (printemps frais qui a retardé la fonte). Les crues ont été accompagnées également de glissements de terrain avec un lourd bilan humain (4 morts et 6 disparus).



Figure 4: Destruction du pont de la route cantonale à Cevio dans le haut Val Maggia (source : compte X Julien Guillaume).



Figure 5: Le village de Fontana, dans la vallée de la Maggia le 30/06/24 (source : France 3).

1.2. Cadre de travail

Le service de Restauration des Terrains de Montagne (RTM) de l'Isère a été missionné par la Direction Départementale des Territoires de l'Isère pour produire un rapport de rétro-analyse de la crue du torrent des Etançons. La lettre de mission signée le 28 août 2024 par le DDT précise les objectifs de ce travail :

- **Caractériser le phénomène et sa rareté** au regard de l'historique connu du torrent ;
- **Reconstituer la temporalité et les causes probables** de la crue ;
- Apporter une vision prospective sur l'aléa à la Bérarde en proposant **le nouveau scénario de référence**.

Les éléments de cadrage sont les suivants :

- La rétro-analyse traite exclusivement de la compréhension du phénomène physique. Aucun retour d'expérience sur la gestion de crise n'est inclus dans le rapport ;
- Le secteur d'analyse inclut uniquement le bassin versant du torrent des Etançons et le bassin versant de Bonne Pierre. Les autres secteurs de la vallée peuvent être abordés pour mieux comprendre la crue du torrent des Etançons, mais ne sont pas l'objet du rapport ;
- Le service RTM est libre de mobiliser des compétences auprès de ses partenaires scientifiques, et d'agréger les témoignages des acteurs du territoire ainsi que ceux de la chaîne de secours ;
- Le rapport est produit pour la fin du mois de novembre 2024. Une restitution publique est organisée à la suite du rendu.

Le présent rapport a donc été produit sur une période de 5 mois suivant l'évènement. D'un point de vue opérationnel, ce travail apporte des données d'entrée aux réflexions sur le réaménagement de la Bérarde.

D'un point de vue scientifique, le présent rapport n'a pas la prétention d'apporter une compréhension complète et définitive de l'évènement. Il servira de base aux travaux scientifiques qui s'intéresseront à l'évènement et au bassin versant du torrent des Etançons dans les années à venir.

1.3. Contributions

Ce travail, valorisé dans le présent rapport, a été piloté et produit par le service RTM de l'Isère. Néanmoins, **il est le fruit d'une collaboration forte avec la communauté scientifique française qui s'est largement mobilisée pour apporter des éléments de compréhension sur cet évènement majeur**. Plus de 30 scientifiques de différentes structures ont été associés de près ou de loin à ce travail multidisciplinaire croisant hydraulique torrentielle, géomorphologie, météorologie, nivologie, hydrologie et glaciologie. Trois réunions de travail ont regroupé le service RTM et les scientifiques mobilisés sur la rétro-analyse (01/10/2024, 28/10/2024, 29/11/2024). Ce travail collégial a permis d'aboutir à un consensus sur les causes probables de la crue et sur la vision prospective.

En parallèle, le service RTM s'est largement appuyé **sur les témoignages de la crue fournis par les acteurs du territoire et par la chaîne de secours**. Deux sessions de recueil de témoignages ont eu lieu à Saint-Christophe-en-Oisans (17/09/2024, 07/11/2024).

Dans un objectif de rendu opérationnel et de vulgarisation des travaux, deux livrables ont été produits :

- **Le présent rapport**, qui synthétise les contributions du RTM, des scientifiques, ainsi que les témoignages. Ce rapport se veut succinct et vulgarisé pour aboutir à une bonne appropriation de la compréhension du phénomène et de la vision prospective ;
- **Le rapport Annexe**, qui agrège les différents livrables du RTM, de la communauté scientifique, et de deux prestations engagées dans le cadre de la rétro-analyse (exploration sous-glaciaire et mesure radar sur le glacier de Bonne Pierre). Ce rapport est plus long et plus technique. Il peut être consulté pour des informations détaillées sur les analyses menées.

Le Tableau 1 donne un aperçu du contenu du rapport Annexe et des différentes contributions scientifiques. Les principaux éléments de ces contributions ont servi de matière première à la rédaction du présent rapport.

Partie	Contributeurs
Historique sur la Bérarde	Felix de Montety (LESSEM)
Hydraulique torrentielle	Clément Misset (ONF-RTM), Guillaume Piton (IGE), Dominique Laigle (IGE), Frederic Liebault (IGE), Guillaume Chambon (IGE), Alain Recking (IGE), Philippe Frey (IGE)
Evolutions géomorphologiques	Robin Mainieri (ONF-RTM), Yannick Robert (ONF-RTM), Johan Berthet (EDYTEM), Philipp Schoeneich (PACTE), Laurent Astrade (EDYTEM), Philip Deline (EDYTEM)
Météorologie	Denis Roy (Météo France CMAN)
Nivologie	Simon Filhol (Météo France-CNRS, CNRM/CEN), Marie Dumont (CNRM/CEN), Pascal Hagenmuller (CNRM/CEN), Simon Gascoin (Cesbio)
Hydrologie : contribution d'EDF	Emmanuel Paquet (EDF-DTG), Frederic Gottardi (EDF-DTG), Matthieu Le Lay (EDF-DTG)
Modèle GR4H	Guillaume Thirel (HYCAR)
Sismologie	Noélie Bontemps (ISTerre), Eric Larose (ISTerre), Mickael Langlais (ISTerre), Malgorzata Chmiel (Géoazur)
Glaciologie et nivologie sur le vallon et glacier de Bonne Pierre	Emmanuel Thibert (IGE), Diego Cusicanqui (ISTerre), Olivier Gagliardini (IGE), Pascal Lacroix (ISTerre), Etienne Berthier (LEGOS), Christian Vincent (IGE), Firmin Fontaine (IGE), Mylène Bonnefoy-Demongeot (IGE), Julien Brondex (IGE)
Suivi satellite du lac glaciaire	Fatima Karbou (CNRM/CEN), Guillaume James (LJK), Adrien Mauss (Météo France DIROP), Denis Roy (Météo France CMAN)
Exploration du glacier de Bonne Pierre	Prestation CORDATA

Tableau 1: Structure du rapport Annexe donnant un aperçu des contributions scientifiques à la rétro-analyse. Le producteur principal et/ou pilote de chaque partie est mis en évidence en gras.

1.4. Données de référence

Le présent travail s'appuie sur différents types de données :

- **Données topographiques** : modèle numérique de terrain (MNT) acquis le 28 juin 2024 dans la vallée du Vénéon et ses principaux affluents (Helimap), MNT des Etançons amont en 2023 (ONF-RTM), MNT de l'Isère en 2021 (IGN) ;
- **Données météorologiques** : précipitations et températures mesurées au droit des postes Météo France et EDF. Précipitations radar estimées par Météo France ;
- **Données nivologiques** : hauteur de neige à la station nivôse des Ecrins dans le vallon de Bonne Pierre (Météo France) ;
- **Données hydrologiques** : débit du Vénéon au hameau des Etages et au Pont Rouge à Bourg d'Oisans (EDF) ;
- **Données sismologiques** : trois stations de mesure dans le massif des Ecrins (ISTerre-CNRS) ;
- **Données glaciologiques** : mesures de bilan de masse et d'évolution du front pour des glaciers voisins du glacier de Bonne Pierre, mesure de la position d'un profil sur Bonne Pierre en 2024 (IGE-CNRS-INRAE) ;
- **Données satellites** : images Pléiades, SPOT, Sentinel, Planet (Pléiades © CNES, Distribution AIRBUS DS ; Météo France ; ISTerre ; LEGOS).

Les rapports scientifiques agrégés dans le rapport Annexe apportent plus de précisions sur les données utilisées. Ils font aussi référence aux publications scientifiques sur lesquelles s'appuient le travail.

2. La Bérarde et le torrent des Etançons

Nous décrivons dans cette partie le terrain d'étude et l'historique connu, avant de nous intéresser plus précisément à la crue du 21 juin dans les parties suivantes. La vision proposée dans cette partie n'a pas vocation à être exhaustive. Elle permet simplement de dresser le contexte dans lequel s'inscrit la crue du 21 juin.

2.1. Présentation du bassin versant des Etançons

Le bassin versant du torrent des Etançons se situe au cœur du massif des Ecrins, sur la commune de Saint-Christophe-en-Oisans en Isère (Figure 6). Le torrent des Etançons est **un affluent rive droite du Vénéon au niveau de la Bérarde**.

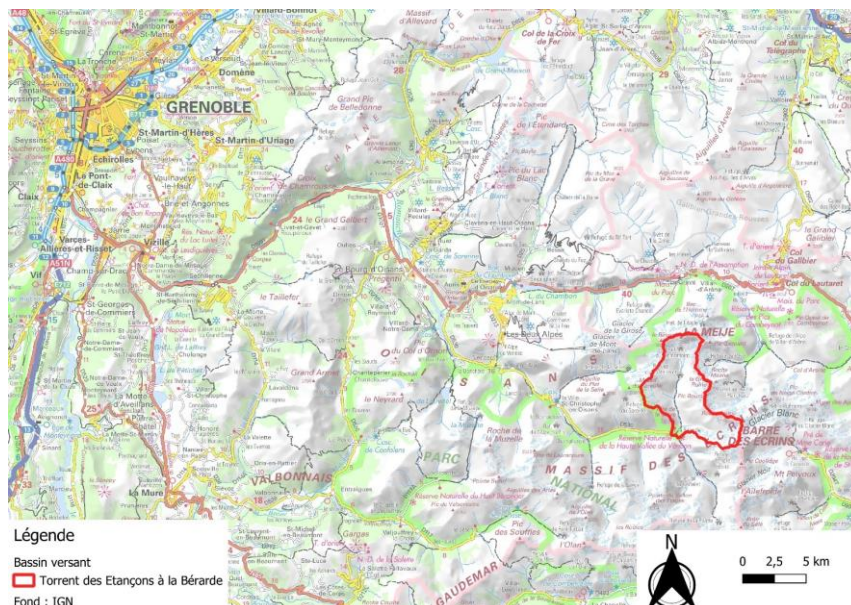


Figure 6: Localisation du bassin versant du torrent des Etançons.

Le bassin versant représente une surface de **34.4 km²**. Il est délimité par plusieurs sommets mythiques des Ecrins, tels que la Barre des Ecrins (4102 m), la Meije (3983 m), le Râteau (3809 m), ou Roche Faurio (3730 m). La confluence avec le Vénéon se situe à 1700 m d'altitude. La Figure 7 propose une vision générale du bassin versant.



Figure 7: Vue en 3 dimensions du bassin versant. Source : Google Earth.

Le bassin versant du torrent des Etançons est constitué de deux principaux sous bassins versants :

- Le bassin versant **du torrent des Etançons** alimenté par les versants sud de la Meije (ici appelé

bassin versant des Etançons amont) ;

- Le bassin versant **du torrent de Bonne Pierre** qui prend sa source au col des Ecrins et dans les versants sud de Roche Faurio.

Le torrent de Bonne Pierre est un affluent rive gauche du torrent des Etançons. Les torrents confluent 700 mètres en amont de la Bérarde, avant le secteur de gorge séparant le hameau du Plat des Etançons.

Le Tableau 2 présente les principales caractéristiques des bassins versants. Il met en avant les principales différences entre les deux sous-bassins : le bassin versant de Bonne Pierre est plus de 2.5 fois plus petit que le bassin versant des Etançons amont, mais possède une pente plus forte.

Bassin versant	Superficie (km ²)	Longueur cours d'eau (km)	Altitude minimale (m)	Altitude maximale (m)	Pente moyenne (%)	Orientation	Surface englacée (%)
Etançons amont	24,5	7	1830	3983	30	Sud	7,6
Bonne Pierre	9,1	1.8	1830	4015	45	Ouest	18,7
Etançons	34,4	8,1	1700	4015	28	Sud	10,3

Tableau 2: Caractéristiques des Bassins versant.

Etant donné les altitudes élevées du bassin versant, plusieurs formes géomorphologiques glaciaires et périglaciaires sont présentes. On compte ainsi plusieurs glaciers blancs et quelques glaciers rocheux dans le bassin versant des Etançons amont. Les glaciers blancs sont principalement situés dans le cirque sud de la Meije (Figure 8).

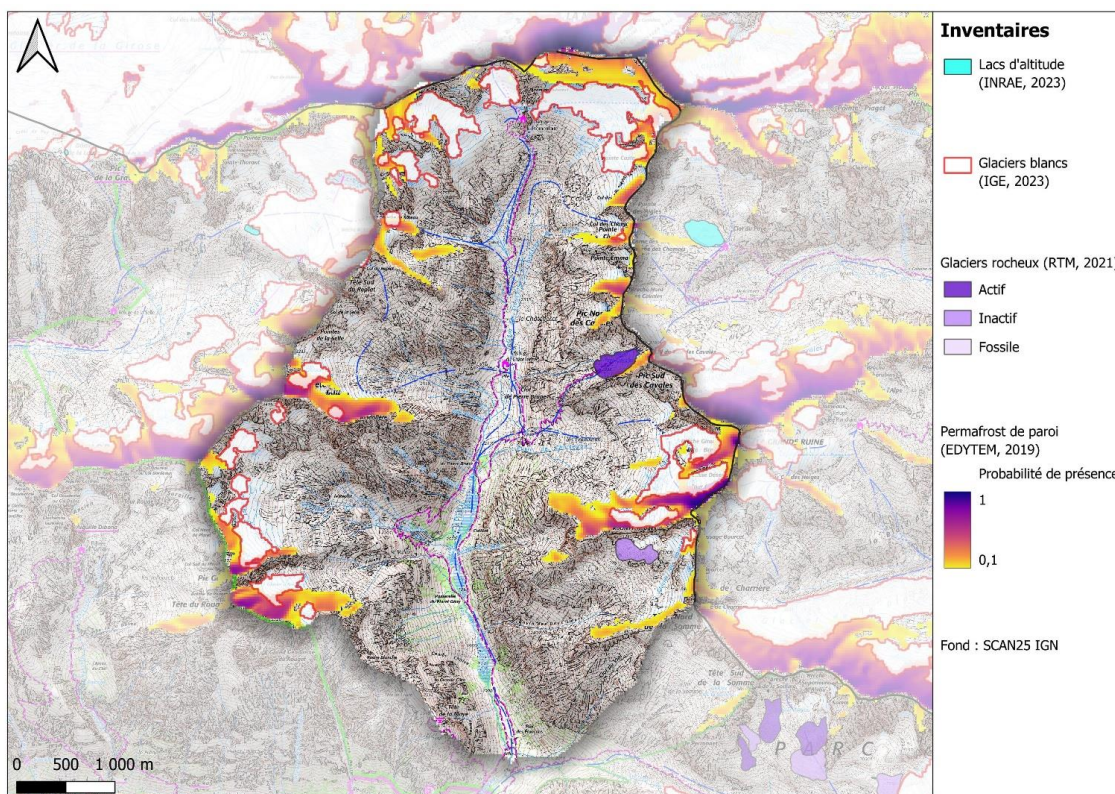


Figure 8: Inventaire des formes géomorphologiques glaciaires et périglaciaires du bassin versant des Etançons amont. Les sources des inventaires sont mentionnées dans la légende de la carte. Les inventaires ont été produits dans le cadre du plan d'action national sur les risques glaciaires (PAPROG) porté par le Ministère de la Transition Ecologique, de l'Energie, du Climat et de la Prévention des Risques.

Le bassin versant de Bonne Pierre compte lui un unique glacier, le glacier de Bonne Pierre. Plusieurs glaciers rocheux sont recensés en rive droite du vallon (Figure 9).

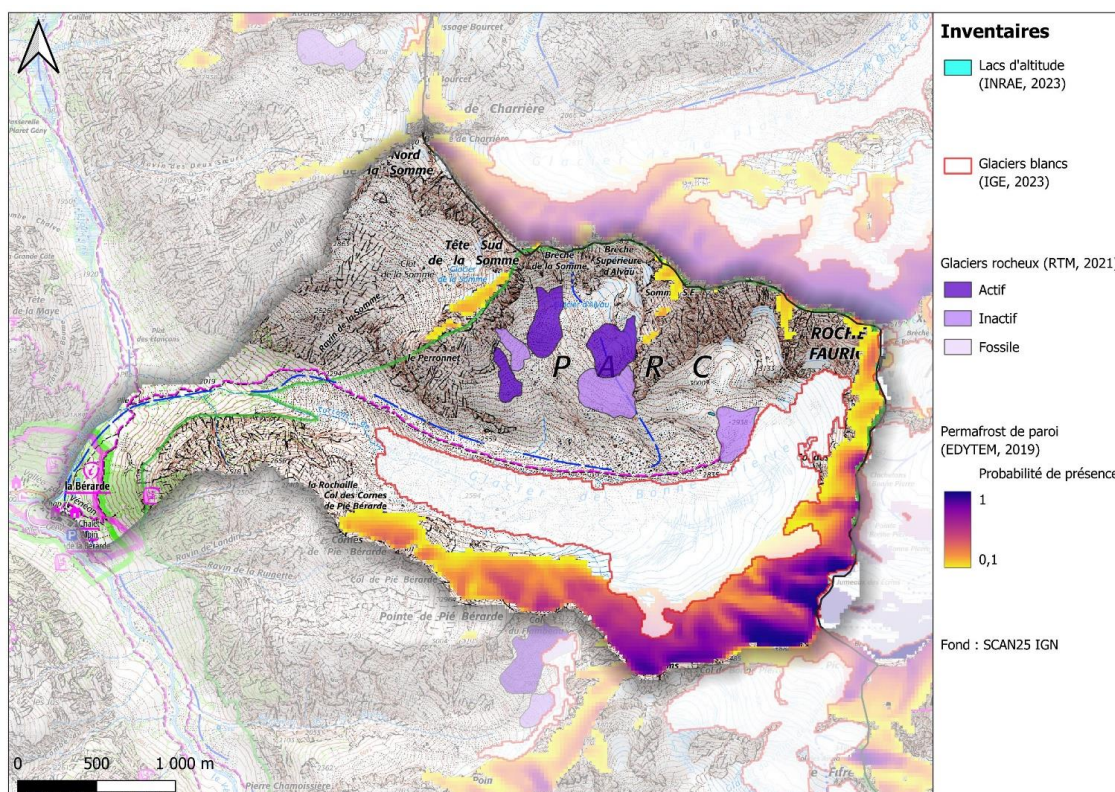


Figure 9: Inventaire des formes géomorphologiques glaciaires et périglaciaires du bassin versant de Bonne Pierre.

Il est à noter qu'en règle générale, la probabilité de présence de permafrost de paroi est forte dans les faces Nord du bassin versant. Cette donnée est issue d'une modélisation de la température de paroi (laboratoire EDYTEM, Cathala et al., 2019).

2.2. Historique sur la Bérarde

Les villages d'altitude de la Bérarde et des Étages ont constitué dès le Moyen-Âge des sites d'habitat humain groupé permanents, fonctionnellement distincts du bourg de la commune de Saint-Christophe-en-Oisans malgré une absence d'autonomie sur le plan administratif et religieux. La Bérarde et Les Étages sont recensés parmi les hameaux permanents de la commune de Saint-Christophe en 1339 (baptêmes et inhumations recensés y compris en plein hiver). Avant même le développement général des hameaux de la vallée du Vénéon au XIII^{ème} siècle, La Bérarde a connu une implantation antérieure, très certainement légèrement en aval de son site actuel (Figure 10).



Figure 10: Extrait de la Carte géométrique du Haut-Dauphiné et de la frontière ultérieure, dressée par Jean Villaret sous la direction de Pierre-Joseph de Bourcet, Feuille 3, Paris, 1758. Source : collection Felix de Montety.

Le hameau de la Bérarde n'est d'ailleurs pas le plus isolé ni le plus élevé des hameaux de la vallée : le Plat des Etançons et le Plan du Carrelet, situés à environ 1900 mètres d'altitude et ayant à leur maximum comporté respectivement plus de 5 et 10 maisons ou cabanes, ont facilité jusqu'à la période contemporaine l'accès aux ressources dans les vallons des Etançons et du Vénéon/Pilatte. L'implantation des maisons en cœur de hameau de la Bérarde n'a que très peu changé depuis 1830 et sans doute même depuis l'incendie ayant dévasté la quasi-intégralité du village en 1753 (Figure 11). Lors du recensement de 1911, la Bérarde compte encore 58 habitants permanents, issus de 9 ménages¹.



Figure 11: Extrait du Plan Cadastral de Saint-Christophe-en-Oisans, Archives Départementales de l'Isère, 4P4/304, 1829.

Marqués sur le temps long par les contraintes d'évènements extrêmes presque incessants (avalanches, chutes de pierres, pluies et crues, auxquels il faut ajouter les incendies et mauvaises récoltes) et de grands efforts pour maintenir un finage cultivable, en particulier sur le cône de déjection relativement fertile où est implanté La Bérarde, les deux hameaux de la Bérarde et des Etages se présentent dans les archives communales sous l'angle de leur histoire de lutte pour la survie et de leur confrontation à l'omniprésence des risques et de la mort jusqu'à l'époque contemporaine.

Du Moyen-Âge à l'âge d'or de l'alpinisme, les crues régulières du Vénéon et du torrent des Etançons ont contraint les habitants du Haut-Vénéon à souffrir de la faim et de la misère, à dépierrer leurs champs et reconstruire leurs ouvrages.

2.3. Historique des crues

Nous présentons dans le Tableau 3 les principales crues du torrent des Etançons ou du Vénéon recensées dans la base de données RTM.

Date	Description
03/08/1785	<u>Nature</u> : Crue torrentielle du Vénéon. 11 passerelles, 1 bâtiment, 3 ha de terres, 4 ha de prés et 2 ha de pré-bois emportés.
23/08/1877	<u>Nature</u> : Crue subite du torrent des Etançons menaçant fortement le hameau de la Bérarde, au pied du massif du Pelvoux. Dès que les eaux se sont reposées, une plage de gravier a partout remplacé les terrains détruits
03/09/1956	<u>Nature</u> : Crue torrentielle du torrent des Etançons. Une digue a été détruite, un pont emporté, la RD530 a été coupée et le village a été menacé. <u>Zone de départ</u> : Glacier des Etançons. <u>Zone d'arrivée</u> : Le Vénéon.
06/1957	<u>Nature</u> : Crue torrentielle du torrent des Etançons. <u>Zone d'arrivée</u> : Pont (a priori à la Bérarde).
29/08/2006	<u>Nature</u> : Crue torrentielle du torrent des Etançons et, à un degré moindre, du Vénéon, suite à des pluies très fortes non orageuses sur le haut bassin de réception des Etançons ; ravinements très importants sur les moraines en amont du Plat des Etançons ; passerelles emportées ; charriage très important, dont une

¹ Archives Départementales de l'Isère, 4E668107

	<p>partie descendue jusqu'à la confluence et évacuée par le Vénéon. Des dépôts en aval du pont de la Bérarde ont provoqué un rehaussement du lit et la destruction en rive droite, à hauteur du Champ du Pin, d'un merlon constitué de matériaux de curage ; probablement lors de la divagation des écoulements en décrue. A noter que ce merlon a été légèrement submergé immédiatement en aval du pont rive droite. En amont du pont, berge rive gauche sapée, non détruite.</p> <p><u>Zone de départ</u> : Moraines bassin supérieur des Etançons</p> <p><u>Zone d'arrivée</u> : Vénéon confluence</p> <p><u>Mesures d'urgence</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> - curage du lit sur 50 m environ pour déporter les petites crues en rive gauche et reconstitution du cordon de matériaux en rive droite à hauteur du Champ du Pin ; - pétardage d'un gros bloc qui provoque des atterrissements à cet endroit et crée des perturbations dans l'écoulement des crues. Si possible, ramener les blocs issus du pétardage en protection de berge.
05/08/2022	<p><u>Nature</u> : Lave torrentielle en tête de bassin suite à un orage localisé.</p> <p><u>Zone de départ</u> : Une première lave torrentielle descend les dalles sous la brèche de la Meije (il n'y a plus de neige sous la brèche.) Ensuite, une entaille profonde se crée en rive droite, dans les dépôts à droite de la moraine sur un linéaire de 900 m et 300m de dénivelé (entre les altitudes 2500 et 2800m). Profondeur estimée à 5m. Les écoulements ont profondément entaillé le névé descendant de la brèche du Râteau.</p> <p><u>Zone d'arrivée</u> : Dépôts de laves torrentielles sur le replat sous le refuge du Châtelleret vers 2100m d'altitude. Volume estimé > 10 000 m³. Le gros des volumes a transité en rive gauche au niveau du refuge. De petits écoulements liquides se sont approchés du mur rive gauche du Refuge. Traces de débordements liquides dans le système en tresse dans le replat situé à 2 000 m d'altitude. 2 passerelles d'accès au refuge du Châtelleret ont été emportées. Il n'y a pas de dégât à l'aval.</p>
29/07/2023	<p><u>Nature</u> : Crue torrentielle dans le haut bassin des Etançons ayant impacté le refuge du Châtelleret. Le volume de matériaux estimé visuellement est > 50 000m³.</p> <p><u>Zone de départ</u> : Rive droite de la grande moraine des Etançons, dans le même chenal que celui emprunté lors de la crue de l'été 2022. En rive droite, de petites arrivées d'eau sous la surface de la moraine sont visibles et ont provoquées ou agrandis des loupes d'érosion. Par comparaison des photos 2022/2023, l'ablation de matériaux paraît conséquente sur les 900 m du chenal et estimée à plusieurs dizaines de milliers de m³. Pas de modification apparente du versant au droit du refuge du Promontoire. Le pied de la brèche de la Meije est plus enneigé que l'année dernière.</p> <p><u>Zone d'arrivée</u> : Dépôt de lave "granulaire" jusqu'au départ du sentier du Pic Gény (altitude 2 000m). Les plus gros blocs transportés sont de taille métrique. Altitude 1980m. Dépôts boueux jusqu'au Plat des Etançons. Altitude 1900m. La majorité des dépôts est concentrée entre le pied de la moraine et le replat à l'aval du refuge du Châtelleret (altitude 2100m). Un seuil naturel s'est formé à hauteur du refuge en rive droite. Au droit du refuge du Châtelleret, le transit des matériaux et des écoulements s'est concentré dans le chenal en rive droite. Ils sont venus lécher la façade ouest de celui-ci. A cet endroit, un petit enrochement protégeant un stockage de bouteilles de gaz ainsi que le groupe électrogène est détruit, et ce qu'il abritait est emporté. Des bouteilles de gaz sont retrouvées plusieurs centaines de mètre plus à l'aval. Une cuve d'assainissement enterrée au même endroit est endommagée. Sur la rive gauche, le chenal surcreusé en 2022 ne montre pas de modification. Seuls des écoulements boueux y ont transité. A noter des écoulements boueux à travers l'amas de gros blocs au nord du refuge se poursuivant jusqu'à celui-ci. Des écoulements boueux ont pénétré dans le bâtiment par une porte latérale en façade ouest, causant des dommages aux installations. Le réseau d'adduction d'eau est partiellement détruit.</p>

Tableau 3: Crues torrentielles du torrent des Etançons selon la BDRTM

La crue du Vénéon des 3 et 4 août 1785 est connue surtout grâce à un document conservé aujourd'hui aux Archives Départementales de l'Isère et rapportant aux autorités la synthèse de l'assemblée communale du 14 août 1785. Le paragraphe fondamental de ce compte-rendu est le suivant : « *Pendant le trois et le quatre du present mois il a fait des pluyes si abondantes et continuelles avec un vent chaud et impetueux que la riviere de veneon venant des glaciers de la berarde hameau de cette comte tant par labondance des pluyes que par la fonte precipitée des glaciers a tellement ete enflée et grossie quelle a emporte a plusieurs habitants dudit lieu de la berarde et des etages quantité de fonds recoltes onze passerelles ce qui rend nombre des habitants a la dernière misère* »². Ce seraient 75 à 90

² Archives Départementales de l'Isère, 4E668/9

personnes qui auraient alors perdu leurs récoltes et leurs moyens de subsistance en cette fin d'été, avant un hiver 1785-1786 particulièrement long et rigoureux. Néanmoins les archives confirment qu'aucun habitant de la commune n'est directement victime de cette grande crue³, ni qu'aucune maison n'est détruite.

La crue d'août 1877 semble avoir été moins destructrice et n'a pas non plus fait de victime humaine, mais elle a détérioré une habitation, le chalet Rodier, et déposé des matériaux sur une grande partie de la partie nord-ouest du cône. Des travaux d'aménagement ont été entrepris suite à la crue.

Deux photographies permettent d'avoir une vision du secteur de la Bérarde à la fin du XIX^e siècle :

- Figure 12 : **la Bérarde en 1890**. Le lit du torrent des Etançons est relativement haut et large et la levée de terre construite en rive gauche est visible ;
- Figure 13 : **la Bérarde à la fin du XIX^e siècle** : au premier plan le torrent des Etançons, en arrière-plan le Vénéon.

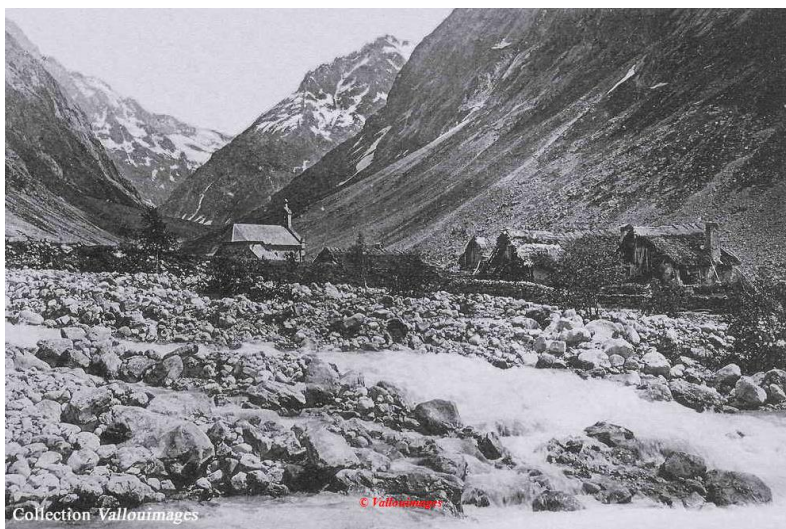


Figure 12: La Bérarde en 1890. Source : Vallouimages.



Figure 13: La Bérarde à la fin du XIX^e siècle. Source : Fond Charpenay.

En 1888, la vallée subit une nouvelle crue du Vénéon, moins grave toutefois que la précédente.

La crue du torrent des Etançons en **septembre 1956** a atteint le hameau de la Bérarde et a détruit notamment une digue de protection. Le torrent se serait dangereusement rapproché du nord du hameau. Le pont de la route nationale aurait été contourné. Des travaux de protection ont été déclenchés suite à cette crue : mise en place d'épis et création d'une deuxième arche sous le pont.

Les photographies suivantes ont été prises en mai 1957 soit entre les deux crues des années 50. On peut y voir les dépôts dans le lit des Etançons mais aussi la ruine de l'ouvrage de protection. La

³ Saint-Christophe-en-Oisans. Baptêmes, mariages, sépultures. Coll. Communale (1773-1792), p.66 (août 1785), Archives Départementales de l'Isère (Documents numérisés), 9NUM/AC375/5

photographie aérienne de 1960 montre bien l'emprise du torrent des Etançons à la Bérarde suite aux crues de 1956 et 1957.

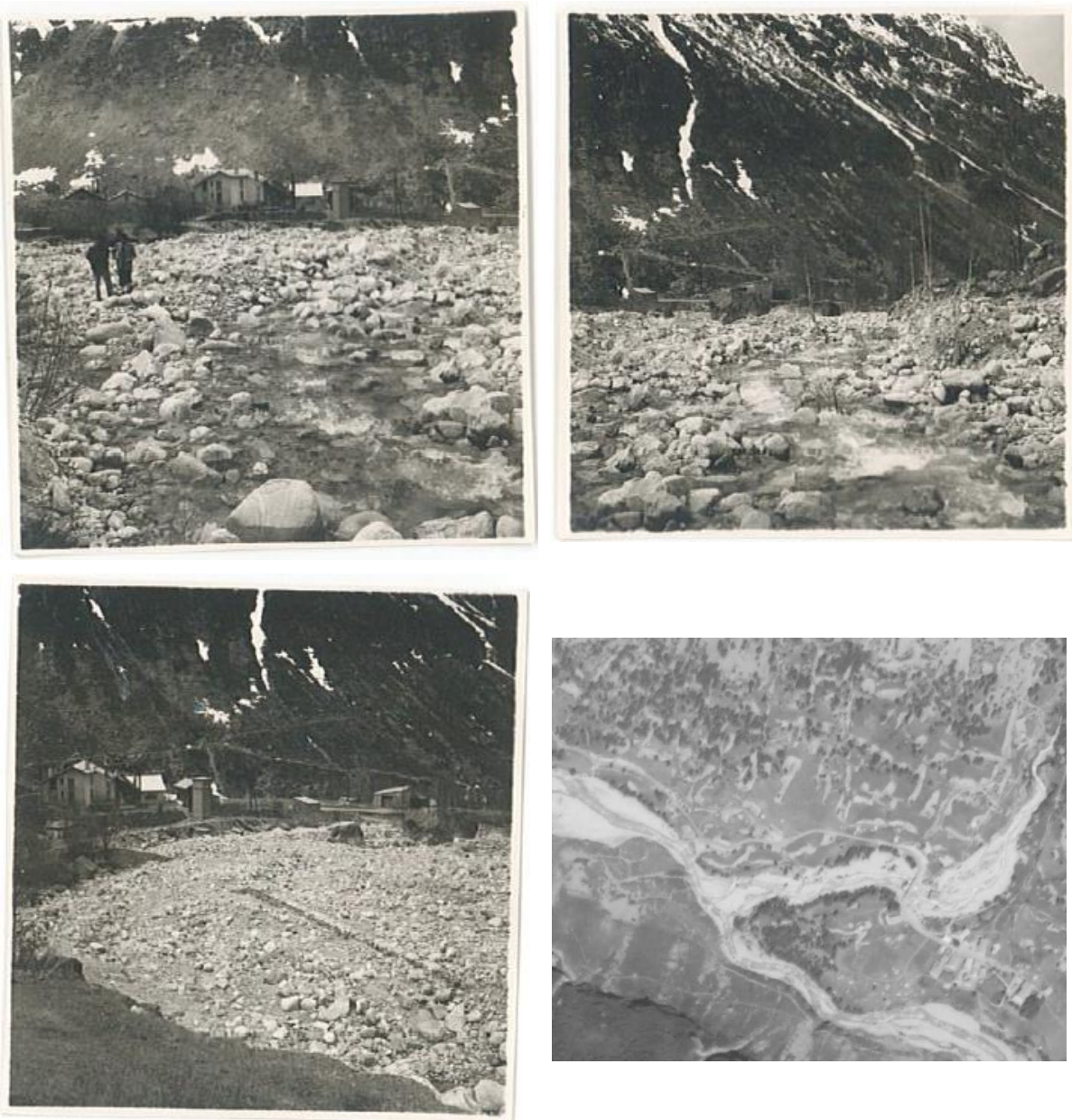


Figure 14: Photographies de la Bérarde en mai 1957 (source : RTM) et photographie aérienne de 1960 (source : IGN).

La crue **d'août 2006** a occasionné des dépôts autour du pont de la Bérarde ayant causé des dégâts sur les ouvrages de protection (des travaux d'urgence ont été effectués après la crue). Néanmoins, aucune habitation n'a été impactée. La plupart des matériaux charriés par le torrent depuis les Etançons amont ont transité jusqu'au Vénéon où ils ont été repris par la rivière (Figure 15).



Figure 15: Plat des Etançons à gauche et confluence Etançons-Vénéon à droite après la crue. Source : RTM.

Les crues de **l'été 2022 et 2023** sont très bien documentées et concernent particulièrement le secteur du refuge du Chatelleret. Un orage violent en 2022 a entaillé la moraine des Etançons, qui permet désormais la concentration des écoulements et la production de laves torrentielles de volumes de plusieurs dizaines de milliers de mètres cubes. Le refuge du Chatelleret a été impacté par une lave en 2023 (Figure 16). L'incision marquée de la moraine s'est poursuivie en 2024.



Figure 16: Moraine des Etançons incisée et refuge du Chatelleret impacté après la lave torrentielle du 29 juillet 2023. Source : RTM.

Au final, nous pouvons donc noter que :

- Aucune crue de l'historique connu (relativement récent) **ne semble d'intensité comparable** à celle observée le 21 juin. Depuis l'établissement et la conservation dans la commune de documents d'archives précis à partir du XVII^e siècle, il ne semble pas que les crues régulières du Vénéon et du torrent des Etançons aient jamais fait de victimes humaines ni modifié de façon aussi décisive le site de la Bérarde que la crue de juin 2024 ;
- Les crues du torrent des Etançons **sont principalement observées en fin d'été et en début d'automne**, au même titre que les crues du Vénéon. Cette période est favorable à des précipitations liquides jusqu'à haute altitude. Au-delà des orages localisés principalement observés en été (crues de 2022 et 2023), cette période est aussi propice aux précipitations Méditerranéennes venant impacter le bassin versant du Vénéon au sens large dans des flux de sud-ouest à sud ;
- Peu de crues du torrent des Etançons sont imputées au torrent de Bonne Pierre. **L'historique des crues sur le torrent de Bonne Pierre est donc pauvre.**

Au terme de cette introduction permettant de situer le torrent des Etançons dans l'espace et dans le temps, nous nous concentrons sur l'évènement du 21 juin 2024. Le présent rapport s'articule autour de 3 grands axes :

- **Caractérisation de la crue du 21 juin** : déroulé de la crue, caractérisation de la rareté du phénomène ;
- **Analyse des causes probables** : analyse météorologique et nivologique, contribution du glacier de Bonne Pierre ;
- **Vision prospective** : scénario de référence de la crue du torrent des Etançons.

3. Déroulé de la crue du 21 juin 2024

Dans cette partie, nous nous basons sur trois sources d'informations permettant d'approcher le déroulé de la crue :

- **Les témoignages** des personnes ayant vécu la crue ;
- **Les observations de débit du Vénéon et de la Romanche** en aval de la Bérarde ;
- **Les observations sismologiques** dans le massif des Ecrins.

Les observations hydrologiques et sismologiques sont généralement traduites en heure universelle (UTC). Certains graphiques de ce rapport sont donc présentés dans ce référentiel. Néanmoins, toutes les interprétations effectuées dans le texte sont traduites en heure locale pour bien faire correspondre les témoignages et les données mesurées (heure locale = heure UTC + 2 en été).

Enfin, le niveau de précision associé au déroulé de la crue et plus généralement à la reconstitution du phénomène sont donc à considérer avec un certain recul (incertitudes sur les données mesurées, sur les heures exactes des débordements et dépôts).

3.1. Les témoignages

Des témoignages ont été recueillis le 17/09/2024 et le 07/11/2024 auprès de différents acteurs du territoire :

- Commune de Saint-Christophe-en-Oisans ;
- Secouristes du PGHM, Sécurité Civile et CRS ;
- Bureau des Guides de la Bérarde ;
- Habitants de la Bérarde ;
- Chalet Alpin de la Bérarde ;
- Auberge de la Meije ;
- Gardiennes des refuges de Temple Ecrins et du Carrelet.

Ces témoignages se traduisent par des récits de l'évènement et par des photos/vidéos.

Nous proposons ci-dessous une rapide description de la période pré-évènement, suivi du déroulé plus précis des journées du 20 et du 21 juin 2024.

3.1.1. Fin mai/début juin

Au cours de cette période précédant l'évènement, le niveau du Vénéon est haut uniquement sous l'effet des débits de fonte (témoignages des gardiennes des refuges Temple Ecrins et du Carrelet). De l'expérience des témoins, le Vénéon n'avait jamais été aussi haut sans précipitations. La quantité de neige en haute-montagne est très importante, et un épisode de pluie sur neige est redouté. Plus bas dans la vallée, les débits de fonte élevés permettent le charriage de matériaux et une réhausse du niveau du fond du lit est observée sur le secteur de Plan du Lac.

Le contexte avant évènement se traduit donc par des débits du Vénéon déjà forts en lien avec la fonte nivale uniquement.

3.1.2. Jeudi 20 juin 2024

La journée du jeudi 20 juin 2024 est associée au début de la crue du Vénéon, avec l'arrivée des précipitations dans la nuit du 19 au 20 juin.

Le Vénéon

Trois secteurs sont impactés par la montée des eaux du Vénéon le 20 juin (Figure 17) :

- Plan du Lac, entre Bourg d'Arud et Saint-Christophe ;
- Le hameau des Etages ;
- Le parking de la Bérarde.



Figure 17: Secteurs impactés le 20 juin 2024. Le sens des écoulements est représenté par les flèches.

Nous résumons la temporalité de la crue du Vénéon issue des témoignages dans le Tableau 4.

Heure	Secteur	Observations
7h	Plan du Lac	Le Vénéon réagit rapidement aux précipitations de la nuit du 19 au 20 juin et est déjà haut le jeudi 20 au matin. A 7h, l'ancienne base nautique des Fontaines Bénites à Plan du Lac est inondée avec un courant soutenu.
11h	Plan du Lac	A 11h, la limite des premiers débordements est atteinte à Plan du Lac et la RD530 est fermée à 11h15.
Après-midi	Plan du Lac	Les débordements du Vénéon concernent plusieurs portions importantes de la RD530.
16h	Les Etages	Les premiers écoulements du Vénéon atteignent le tablier du Pont des Etages.
17h30	Les Etages	Les premiers débordements sont observés en rive droite du Vénéon.
19h	La Bérarde	Les premiers débordements sont observés au parking de la Bérarde.
19h30	Les Etages	Le Pont des Etages est en charge et les débordements atteignent les premières maisons en rive droite.

Tableau 4: Déroulé de la crue du Vénéon le jeudi 20 juin 2024 selon les témoignages.

La Figure 18 illustre la montée du Vénéon à Plan du Lac.



Figure 18: Le Vénéon en différents points de Plan du Lac à 10h45 (gauche), 11h (centre), et 15h25 (droite). Source : PGHM.

La Figure 19 illustre la montée du Vénéon au hameau des Etages.



Figure 19: Le Vénéon aux Etages à 16h09 (en haut à gauche), 17h57 (en haut à droite), et 19h30 (en bas). Source : Commune de Saint-Christophe et Bureau des Guides de la Bérarde.

Le torrent des Etançons

Deux photos du torrent des Etançons prises dans l'après-midi du 20 juin montrent que le torrent est en crue (Figure 20). Cependant, le débit ne paraît pas exceptionnel et le torrent n'a pas occasionné de débordements dans la journée du 20 juin.



Figure 20: Torrent des Etançons depuis le pont de la Bérarde le 20 juin à 16h22. Vue vers l'amont (gauche) et l'aval (droite). Source : Bureau des Guides de la Bérarde.

En fin de journée, aux alentours de 23h, le torrent des Etançons est décrit comme **vraiment impressionnant et menaçant**.

Résumé du jeudi 20 juin 2024

En résumé :

- Le Vénéon est haut **dès le jeudi matin** suite aux précipitations de la nuit. Les débits de fonte seuls avant précipitations sont décrits comme élevés au cours du mois précédent ;
- Les premiers débordements à Plan du Lac sont observés **en fin de matinée** ;
- Les premiers débordements au hameau des étages sont observés **en fin d'après-midi** ;
- Les premiers débordements au parking de la Bérarde sont observés **en fin de journée** ;
- Le torrent des Etançons est en crue sans que celle-ci soit **exceptionnelle** en fin d'après-midi. **Il est décrit comme impressionnant et menaçant vers 23h.**

3.1.3. Vendredi 21 juin 2024

La nuit du 20 au 21 juin est marquée par la crue d'ampleur du torrent des Etançons. La matinée du 21 juin est marquée par le pic de crue du Vénéon et des autres affluents de la vallée.

Le torrent des Etançons

Nous résumons les témoignages recueillis sur la crue du torrent des Etançons à la Bérarde dans le Tableau 5. Nous attirons l'attention sur le fait que cette temporalité a été recalée à partir des témoignages et des photos, mais que les horaires exacts des débordements et dépôts ne sont pas connus.

Heure	Observations
0h15	Premiers débordements recensés au niveau du Champ du Pin, en rive droite du torrent. Les écoulements auraient emprunté la route avant de ruisseler vers le bâtiment.
1h15	Débordements en rive gauche du torrent, en amont du hameau. Les écoulements auraient surversé sur l'ouvrage de protection torrentielle en rive gauche. Les écoulements contournent en partie le gros bloc rive gauche en amont du pont ainsi que le pont.
2h10	Le torrent a débouché l'arche rive gauche du pont de la Bérarde, qui était partiellement remplie de matériaux depuis plusieurs années. Les écoulements semblent de nouveau s'écouler dans le chenal (plus d'écoulements en rive gauche du pont).
3h15	Le torrent saute en rive droite probablement en raison d'un embâcle au niveau des gros blocs en amont du pont, et des premiers dépôts importants de matériaux sont observés au niveau des WC (plusieurs mètres d'épaisseur). Des voitures situées sur le parking en rive droite du pont sont emportées.
4h-4h40	Les premiers écoulements atteignent la partie nord-ouest du village (secteur crêperie). Ils restent essentiellement liquides au cœur du village (pas de dépôt).
6h-7h30	Une grande moitié rive droite du cône de déjection est engravé par les

	dépôts du torrent des Etançons. Cependant les écoulements sont encore concentrés sur cette partie rive droite, et aucun écoulement n'est observé en rive gauche de la chapelle.
7h40	Les premiers écoulements atteignent la rive gauche de la chapelle et ainsi la partie sud-est du village (secteur Auberge de la Meije, Chalet Alpin).
8h30	Plusieurs branches d'écoulement entourent encore le centre Bourg. En rive droite, les écoulements se répartissent dans les dépôts. En rive gauche de la chapelle, ils continuent sous forme liquide jusqu'à la route et aux bâtiments.
9h-10h	Les écoulements sont encore répartis en plusieurs branches, mais les débits de la branche en rive gauche de la chapelle semblent augmenter. Pour autant, les écoulements restent principalement liquides sur ce secteur.
10h-12h	Peu d'évolution : les écoulements se répartissent sur le cône et l'extrémité sud-est du village continue d'être touchée par des écoulements principalement liquides.
14h	Le camping de la Bérarde est partiellement engravé

Tableau 5: Déroulé de la crue du torrent des Etançons le 21 juin 2024 selon les témoignages.

La Figure 21 illustre l'intensité des débits, les premières perturbations ainsi que les premiers dépôts massifs de matériaux en rive droite du pont de la Bérarde.



Figure 21: Torrent des Etançons au niveau du pont de la Bérarde depuis la rive gauche à 2h10 (gauche), 3h15 (centre) et 3h20 (droite). Sources : PGHM et commune de Saint-Christophe-en-Oisans.

La Figure 22 illustre les écoulements liquides dans le centre du village au lever du jour, tandis que le secteur situé en rive gauche de la chapelle n'est pas encore concerné.



Figure 22: Gauche : Ecoulements dans le centre du village à 6h12 (source : PGHM). Droite : Aucun écoulement à la chapelle à 6h33 (source : PGHM).

La Figure 23 illustre l'arrivée des écoulements dans la partie sud-est du village après le basculement d'une partie des écoulements en rive gauche de la chapelle vers 7h30.



Figure 23: Gauche : écoulements sur la route le long du bâtiment de l'Auberge de la Meije et du poste de secours, à 8h11 (source : PGHM). Droite : vue globale des écoulements en rive droite et rive gauche de la chapelle, à 8h29 (source : PGHM).

Enfin, la Figure 24 illustre l'intensification des débits dans le secteur sud-est du village grâce à une vue par hélicoptère à 10h.



Figure 24: Vue sur la partie sud-est du village à 10h03 (source : Sécurité Civile) et à 10h04 (source : Chalet Alpin de la Bérarde).

Les écoulements liquides se répartissent sur l'ensemble du village à 10h30, autant en rive gauche qu'en rive droite de la chapelle (Figure 25).



Figure 25: Village à 10h29 (source : Sécurité Civile).

Nous tentons de valoriser ces témoignages et photos/vidéos dans une cartographie simplifiée du déroulé de la crue (Figure 26). Une fois de plus, les limites exactes des emprises des dépôts et des écoulements sont à prendre avec précaution. Néanmoins, cette représentation met bien en évidence les premiers débordements puis dépôts au nord du hameau en rive droite, avant une progression des écoulements vers la rive gauche et le cœur du village.

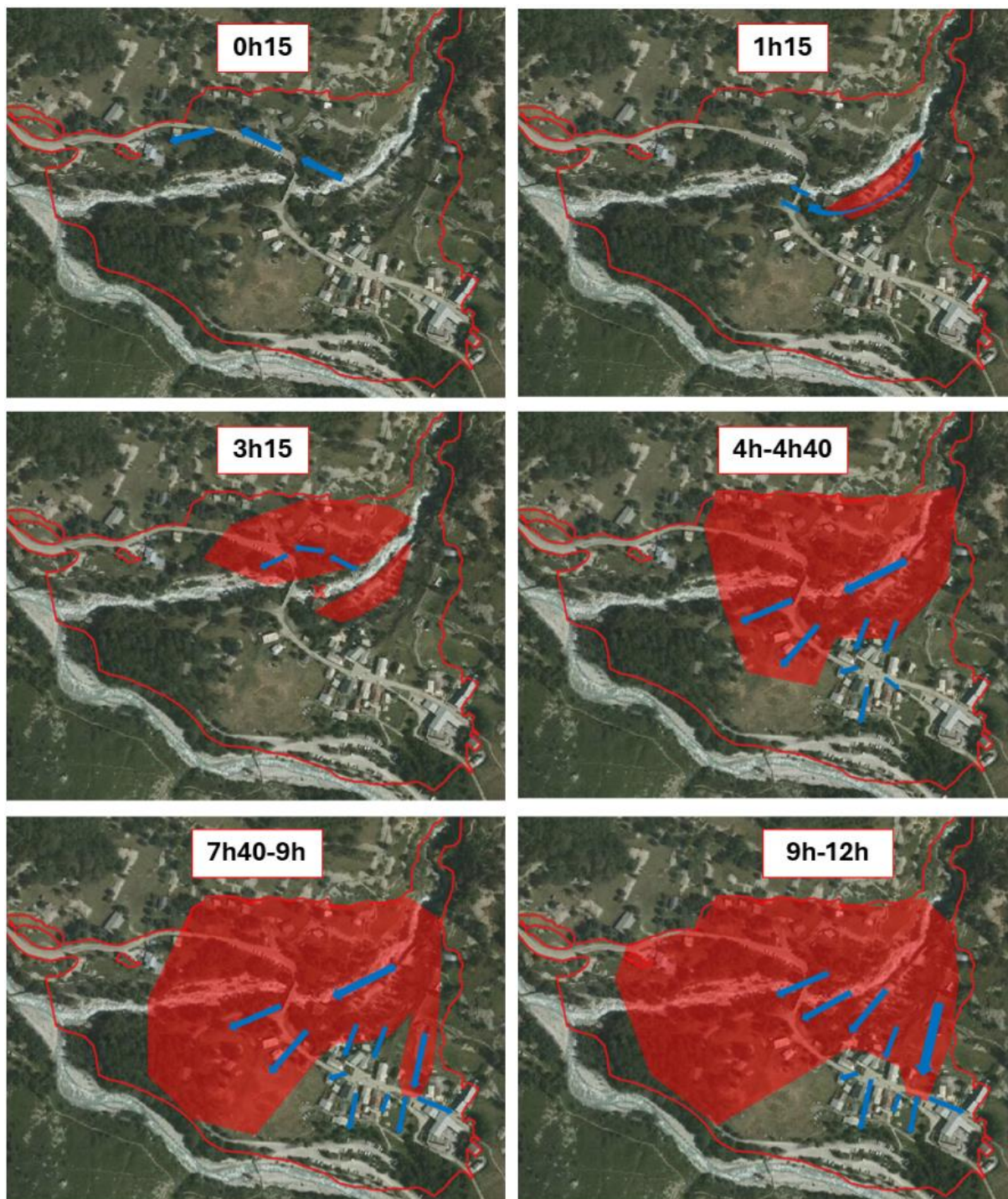


Figure 26: Vision cartographiée du déroulé de la crue selon les témoignages. Les principaux écoulements sont représentés par les flèches bleues. Les principaux dépôts sont représentés par les zones rouges. Le contour rouge délimite l'emprise globale des dépôts après la crue. Le fond cartographique est l'orthophotographie 2021 de l'IGN.

Le Vénéon et les autres torrents sur le secteur de la Bérarde

Peu d'informations sont disponibles sur les autres secteurs de la vallée pour la journée du 21 juin. Les quelques éléments recueillis sont les suivants :

- Le débit du Vénéon est élevé le matin du 21 juin, et il semble continuer d'augmenter vers 8h en amont de la Bérarde ;
- Tous les torrents de la vallée ont une activité soutenue le vendredi 21 au matin ;
- A la surprise des services de secours, la Drop Zone située en amont du parking est utilisable pour les évacuations hélicoptérées (Figure 27).

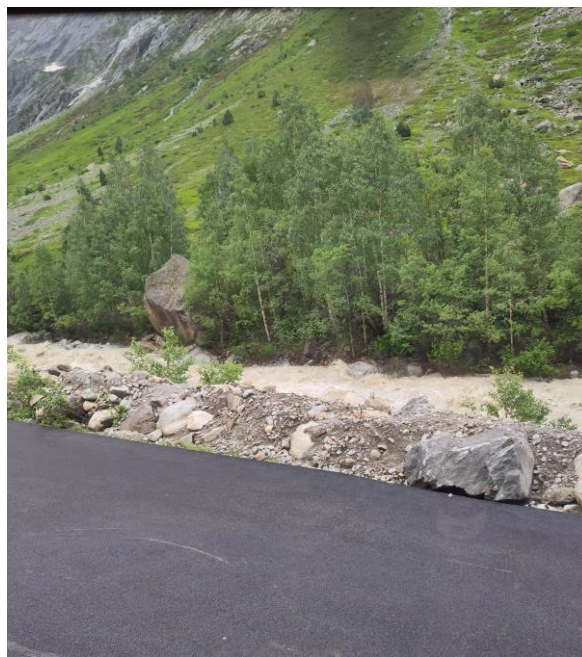


Figure 27: Gauche: Arrivée du Vénéon dans la plaine de Bourg d'Oisans et confluence avec la Romanche à 9h45 (source : Sécurité Civile). Droite : DZ de la Bérarde en rive droite du Vénéon à 11h26 (source : Bureau des Guides de la Bérarde).

Résumé du vendredi 21 juin 2024

Pour résumer :

- **Les forts débits du torrent des Etançons sont observés entre le 20 juin 23h et le 21 juin 12h** (heure de l'évacuation) ;
- L'analyse des photos/vidéos montre que **la plupart des dépôts de matériaux se sont effectués entre 0h et 8h** (écoulements essentiellement liquides lors du basculement en rive gauche de la chapelle) ;
- Les dépôts ont dans un premier temps concerné **la rive droite du torrent**, avant des divagations progressives vers la rive gauche du cône de déjection. Le camping de la Bérarde semble avoir été impacté après le village ;
- Les témoignages indiquent l'observation de vagues (apparition et retrait rapide des écoulements), probablement liées **aux divagations des écoulements au gré des dépôts**, qui donnent de brusques variations locales de débit. Aucune véritable « vague » n'a été observée en sortie des gorges ;
- Le Vénéon et les autres torrents de la vallée ont un débit élevé en matinée du 21 juin.

3.1.4. Samedi 22 juin 2024

Le 22 juin, la totalité du débit du torrent des Etançons s'écoule **dans un nouveau lit en rive gauche du cône de déjection, au cœur du village**. Plusieurs bâtiments ont été déstabilisés par affouillement de leur fondation suite aux incisions du torrent pendant la phase de décrue (Figure 28). Le surcreusement du lit s'est poursuivi les jours et semaines suivantes.



Figure 28: La Bérarde le 22 juin 2024 dans la matinée (gauche, source : RTM) et à 14h12 (droite, source : Sécurité Civile).

3.2. Les observations hydrologiques

Le torrent des Etançons et le torrent de Bonne Pierre ne sont pas instrumentés par des stations de mesure de débit. Aucune donnée de débit n'est donc disponible sur ces deux torrents. En revanche, plusieurs mesures de débit existent plus en aval (Figure 29) :

- Mesure du débit du **Vénéon au hameau des Etages** (bassin versant de 104 km², données EDF et DREAL) jusqu'à 5 h heure locale le 21 juin. A ce moment, la station est emportée par la crue et aucune donnée n'est alors disponible ;
- Reconstitution du débit du **Vénéon au droit du barrage de Plan du Lac** à partir de données d'exploitation (bassin versant de 266 km², données EDF) ;
- Mesure du débit de la **Romanche au Pont Rouge à Bourg d'Oisans** (bassin versant de 804 km², données EDF et DREAL).

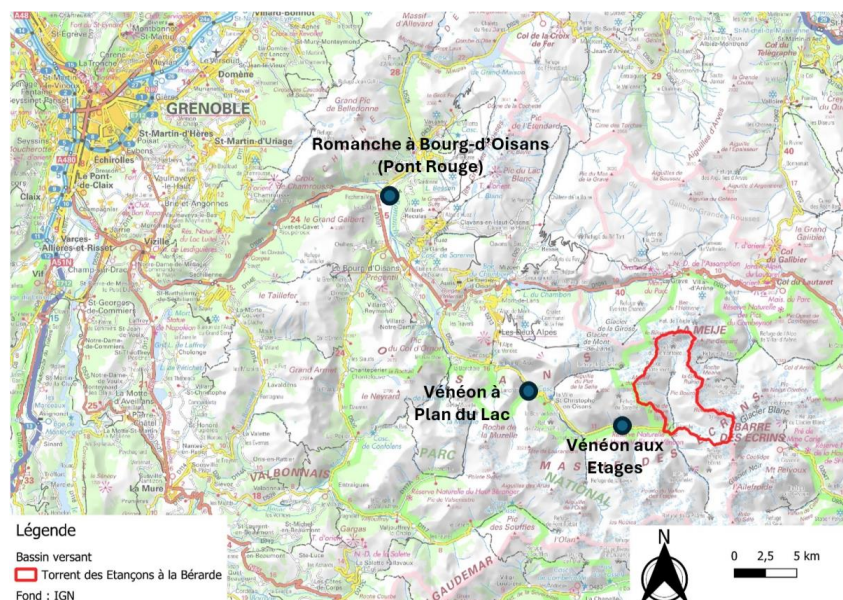


Figure 29: Localisation des mesures de débit.

Les débits en ces trois points sont représentés sur la Figure 30. Les débits du Vénéon au Plan du Lac et de la Romanche à Bourg d'Oisans ont été translatées au bassin versant du Vénéon aux Etages afin de comparer les trois hydrogrammes. Cette translation est effectuée par un rapport de volume d'eau sur plusieurs années, et par un décalage temporel (avancement de 1h pour Plan du Lac et de 3h pour Pont Rouge).

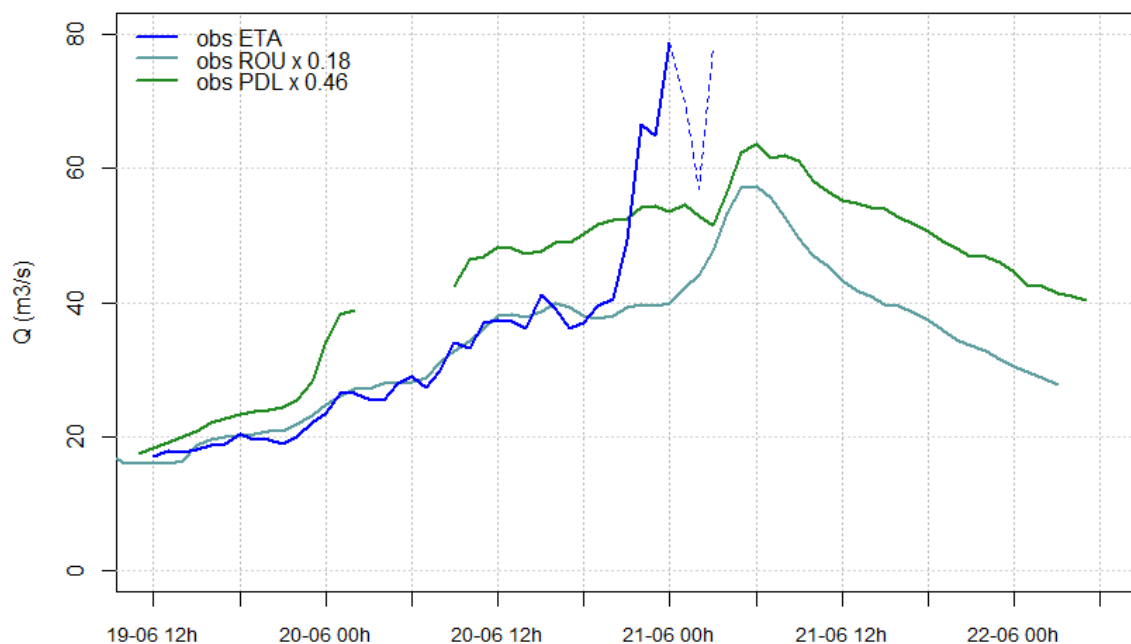


Figure 30: Débit du Vénéon aux Etages. En bleu : débit mesuré aux Etages. En vert : débit reconstitué à partir du débit reconstitué à Plan du Lac. En turquoise : débit reconstitué à partir du débit mesuré sur la Romanche à Pont Rouge. Les heures sont en UTC (heure locale = heure UTC + 2). Source : EDF.

Les données à Plan du Lac sont à prendre avec précaution puisqu'elles sont issues d'une reconstitution de débit au droit du barrage à partir des données d'exploitation. A partir du moment où l'aménagement est mis en état de crue (trou de données dans la nuit du 20 juin), on ne peut plus faire confiance aux valeurs de débit. Seules les variations peuvent donner des indications sur la dynamique du cours d'eau (valeur plutôt à la hausse ou plutôt à la baisse).

Les données aux Etages sont à prendre avec précaution puisque l'arrivée de la crue dans la nuit du 20 au 21 juin est très probablement associée à un fort transport solide et à des flottants, pouvant considérablement influencer la hauteur d'eau et ainsi la valeur de débit mesurée. Au regard des observations de terrain et de l'historique de la station, il paraît ainsi justifié de faire confiance à l'hydrogramme jusqu'à 70 m³/s. En tout état de cause, la hausse rapide observée le 20 juin à partir de 20h (UTC) est bien réelle, dans une gamme de débit régulièrement mesurée à la station.

Malgré ces différentes incertitudes, nous pouvons noter que :

- Le débit du Vénéon et de la Romanche sont **en augmentation régulière** toute la journée du 20 juin ;
- Le débit du Vénéon aux Etages **augmente rapidement entre le 20 juin 22h et le 21 juin 2h. La station est emportée par la crue à 5h.** Le débit de pointe du Vénéon aux Etages n'est donc a priori pas mesuré ;
- Le débit du Vénéon à Plan du Lac et le débit de la Romanche à Bourg d'Oisans **ne perçoivent pas une augmentation aussi rapide du débit en comparaison à celle mesurée aux Etages.**

Le débit de pointe du Vénéon à Plan du lac est observé à **9h le 21 juin**. Le débit de pointe de la Romanche à Bourg d'Oisans est observé à **11h le 21 juin**, et est estimé à 320 m³/s.

Les observations de débit semblent cohérentes avec les témoignages recueillis :

- Le débit du Vénéon est déjà en augmentation au réveil du 20 juin, et poursuit sa montée toute la journée ;
- L'augmentation rapide de débit du Vénéon aux Etages entre 22h et 2h du matin semble synchrone avec l'augmentation du débit du torrent des Etançons (torrent violent vers 23h, premiers débordements vers 0h). La non-observation de l'augmentation rapide des débits au barrage de Plan du Lac pose cependant question. Plusieurs hypothèses peuvent être évoquées : débits surestimés aux Etages en lien avec une réhausse locale du fond du lit et/ou d'embâcles augmentant artificiellement la hauteur d'eau ; distance séparant Plan du Lac des Etages et grande zone de régulation de Plan du lac permettant de laminer l'onde de crue et contribution de l'ordre de 40% des débits des Etages aux débits à Plan du Lac ; hausse de débit moins marquée à Plan du Lac car compensée par une diminution des débits à ce moment-là sur ce bassin versant ;

- Les pics de crue du Vénéon et de la Romanche sont observés en matinée du 21 juin.

Nous pouvons aussi noter que l'essentiel des dégâts causés par le Vénéon dans la vallée ont plutôt été observés en début d'après-midi, avec une perception d'un pic de crue plus tardif que le pic hydrologique mesuré.

3.3. Les observations sismologiques

Une analyse a été menée sur plusieurs observations sismologiques dans le massif des Ecrins, afin de voir si les vibrations continues du sol permettaient de détecter la trace éventuelle d'une crue majeure.

Les stations utilisées sont situées à proximité de Villar-d'Arène, d'Argentières-la-Bessée et de Villar-Loubière (Figure 31). Ces stations mesurent en continu les vibrations du sol à différentes fréquences ainsi qu'une direction préférentielle indiquant l'origine des vibrations.

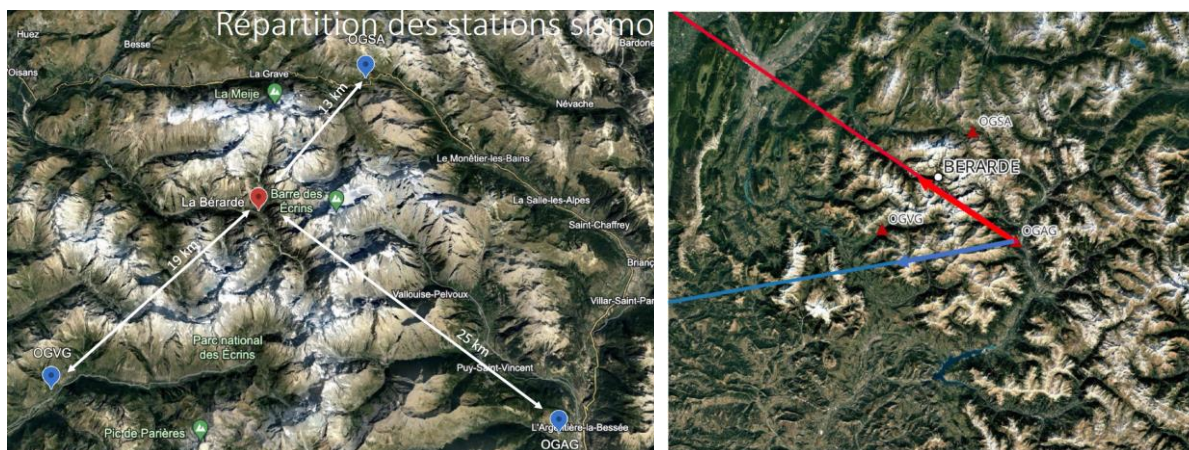


Figure 31: Gauche : emplacement des sismographes dans les Ecrins. Droite : changement de la direction d'origine du bruit sismique de la station d'Argentières le 21 juin.

L'interprétation des données est complexe puisque la crue du torrent des Etançons, et plus généralement les crues généralisées dans le massif des Ecrins le 21 juin, sont concomitantes avec un épisode cévenol capable d'influencer les basses fréquences analysées.

Nous pouvons néanmoins noter que :

- Les trois stations observent une augmentation du signal sismique entre le 21 juin 0h et le 21 juin 8h (Figure 32) ;
- La direction d'origine du bruit sismique reste inchangée pour les stations de Villar Loubière et Villar-d'Arène qui pointaient déjà dans une direction proche de la Bérarde avant l'évènement (alignement des Cévennes et de la Bérarde au regard de la position de ces stations). En revanche, la station d'Argentières, qui pointait vers les Cévennes le 20 juin, pointe vers la Bérarde entre 0h et 8h le 21 juin.

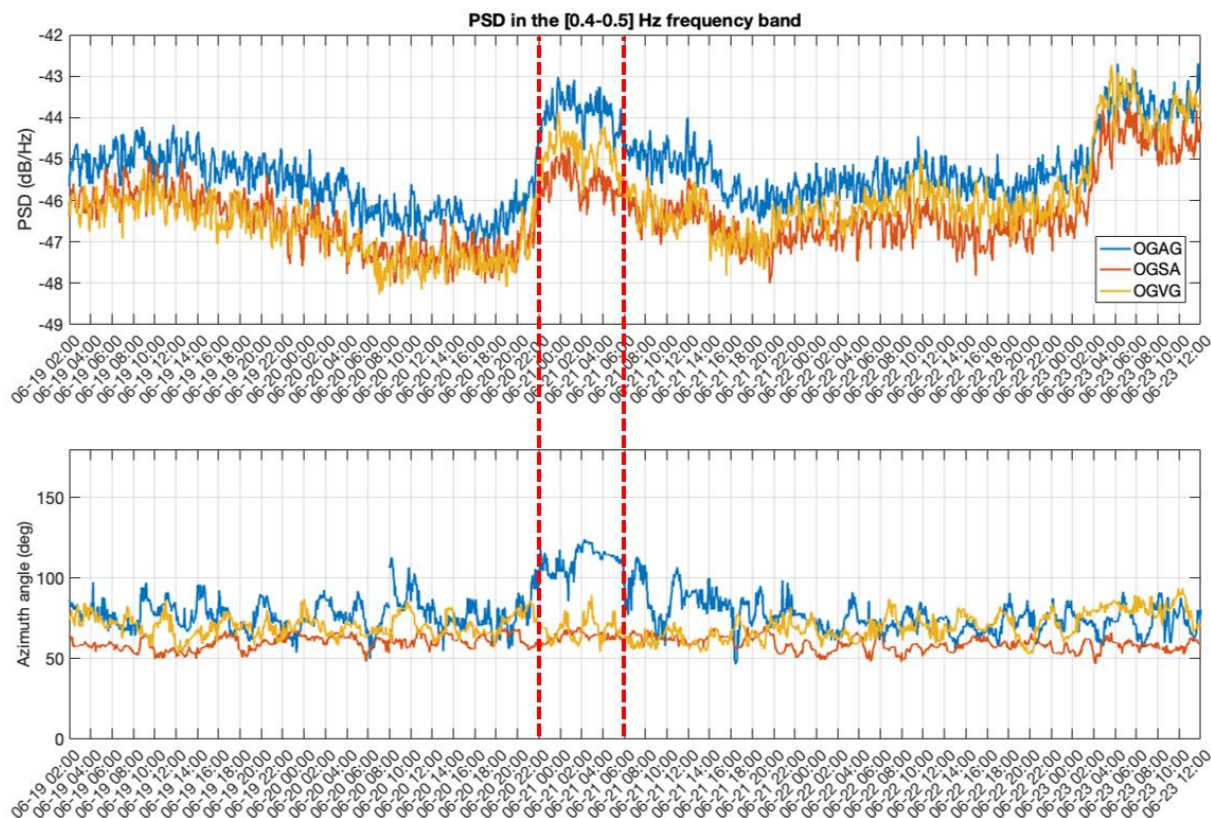


Figure 32: Haut : Intensité du signal sismique des trois mesures du massif des Ecrins. Bas : changement de la direction d'origine du bruit sismique aux stations (Argentière en bleu). Les traits rouges mettent en évidence la période pour laquelle le changement de direction s'opère à Argentière. Les heures sont en UTC (heure locale = heure UTC + 2). Source : ISTerre.

Malgré les incertitudes sur l'origine du bruit de fond sismique mesuré aux stations, il semble probable que les signaux mesurés en début de journée du 21 juin proviennent de la Bérarde. Les vibrations mesurées sont principalement liées au transport solide, ce qui suggère que le transport des matériaux par le torrent des Etançons s'est principalement produit **entre 0h et 8h le 21 juin**. L'intensité plus importante du signal sismique semble maximale **entre 1h et 4h le 21 juin**. Ces observations semblent cohérentes avec les témoignages.

3.4. Résumé

Les trois principales sources d'observation ont mis en avant les éléments suivants sur le déroulé de la crue :

- Le 20 juin est marqué par **l'augmentation progressive du débit du Vénéon** qui déborde en différents points de la vallée en fin de journée. Le débit du torrent des Etançons **est fort mais pas inquiétant** ;
- **Une augmentation marquée du débit du Vénéon aux Etages** est observée entre 22h et 2h du matin dans la nuit du 20 au 21 juin. **Cette augmentation de débit semble synchrone avec l'augmentation du débit du torrent des Etançons** et les premiers débordements à la Bérarde ;
- Les débordements du torrent des Etançons à la Bérarde ont lieu **à partir de minuit le 21 juin et jusqu'à la fin de la crue** (nouveau lit du torrent au cœur du village après la crue) ;
- Les dépôts de matériaux à la Bérarde ont eu lieu **entre 0h et 8h le 21 juin**, et il semble probable que les plus forts dépôts aient eu lieu entre **1h et 4h** ;
- Le pic de crue du Vénéon est observé **le 21 juin à 9h à Plan du Lac**. Le pic de crue de la Romanche à Bourg d'Oisans est observé à **11h**. Les principaux dégâts en différents points de la vallée ont été observés après le pic de crue hydrologique.

4. Caractérisation de la crue du 21 juin 2024

Dans cette partie, les analyses hydrauliques et géomorphologiques sont utilisées afin de caractériser l'origine des matériaux déposés à la Bérarde et la rareté d'un tel phénomène. Cette partie est par définition plus technique que la précédente. De manière simplifiée, elle s'intéresse au déplacement des matériaux et blocs charriés par le torrent (zones de départ, zones de dépôt, volume mobilisé) et aux changements de la forme du paysage après la crue.

4.1. Le transport solide

4.1.1. Bilan sédimentaire

Un bilan sédimentaire par analyse de différentiel topographique (topographie après – topographie avant) a été mené. Cette analyse permet de quantifier les volumes de matériaux solides érodés, déposés et exportés en aval d'un point donné. Les aléas associés aux crues torrentielles sont généralement pilotés au premier ordre par ces volumes solides, ces derniers menant à des engravements et des divagations généralisés sur les cônes de déjection et/ou des érosions des terrains et la destruction des enjeux.

Un différentiel topographique 2024 – 2021 a été réalisé sur l'ensemble du linéaire en dehors des Etançons amont, et 2024 – 2023 sur les Etançons amont. Plusieurs sources d'incertitudes existent : changements de topographie entre 2021 et 2023, présence de neige sur le levé 2024⁴, etc. **Les volumes issus de cette analyse sont donc à considérer comme des ordres de grandeur.**

Cône de déjection du torrent des Etançons (secteur Bérarde)

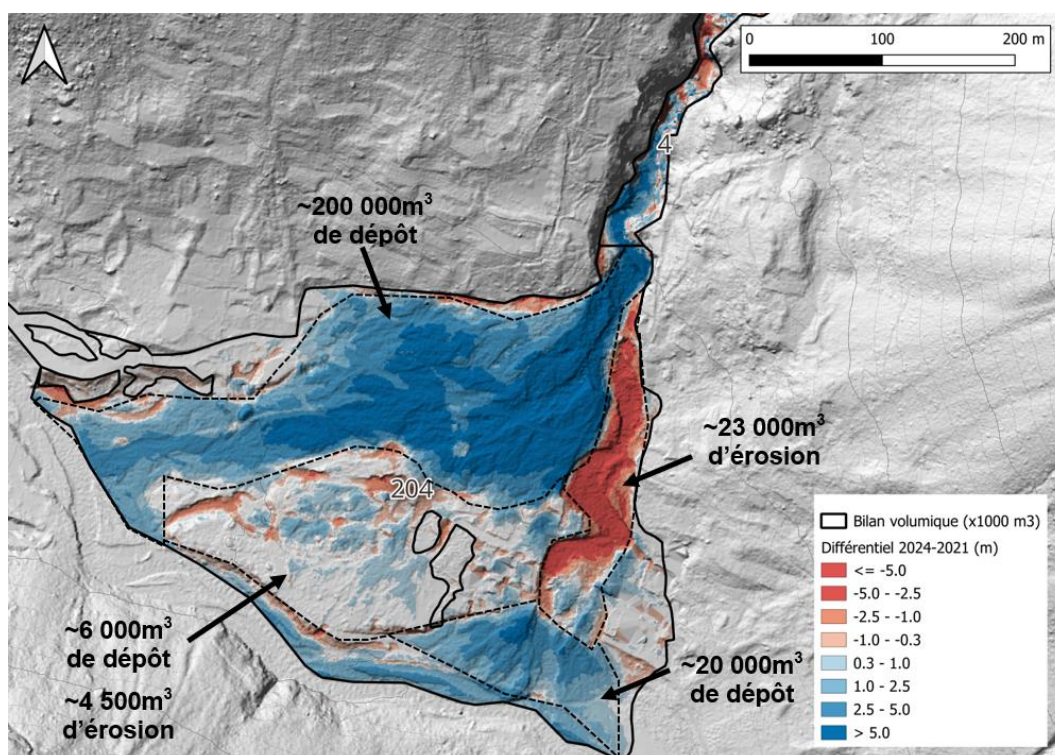


Figure 33: Différentiel de modèle numérique de terrain (MNT) sur le cône des Etançons entre le 28 juin 2024 et 2021. Note : le bilan volumétrique est indiqué pour chaque polygone (ici au centre de la carte) par un chiffre en 10^3 m^3

Le différentiel illustré en Figure 33 met en évidence :

- Des dépôts massifs **dépassant 10 m de haut** dans l'ancien lit, depuis les gorges en amont du sommet du cône de déjection jusqu'en aval de l'ancien pont ;
- En rive droite et plus en aval, des dépôts plus réduits, passant de 5 m à quelques mètres en s'éloignant latéralement ou vers l'aval. Le volume déposé sur ce secteur et dans l'ancien lit est de l'ordre de **200 000 m³**, il concentre ainsi l'essentiel du volume déposé sur le cône de déjection ;
- En rive gauche, **des érosions des terrains préexistants** en fin de crue et post-crue dans l'axe du nouveau lit. Celles-ci sont de l'ordre de 4 à 5 m et dépassent localement 7 m. Ces érosions sont de l'ordre de 23 000 m³. En aval du nouveau lit et de la zone érodée, on observe la

⁴ La neige est intégrée au modèle numérique de terrain issu du levé LIDAR

formation d'un petit cône de déjection avec des dépôts passant de 5 m sur la partie amont à quelques mètres en s'approchant de la confluence avec le Vénéon. Ces dépôts sont de l'ordre de 20 000 m³, soit un volume proche du volume érodé dans le nouveau lit à l'amont immédiat.

Au global, on peut estimer un volume déposé sur le cône de l'ordre de 235 000 m³ (variable selon l'emprise aval considérée), des érosions de l'ordre de 32 000 m³ pour un bilan d'environ **200 000 m³** restant sur le cône de déjection. On note également que le bilan dans les gorges est positif avec 4 000 m³ restant, principalement sur la partie aval.

Ce bilan n'inclut pas le volume de matériaux qui a pu transiter jusqu'au Vénéon et être repris par ce dernier.

Cône de déjection du torrent de Bonne Pierre

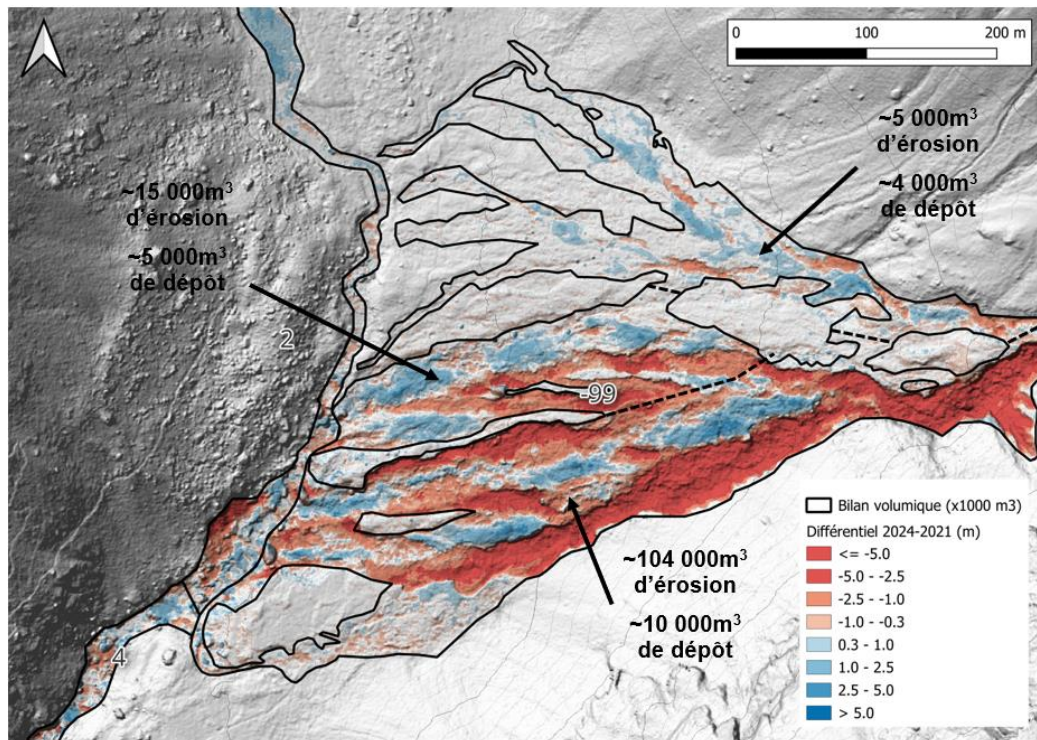


Figure 34: Différentiel de modèle numérique de terrain (MNT) sur le cône de déjection proglaciaire de Bonne Pierre entre le 28 juin 2024 et 2021. Note : le bilan volumétrique est indiqué pour chaque polygone (ici au centre de la carte) par un chiffre en 10³ m³.

Des érosions marquées sont observées sur la partie aval du linéaire du torrent de Bonne Pierre, en amont de la confluence avec le torrent des Etançons (Figure 34) :

- Des érosions importantes **dépassant généralement 5 m** dans l'axe des divagations en rive gauche du cône, avec sur ce secteur environ **100 000 m³ de matériaux érodés** pour 10 000 m³ déposés ;
- Des érosions également importantes en partie centrale **dépassant localement 5 m** et quelques dépôts localisés, correspondant à des volumes de l'ordre de 15 000 m³ (érosion) et 5 000 m³ (dépôt) ;
- Des évolutions morphologiques plus réduites sur la partie en rive droite du cône, ne dépassant pas 2 m, avec des volumes plus modestes de l'ordre de 5 000 m³ en érosion et 4 000 m³ en dépôt.

Au global, le bilan sédimentaire sur le cône de déjection est fortement négatif, indiquant des processus majoritaires d'érosion **avec un export vers l'aval très significatif de l'ordre de 100 000 m³ de matériaux**.

Chenal du torrent de Bonne Pierre

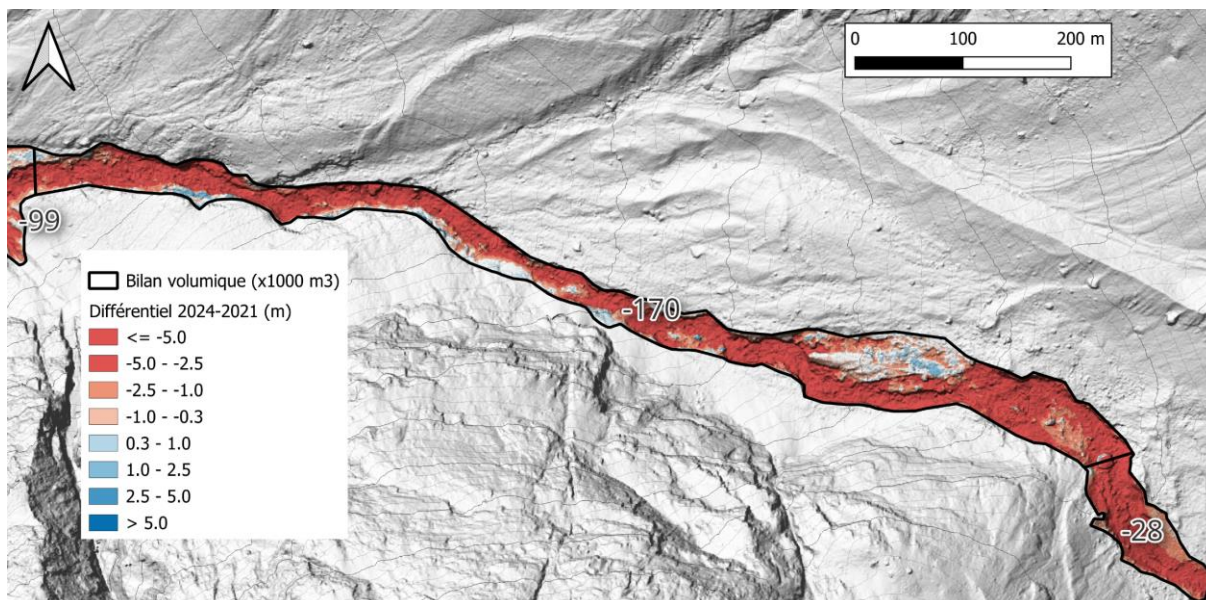


Figure 35: Différentiel de modèle numérique de terrain (MNT) sur le chenal de Bonne Pierre entre le 28 juin 2024 et 2021. Note : le bilan volumétrique est indiqué pour chaque polygone par un chiffre en 10^3 m^3 .

Sur ce secteur, on observe des érosions massives du lit, fortement chenalisées dans les moraines et **dépasseant localement 10 m**. Les processus de dépôt sont quasi-absents sur ce secteur. Ces érosions correspondent à un enfoncement du lit mais également à un élargissement significatif de ce dernier sur certains tronçons. Le bilan volumique indique un export vers l'aval de l'ordre de **170 000 m^3** sur la partie centrale la plus raide et d'environ 36 000 m^3 sur la partie amont en sortie du glacier, **pour un total dépassant 200 000 m^3** . Notons que l'évolution du glacier entre 2021 et 2023 ne permet pas un calcul précis à l'aval immédiat du glacier, une hypothèse de taux d'érosion linéique estimé sur la partie non impactée par le retrait permet de dégager un ordre de grandeur sur les 50 m concernés de l'ordre de 8500 m^3 érodés. **Ces volumes exportés, sur un linéaire de 1.2 km environ, sont très élevés.**

Torrent des Etançons en amont de la confluence avec le torrent de Bonne Pierre

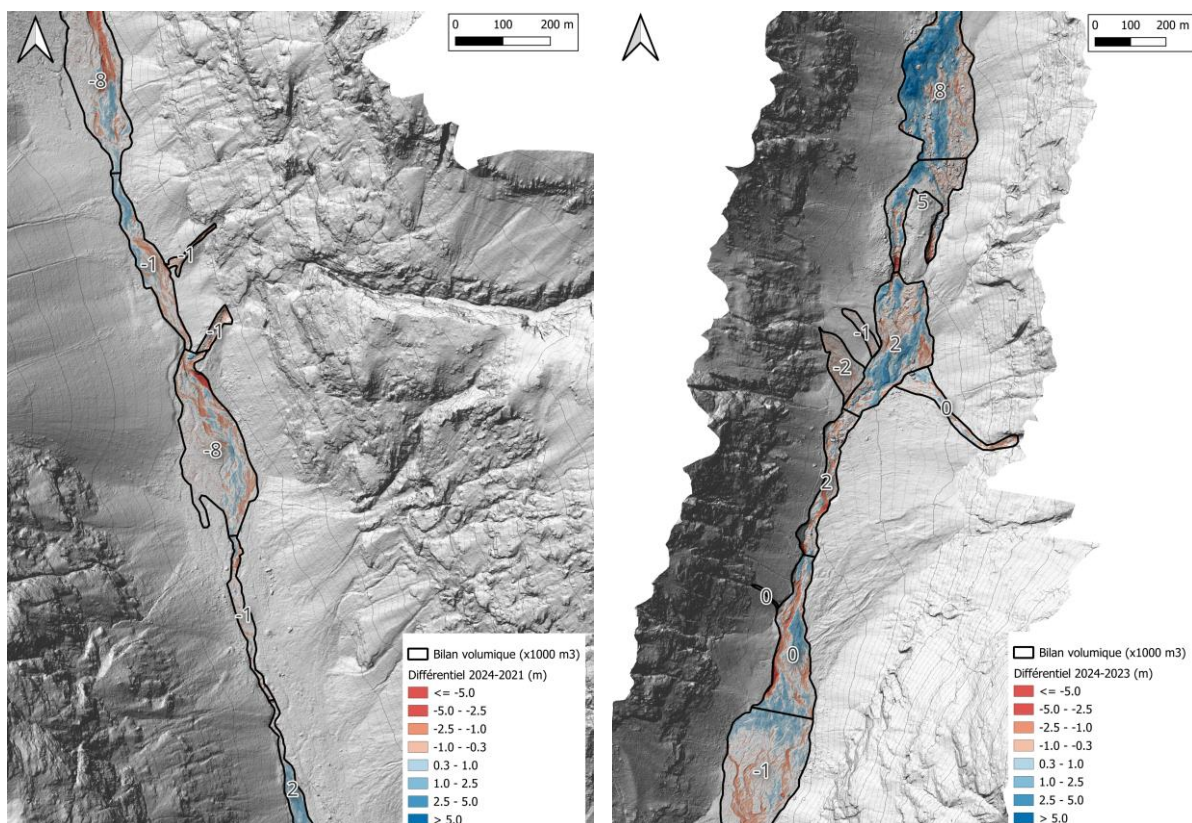


Figure 36: Différentiel de modèle numérique de terrain (MNT) sur le torrent des Etançons en amont de la confluence avec Bonne Pierre entre le 28 juin 2024 et le 26 septembre 2023 (gauche : aval ; droite : amont). Note : le bilan volumétrique est indiqué pour chaque polygone par un chiffre en 10^3 m^3 .

Sur ce long linéaire, la Figure 36 met en évidence :

- Des évolutions morphologiques nettement plus nuancées que sur le torrent de Bonne Pierre ;
- Une succession de zones de dépôt et d'érosion suggérant une redistribution des matériaux et une régulation efficace des volumes solides apportés en amont et latéralement.

Au global, les volumes mobilisés ne sont pas négligeables avec **environ 90 000 m³ de matériaux érodés, 80 000 m³ déposés**. Néanmoins ceci correspond à **un export vers l'aval faible** comparativement au torrent de Bonne Pierre, de l'ordre de 10 000 m³. Rappelons que ces estimations présentent des incertitudes et qu'il faut considérer ces valeurs comme des ordres de grandeur et non des valeurs précises.

Bilan sédimentaire global

Le bilan de l'analyse par différentiel topographique est présenté dans le Tableau 6. On retient de cette analyse :

- Des apports en matériaux solides vers le cône de déjection **provenant de manière très majoritaire du torrent de Bonne Pierre, à la fois de l'érosion de son chenal et de son cône de déjection. Ceux-ci sont de l'ordre de 300 000 m³**, ce qui est très élevé pour la taille du bassin et le linéaire considéré (voir analyse plus détaillée ci-dessous) ;
- **Des apports modestes depuis les Etançons amont** de l'ordre de 10 000 m³, notamment du fait de processus de régulation sédimentaire sur les longs replats alluvionnaires et d'une activation des sources sédimentaires possiblement plus limitée ;
- Des dépôts significatifs sur le cône de déjection (secteur Bérarde) **de 200 000 m³ à 230 000 m³ selon l'emprise de dépôt considérée** (incluant ou non le Vénéon à la confluence), suggérant un export significatif de matériaux à l'aval, de l'ordre de 1/3 des apports amont (70 000 à 100 000 m³ à la date du levé post-crue). Aussi, une estimation du volume maximal déposé sur le cône (en « comblant » le nouveau lit jusqu'aux terrasses latérales) donne des valeurs de l'ordre de **250 000 à 270 000 m³ pour les dépôts maximums**. Ces valeurs semblent globalement cohérentes avec les estimations de volumes ayant été apportés depuis l'amont.

Secteur	Erosion (×1000 m ³)	Dépôt (×1000 m ³)	Bilan (×1000 m ³)
Torrent de Bonne Pierre	329*	23	-306*
Torrent des Etançons amont	89	79	-10
Torrent des Etançons aval (Gorges + Cône)	38	246	208

Tableau 6: Bilan sédimentaire global sur le bassin versant des Etançons. * Une estimation du volume érodé à l'aval immédiat du glacier a été réalisée en considérant le taux d'érosion linéique sur le secteur du fait du recul du glacier entre 2021 et 2023.

Des analyses (voir Annexe) plus poussées du transport solide ont été menées, à savoir :

- **Une analyse des profils en long des torrents** avant et après évènement (Figure 37). Ces analyses mettent notamment en avant l'absence de zones de régulation du transport solide sur le torrent de Bonne Pierre, contrairement au torrent des Etançons amont ;
- **L'analyse du type de transport solide** (lave torrentielle ou charriage torrentiel) grâce aux photographies de la crue et à des relevés post-évènement. Il en ressort que des écoulements sous forme de lave torrentielle ont vraisemblablement eu lieu en aval du glacier de Bonne Pierre par remobilisation des dépôts torrentiels et morainiques gorgés d'eau. Ces écoulements de lave auraient débordé en partie sur le cône végétalisé de Bonne Pierre et auraient initié l'incision du chenal principal du torrent, en remobilisant les matériaux stockés dans le lit et d'anciens dépôts d'alluvions glaciaires et torrentiels mêlés. Des écoulements sous forme de charriage torrentiel ont ensuite eu lieu dans un second temps, continuant d'inciser et d'élargir le lit, tout en faisant disparaître les traces initiales laissées par les écoulements sous forme de lave torrentielle. Les écoulements initiaux sous forme de lave torrentielle ne se sont vraisemblablement pas propagés en aval de la confluence avec les Etançons (aucune trace n'est observée plus en aval). Ainsi, un transport solide sous forme de charriage a essentiellement été observé dans les gorges et à la Bérarde. Ce constat est par ailleurs confirmé par les témoignages et les différentes photos et vidéos prises au cours de l'évènement qui décrivent des mécanismes de divagations torrentielles associées à des mécanismes de charriage ;
- **L'analyse des taux linéiques d'érosion** sur le torrent de Bonne Pierre.

Le graphique ci-dessous illustre en partie le travail réalisé et retranscrit en Annexe.

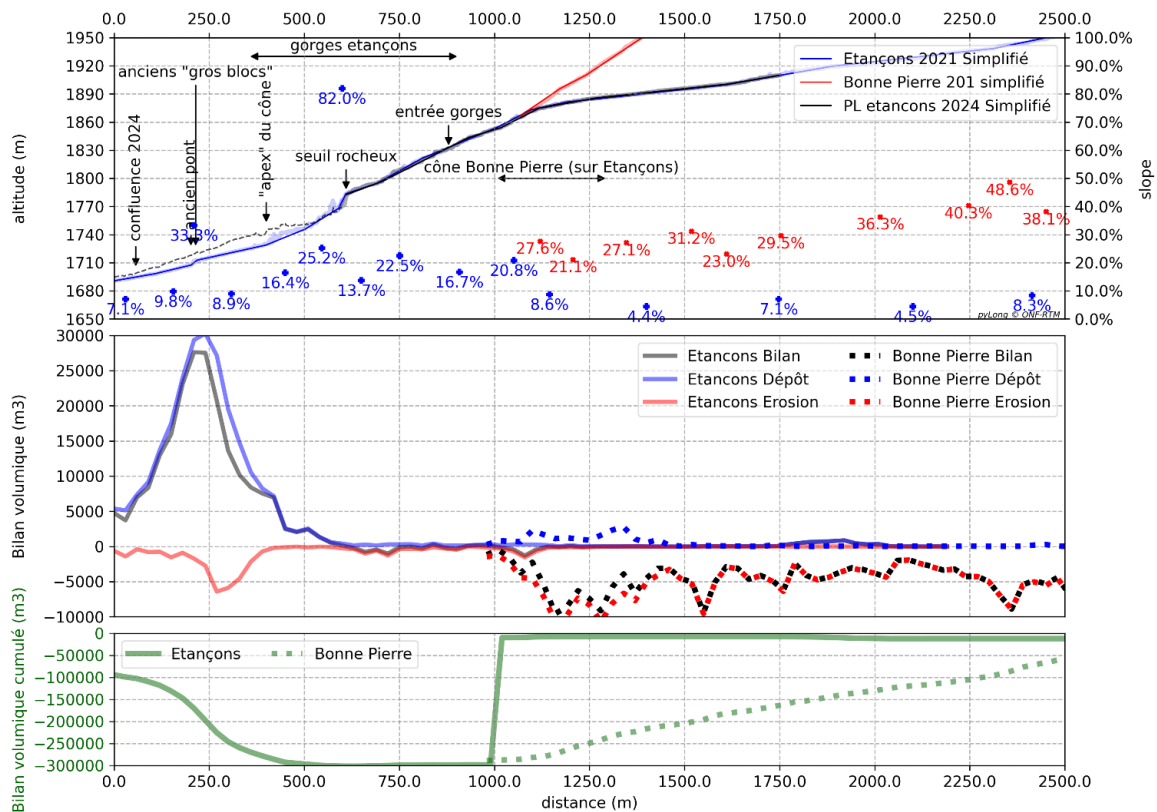


Figure 37: Profil en long depuis la confluence avec le torrent de Bonne Pierre (en haut). Bilan volumique par tronçons de 30m linéaire pour les deux torrents (au centre) et bilan volumique cumulé d'amont en aval (en bas).

4.1.2. Caractérisation de l'évènement

La rareté d'un évènement torrentiel est plus caractérisée par les volumes de matériaux transportés que par le débit liquide maximal. Ainsi, la rareté de la crue du 21 juin est approchée grâce à :

- Une comparaison des volumes solides exportés aux valeurs de la littérature scientifique ;
- Une comparaison des taux d'érosion linéiques aux valeurs de la littérature scientifique et aux valeurs issues de la rétro-analyse de la crue de la Vésubie.

Volumes solides exportés

Une comparaison des volumes exportés en aval de plusieurs points dans le bassin des Etançons avec des données issues de la littérature est menée afin d'évaluer la « rareté » de l'évènement et d'évaluer un ordre de grandeur de la période de retour associé aux volumes solides exportés. La comparaison est effectuée avec diverses bases de données alpines, une base de données italienne, la base de données du projet HydroDemo et des formules empiriques (extrait de ces comparaisons en Figure 38 et Figure 39). Cette analyse est réalisée au regard de la superficie des bassins versants concernés.

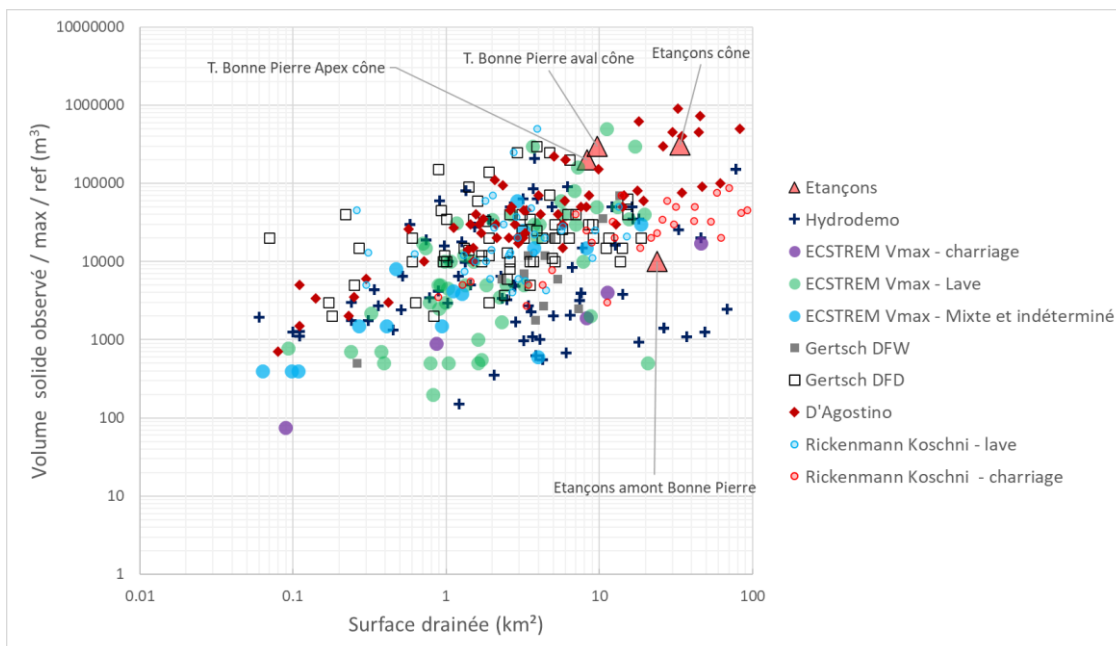


Figure 38: Comparaison des volumes solides produits lors de la crue des Etançons avec des données de la littérature en fonction de la surface drainée

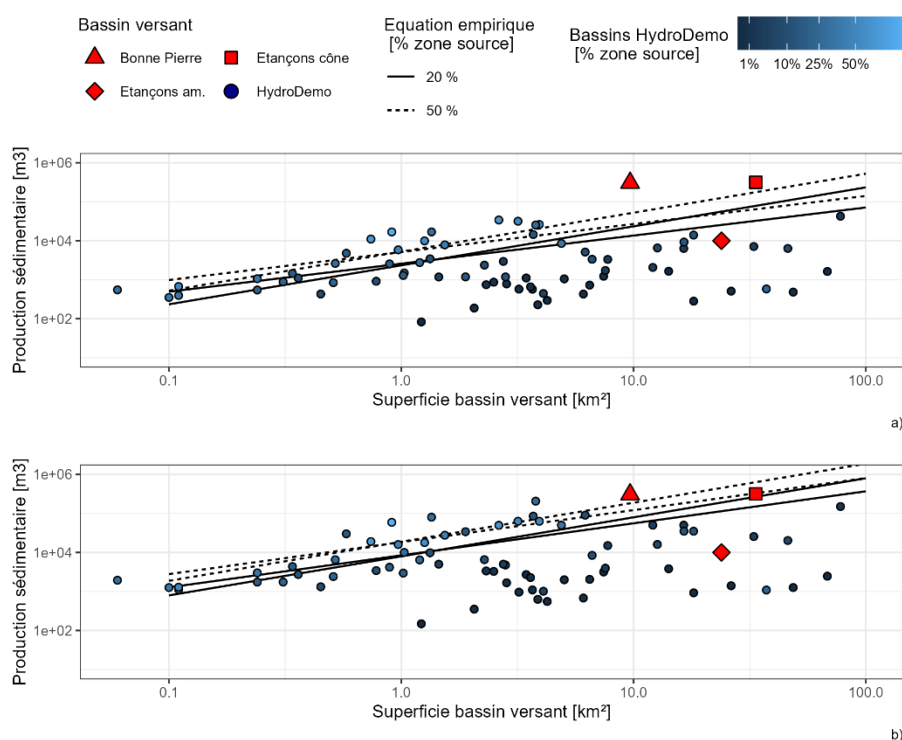


Figure 39: Comparaison des volumes solides (points rouges) avec les volumes décennaux (haut) et centennaux (bas) issus des bassins versants étudiés lors de l'établissement de la méthode Hydrodemo (points bleus) et formules empiriques proposées (traits continus et pointillés).

Ces comparaisons mettent en évidence :

- Une production du torrent des Etançons amont dans la borne basse des observations ;
- Une production du torrent de Bonne Pierre dans la borne haute des observations alpines et italiennes, et supérieure aux estimations centennales d'HydroDemo et empiriques.

Le transport solide du torrent de Bonne Pierre est donc **exceptionnellement fort et bien supérieur à la période de retour centennale**.

Taux d'érosion linéiques

Les taux linéiques d'érosion du torrent de Bonne Pierre, de l'ordre de 100 à 300 m³/m linéaire, sont

supérieurs aux valeurs classiquement reportées dans la littérature scientifique, ce qui suggère que l'évènement est plutôt rare. Ils sont en revanche inférieurs aux valeurs reportées pour des vidanges de lacs glaciaires par érosion de barrages morainiques, pouvant atteindre 1000 m³/m.

Plus de détails sur ces travaux de caractérisation de la rareté de la crue sont disponibles **dans le rapport Annexe**.

4.2. Les évolutions géomorphologiques

L'analyse des évolutions géomorphologiques est effectuée sur trois secteurs : la partie amont du torrent de Bonne Pierre, la partie aval du torrent de Bonne Pierre, et la Bérarde.

Amont du torrent de Bonne Pierre

Cette zone représente **l'une des principales sources sédimentaires** ayant contribué à la crue du 21 juin. Localement, le lit du torrent de Bonne Pierre s'est profondément incisé, atteignant plus de 10 mètres de profondeur, révélant parfois le substratum rocheux (Figure 40).

Cette marge proglaciaire, que l'on peut également qualifier de moraines remaniées, correspond au vallum morainique qui est la zone abandonnée par le glacier de Bonne Pierre depuis la fin du Petit Âge Glaciaire (PAG). Elle s'étend entre la moraine frontale, située autour de 2100 mètres d'altitude, et l'actuel front du glacier (2440m). Cette zone est composée de dépôts glaciaires et morainiques, témoignant de l'avancée historique du glacier, et est traversée par un réseau hydrographique. Ce réseau inclut le torrent de Bonne Pierre, à régime glaciaire, ainsi que le torrent du ravin de la Somme.

Les matériaux présents dans ce secteur correspondent à une zone de **dépôts glaciaires et torrentiels**. Ils reflètent la diversité des matériaux exposés après le retrait des glaciers, avant qu'ils ne soient remodelés par des processus non-glaciaires.

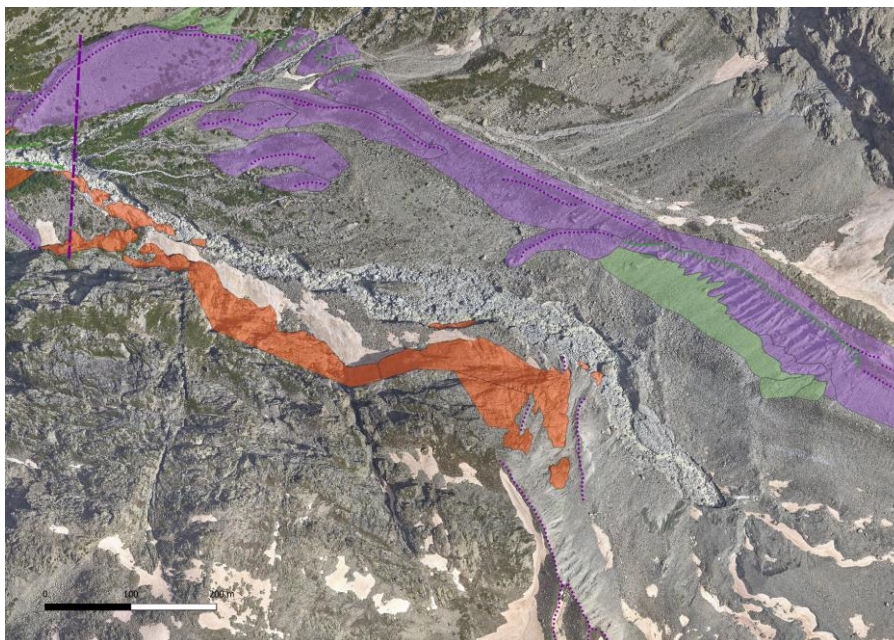


Figure 40: Carte géomorphologique simplifiée de la marge proglaciaire du vallon de Bonne Pierre. En orange foncé : les affleurements rocheux ; En violet : les moraines (surfaciques) et cordon morainique (pointillé) ; En vert : les formes fluviales.

Aval du torrent de Bonne Pierre

La partie aval du torrent de Bonne Pierre a aussi fortement contribué aux apports solides pendant la crue. En aval de la marge proglaciaire, le torrent de Bonne Pierre s'écoule entre le versant de la Rochaille au sud et celui de la Somme au nord. Le paysage change dans cette zone avec une végétation plus abondante, signe d'une stabilisation relative des terrains. Les phénomènes de remaniement des versants semblent plus anciens, témoignant de processus d'érosion passés, moins actifs que ceux de la zone proglaciaire plus en amont (Figure 41).

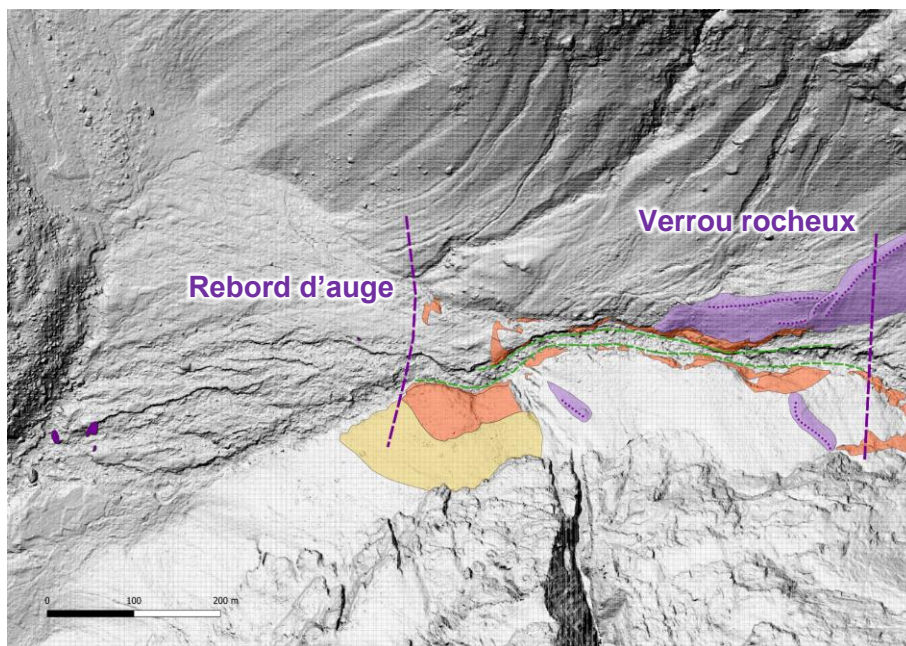


Figure 41: Carte géomorphologique simplifiée de la partie aval du vallon de Bonne Pierre. En jaune orangé : roche moutonnée en rive gauche du cône de Bonne Pierre ; En orange foncé : les affleurements rocheux ; En violet : les moraines (surfaciques) et cordon morainique (pointillé) ; En vert : les formes fluviales, ici le tracé de la bande rocheuse supposée.

Enfin, le cône de déjection de Bonne Pierre a aussi largement été érodé pendant l'évènement, principalement en rive gauche. L'analyse du profil en long montre que les pentes du torrent dans la section chenalisée en amont du cône sont relativement abruptes, avec des inclinaisons atteignant 35 à 40 %, avant de diminuer à 20-30 % sur le cône lui-même. En raison de ces pentes, **la capacité de stockage sédimentaire classiquement associée à un cône de déjection apparaît limitée**. Ainsi, les matériaux tendent davantage à être remaniés et à transiter plutôt qu'à s'accumuler dans cette zone. C'est pourquoi le terme de cône de déjection proglaciaire devrait être privilégié.

Une caractéristique majeure de ce cône est la présence d'un affleurement de roches situé à son sommet, entre 1970 m et 2050 m d'altitude. Cet affleurement marque la séparation entre deux chenaux (principal et secondaire) et forme des seuils naturels sur le chenal secondaire (rive droite). Le chenal en rive gauche, qui a été fortement mobilisé lors de la crue du 21 juin 2024 est considéré dans notre analyse comme le chenal principal. Au-dessus de 1970 m d'altitude, des affleurements continus bordent la rive gauche du chenal principal. En-dessous de 1970 m, il n'y a aucun affleurement rocheux visible.

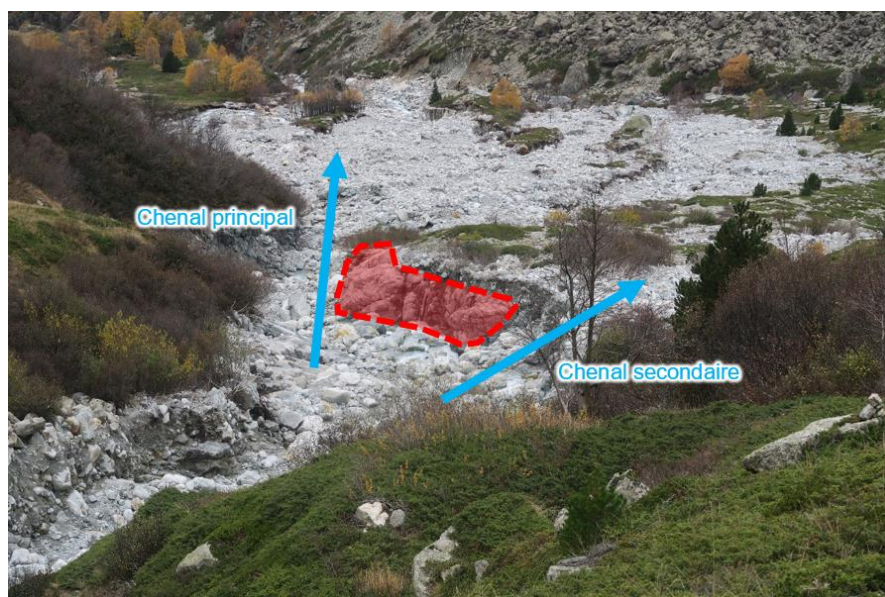


Figure 42: Cône de déjection du torrent de Bonne Pierre vu depuis l'amont.

Les relevés effectués sur le terrain montrent que l'activité torrentielle depuis 1830 est plus importante et régulière dans le chenal principal. C'est d'ailleurs sur la partie rive gauche du cône que l'on retrouve les phénomènes d'érosions et de dépôts les plus marqués.

La Bérarde

Avant l'événement, le secteur était caractérisé par un cône de déjection à pente faible et un lit des Etançons circonscrit sur la partie nord-ouest du hameau. Cette zone correspondait au lit principal actif tout au long du XX^e siècle et également visible sur des photographies et cartes postales de la fin du XIX^e siècle. Immédiatement à l'ouest des bâtiments du bourg, un cône plus ancien mais bien identifiable était également présent. La partie orientale du cône, où est construit l'essentiel du bourg historique, **présentait une morphologie mixte, associant des dépôts glaciaires et torrentiels**. Les zones situées au-delà de ces dépôts, notamment au nord et à l'est du cône, étaient occupées par des matériaux morainiques sur lesquels ont été construits les bâtiments touristiques et les habitations plus récentes.

Ce cône de déjection, formé par le torrent des Etançons, a progressivement repoussé le Vénéon vers sa rive gauche. Depuis les années 1970, les aménagements, notamment la création d'un parking, a fortement contraint le lit du Vénéon sur ce secteur.

Suite à l'événement, une mobilisation importante des matériaux dans le lit historique du torrent a été observée, avec un remplissage de plusieurs mètres au sein de la bande active. Les débordements et les engravements ont globalement été limités sur certaines parties du cône de déjection, bien qu'un engravement majeur soit aussi observé à la sortie des gorges. Ces dépôts semblent avoir recouvert les moraines et les épandages fluvio-glaciaires, **confirmant que l'événement peut être considéré comme exceptionnel d'un point de vue géomorphologique (Figure 43)**. Cela confirmerait l'hypothèse qu'un évènement similaire ne s'est pas produit depuis au moins plusieurs siècles.

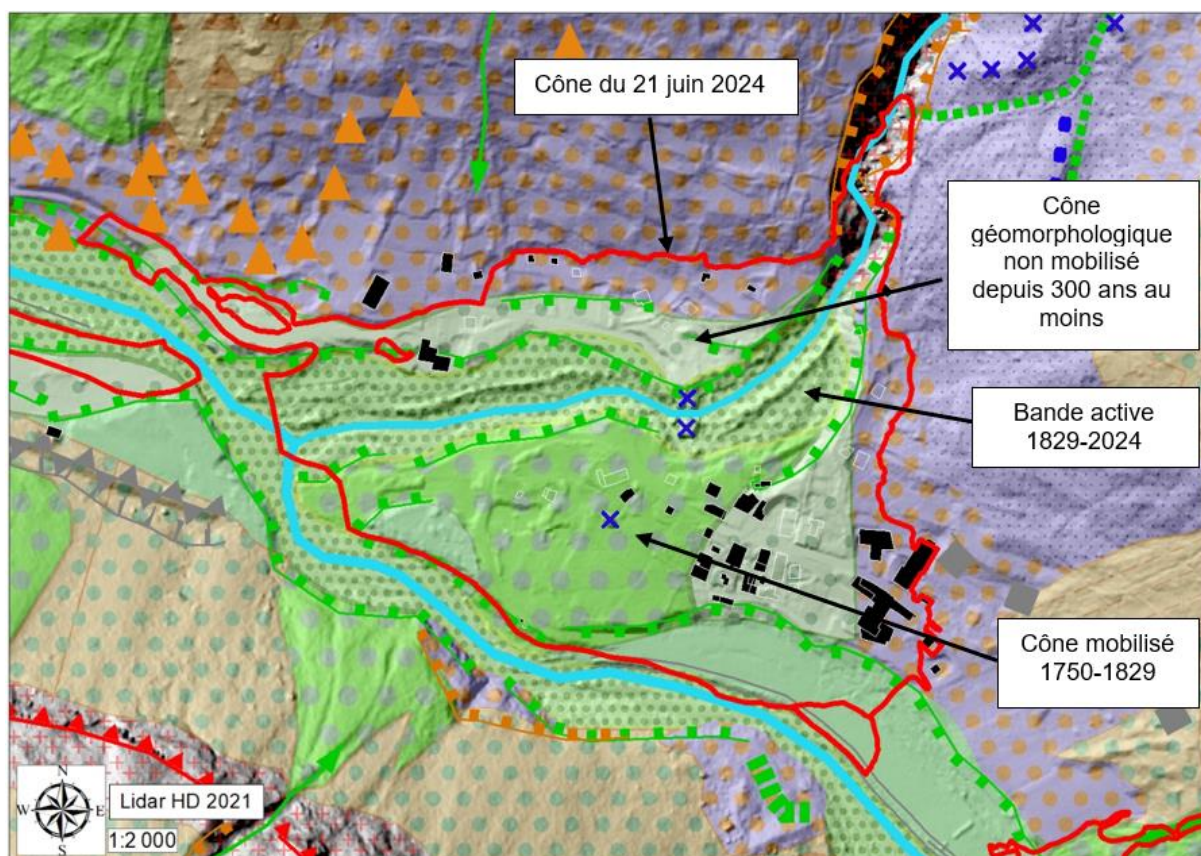


Figure 43: Carte géomorphologique du cône de déjection des Etançons avant l'évènement du 21 juin 2024. La couleur verte représente les processus fluviaux. Le violet représente les processus glaciaires (dépôts morainiques et moraines remaniées).

Lors de la décrue entre le 21 et le 22 juin, le torrent des Etançons a creusé un nouveau tracé sur la partie orientale du cône, incisant et reprenant les matériaux accumulés, qu'ils proviennent de la crue elle-même (dépôts de Bonne Pierre) ou de formations plus anciennes (moraines et dépôts fluvio-glaciaires). Ce nouveau tracé a causé des destructions et des endommagements aux bâtiments situés sur son passage et a engendré la formation d'un petit cône de déjection secondaire à la confluence avec le Vénéon. L'ancien lit situé sur la partie nord-ouest du cône a été complètement abandonné.

4.3. Résumé

Les analyses du transport solide et géomorphologiques ont mis en évidence les points suivants :

- **L'essentiel des matériaux déposés à la Bérarde provient du torrent de Bonne Pierre.** Le torrent des Etançons amont a peu contribué à la fourniture sédimentaire. Ce dernier possède plusieurs zones de régulation du transport solide en amont de la Bérarde, **contrairement au torrent de Bonne Pierre** ;
- Les matériaux mobilisés par le torrent de Bonne Pierre proviennent **de la marge proglaciaire, du chenal intermédiaire et de la rive gauche du cône de déjection**. Le volume total exporté par le torrent est de l'ordre de **300 000 m³** ;
- **250 000 à 270 000 m³ de matériaux se seraient déposés pendant la crue** sur le cône de déjection du torrent des Etançons à la Bérarde, principalement au niveau de l'ancien lit et en sortie des gorges. Le transit d'une partie de ces matériaux vers l'aval et l'incision observée pendant et après la crue mènent à un volume déposé d'environ **200 000 m³ sur le cône de déjection en fin de crue** ;
- Les volumes de matériaux exportés par le torrent de Bonne Pierre et les taux d'érosion linéiques suggèrent **une période de retour élevée de la crue torrentielle, supérieure à un évènement centennal**. Les évolutions géomorphologiques au niveau de la Bérarde suggèrent qu'un tel phénomène n'a pas été observé depuis au moins plusieurs siècles, **ce qui confirme le caractère exceptionnel de l'évènement**.

5. Analyse de la situation météorologique et nivale

La première partie du rapport a permis de caractériser la crue du 21 juin (temporalité, transport solide, rareté du phénomène). Nous abordons dans les parties suivantes les causes probables de la crue.

Cette partie analyse les conditions météorologiques et nivologiques avant et pendant l'évènement.

5.1. Les précipitations

5.1.1. Contexte météorologique avant l'évènement

Le début du mois de juin est marqué par une succession de passages pluvieux. A partir du 10 juin environ, un flux océanique de secteur Ouest s'installe et apporte toujours des précipitations régulières. La station d'Ornon, située dans la vallée voisine de La Lignarre a mesuré, du 1^{er} au 17 juin 95,9 mm. Cette valeur constitue la 12^e valeur la plus élevée depuis le début des mesures en 1905.

Ces précipitations maintiennent un indice d'humidité des sols au-dessus des normales saisonnières. L'indice atteint même les 10% des valeurs les plus fortes les 15 et 16 juin pour cette période de l'année.

A partir du lundi 17 juin, le flux s'incurve progressivement vers le Sud-Ouest sur toute l'épaisseur de l'atmosphère en lien avec le pivotement d'un talweg, jusqu'alors centré sur les îles britanniques et s'étendant maintenant jusqu'à la péninsule Ibérique. Le flux de Sud-Ouest s'accélère et tend à s'orienter au secteur Sud au fil des jours, advectionnant **une masse d'air humide et chaude** en provenance directe des latitudes tropicales (Figure 44). Le fort courant de Sud-Ouest, en franchissant les Alpes, provoque des effets de foehn locaux sur l'Oisans qui accentuent encore la douceur de l'atmosphère et enclenche un épisode de fonte du manteau neigeux massif et rapide.

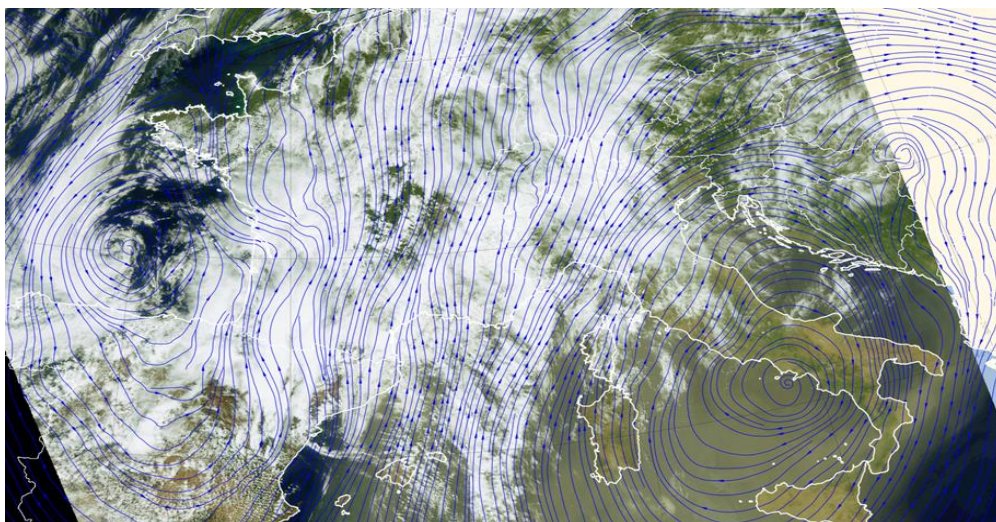


Figure 44: Image satellite du 20/06 à 14h01 et lignes de flux prévues par le modèle météorologique Arpège à environ 3000 m d'altitude. Le temps est perturbé dans les Alpes avec une couverture nuageuse importante. Le fort flux de Sud apporte aussi des poussières de sable, visibles sur la Méditerranée. Source : Météo-France.

5.1.2. Précipitations pendant l'évènement

19 & 20 juin 2024

Les premières précipitations portées par le fort flux de sud-ouest abordent la région de Saint-Christophe-en-Oisans vers 21h le 19 juin, et se poursuivent dans la nuit du 19 au 20 juin. Du 19 juin 8h au 20 juin 8h, le cumul de précipitations atteint **33,4 mm** à la station de Saint-Christophe-en-Oisans (Figure 45). La limite pluie-neige se situe **aux alentours de 3500 m**. Une rafale de vent à 108 km/h est observée à la station nivôse des Ecrins.

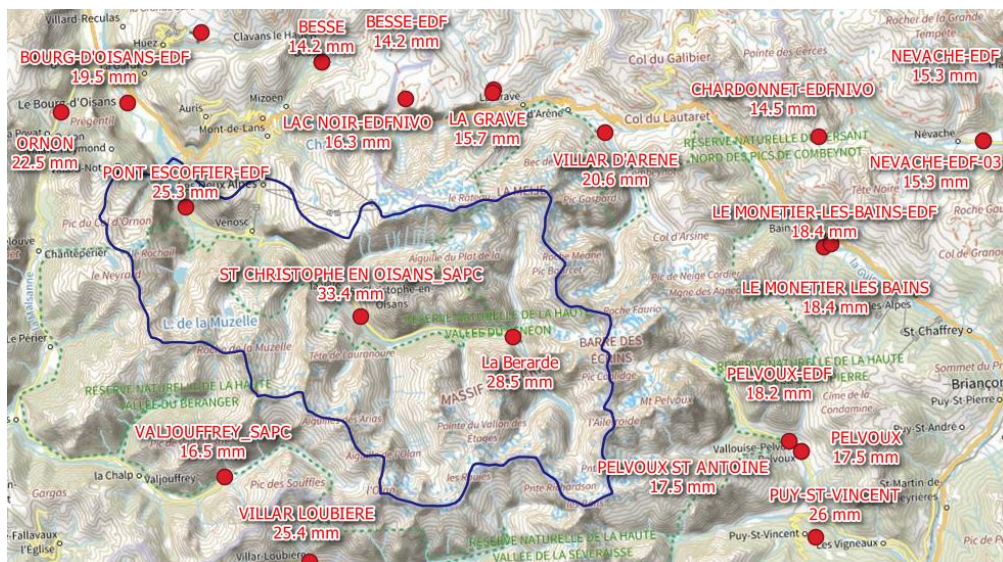


Figure 45: Cumuls de précipitations mesurés entre le 19 juin 8h et le 20 juin 8h. Source : Météo-France.

20 & 21 juin 2024

En matinée du 20 juin, les précipitations sont régulières. Elles se poursuivent en début d'après-midi avant une accalmie observée en fin d'après-midi. En journée du 20 juin, les cumuls observés à Saint-Christophe-en-Oisans sont de l'ordre de **37 mm**. Le flux s'oriente au secteur sud et la limite pluie-neige remonte **vers 4000 m d'altitude** en cours de journée.

En seconde partie de nuit du 20 au 21 juin, un changement de masse d'air et un refroidissement a lieu. Ce passage est associé à un regain de précipitations avec des bandes pluvieuses plus actives. Les intensités maximums se produisent **entre 4h12 et 7h12 le 21 juin**. Sur ces 3h, **29,8 mm** de précipitations sont relevées à St-Christophe-en-Oisans. Pendant cette période la limite pluie-neige reste haute mais chute de 3600m à 3000m environ. Le vent se renforce avec une rafale mesurée à 154 km/h à la station nivôse des Ecrins.

La Figure 46 illustre les cumuls de précipitations mesurés entre le 20 juin 8h et le 21 juin 8h.

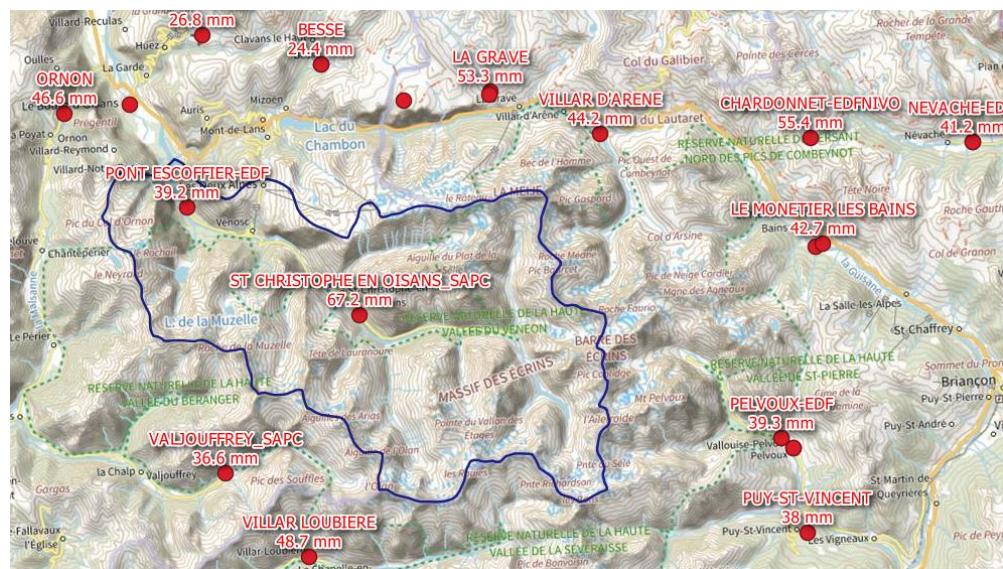


Figure 46: Cumuls de précipitations mesurés entre le 20 juin 8h et le 21 juin 8h. Source : Météo-France.

Après le passage pluvieux plus actif marquant un refroidissement, les précipitations se produisent sous forme d'averses parfois accompagnées d'orages localisés et peu durables. La limite pluie-neige s'abaisse à 2800 m. Entre le 21 juin 8h et le 22 juin 8h, 15,6 mm sont mesurés à Saint-Christophe-en-Oisans.

La Figure 47 met en avant la temporalité de l'épisode de précipitations observé à Saint-Christophe-en-Oisans : les passages de précipitations intenses mais relativement courts des nuits du 19 au 20 et du 20 au 21 encadrent des précipitations moins intenses mais plus durables en journée du 20 juin.

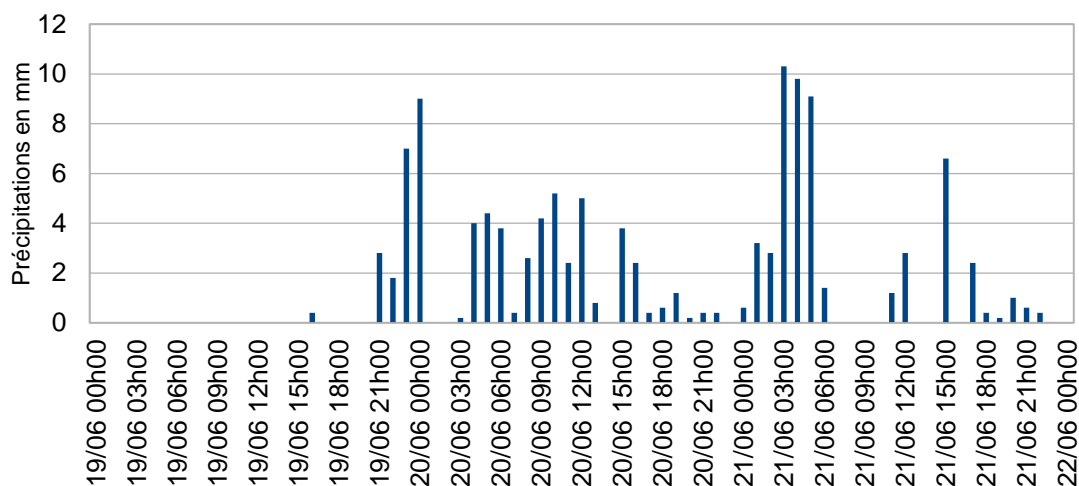


Figure 47: Précipitations horaires (en mm) du 19/06 à 0h au 22/06 à 0h mesurées au poste de St-Christophe en Oisans. Attention : les heures sont en heure universelle (UTC). Heure locale = heure UTC +2. Source : Météo-France.

5.1.3. Bilan de l'évènement

Entre le 19 juin 8h et le 21 juin 8h, 100,6 mm ont ainsi été mesurés à Saint-Christophe-en-Oisans.

Aucun pluviomètre n'est localisé plus en amont dans le bassin versant du Vénéon. L'utilisation des **observations radar** corrigées par les observations de pluviomètres alentours de Météo France et d'EDF permet ainsi d'aboutir à une lame d'eau spatialisée de précipitations. Par ailleurs, la bonne synchronicité des signaux mesurés aux différents pluviomètres de la région suggère qu'une bonne confiance peut être accordée à la temporalité des précipitations.

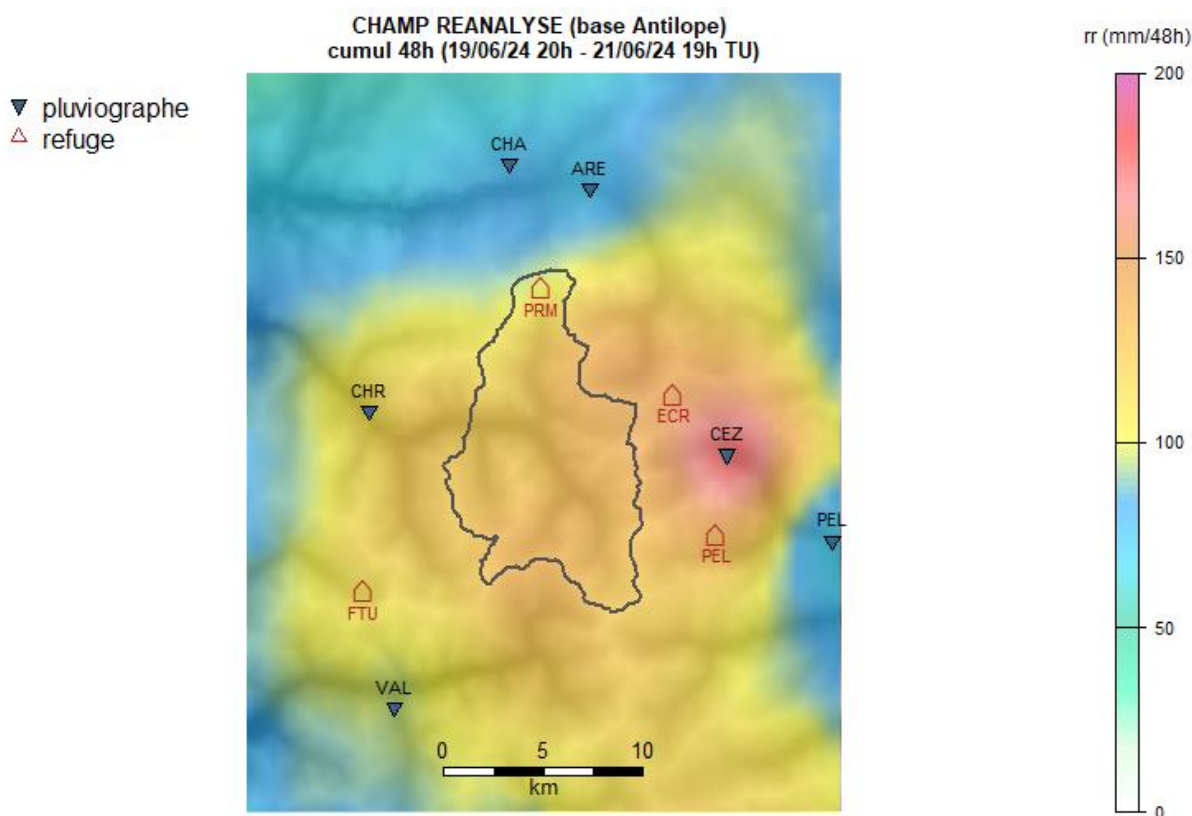


Figure 48: Lame d'eau Antilope (lame d'eau radar corrigée par les pluviomètres, Météo-France) corrigée par les observations Météo-France et EDF sur 48h entre le 19 juin 22h et le 21 juin 21h sur le bassin versant du Vénéon aux Etages (source : EDF).

Cette figure montre que les cumuls auraient été légèrement plus importants en cœur de massif, en amont de Saint-Christophe-en-Oisans. Ainsi, le cumul de précipitations sur 48h entre le 19 et le 21 juin atteint **127 mm** sur le bassin versant du Vénéon au hameau des Etages. Il atteint **137 mm** sur le bassin versant de Bonne Pierre.

5.1.4. Caractérisation de l'évènement

La valeur de 106 mm mesurés en 48h à Saint-Christophe-en-Oisans correspond à une période de retour **de l'ordre de 10 ans** au regard de l'historique de la station. Le passage pluvieux plus intense observé en seconde partie de nuit du 20 au 21 juin, avec 29.7mm en 3h, correspond à une période de retour inférieure à 2 ans.

Par ailleurs, la mise en regard du cumul de pluie (précipitations liquides uniquement) sur 48h sur le bassin versant du torrent des Etançons avec l'historique modélisé par le modèle S2M de Météo France met en évidence qu'un tel cumul a plusieurs fois été dépassé dans l'historique (Figure 49). Néanmoins, les plus fortes valeurs de pluie sont généralement observées en milieu d'été et en début d'automne, lorsque des précipitations fortes sont observées avec des limites pluie-neige très élevées. Pour un mois de juin, le cumul de pluie observé du 19 au 21 juin **est le plus fort depuis 1958**.

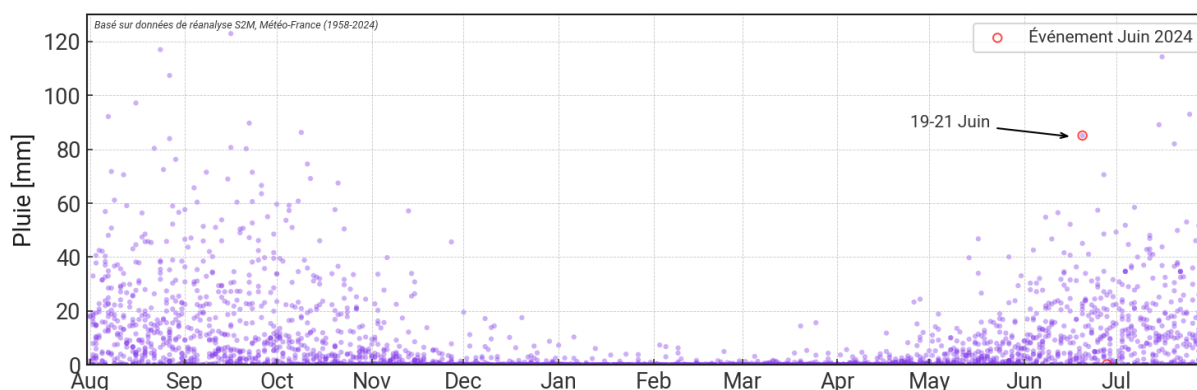


Figure 49: Saisonnalité des lames d'eau de pluie sur 48h sur le bassin versant des Etançons sur la période 1958-2024. L'épisode du 19 juin 7h au 21 juin 7h est mis en évidence. Source : CNRM/CEN.

5.2. La contribution nivale

5.2.1. L'enneigement du bassin versant avant l'évènement

L'hiver 2023-2024 a été marqué par une grande douceur et une pluviométrie très abondante. Ces caractéristiques ont favorisé un enneigement très contrasté sur l'ensemble des massifs. La moyenne montagne a été très peu enneigée, contrairement aux altitudes supérieures à 2500 m où les hauteurs de neige ont atteint des valeurs très importantes. Avec des températures des mois de mai et début juin conformes aux normales, la fonte massive et rapide, habituellement rencontrée à cette période ces dernières années, a été retardée.

L'enneigement du massif des Ecrins est donc très important au 19 juin 2024. La Figure 50 illustre l'enneigement du bassin versant du torrent des Etançons à cette date, à partir du modèle S2M de Météo France. L'enneigement atteint près de 4 mètres au sommet du bassin versant, pour un équivalent en eau atteignant 1600 mm. La limite d'enneigement se situe aux alentours de 2600 m d'altitude.

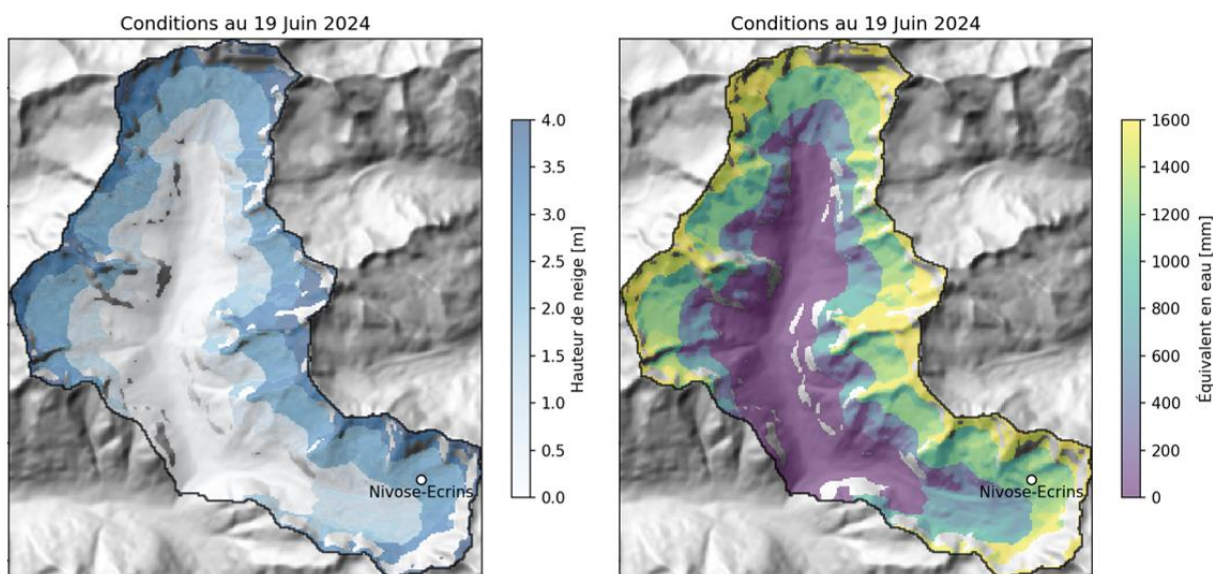


Figure 50: Enneigement simulé par le modèle S2M le 19 juin 2024 sur le bassin versant du torrent des Etançons. Gauche : hauteur de neige. Droite : équivalent en eau du manteau neigeux. La station nivôse des Ecrins est localisée sur la carte. Source : CNRM/CEN.

La neige présente en haute-montagne est, au 19 juin, largement humidifiée par la fonte marquée des jours précédents. L'utilisation d'images satellites radar permet de qualifier la présence de neige très mouillée ou saturée en eau, et met en avant l'année 2024 avec un signal plus tardif que les années précédentes (Figure 51).

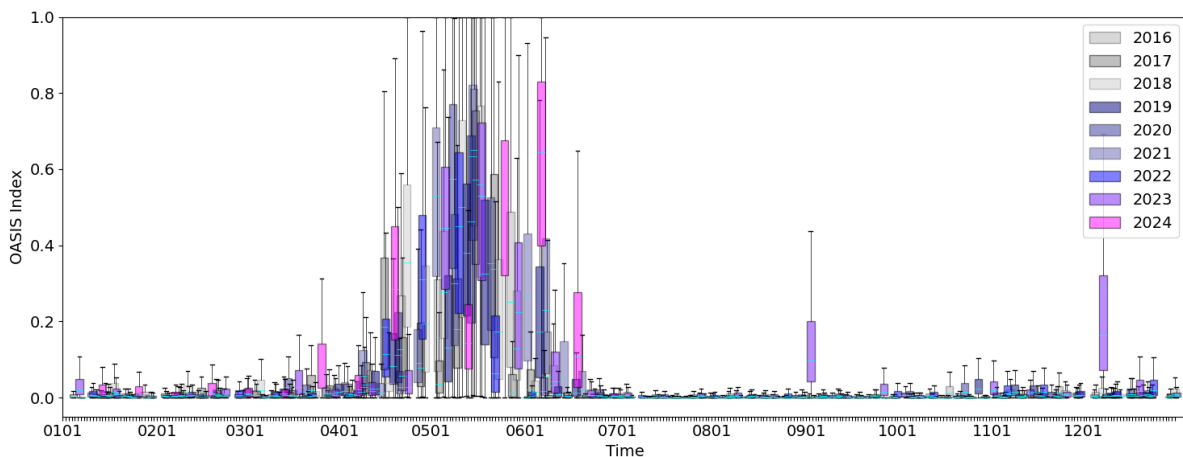


Figure 51: Evolution du 1er janvier au 31 décembre de l'indice OASIS permettant de caractériser la présence d'eau et de neige humide en surface à partir d'images satellites radar Sentinel-1. La zone étudiée se situe sur le glacier de Bonne Pierre, autour du lac supraglaciaire. Source : CNRM/CEN.

La présence de la station nivôse Météo-France des Ecrins, à 2970 m d'altitude dans le vallon de Bonne Pierre, permet de caractériser la rareté d'un tel enneigement à cette date. La hauteur de neige pour la saison 2023-2024 est approximativement **deux fois supérieur à la hauteur de neige médiane** pour la période 1991-2020. Au 19 juin, la hauteur de neige est supérieure à la valeur dépassée en moyenne une fois tous les 10 ans. Sur l'historique de la station nivôse depuis 1983, l'enneigement du 19 juin 2024 n'est dépassé à la même date qu'en 2001 et 2013, ce qui se traduit par une période de retour empirique de l'ordre de 15 ans.

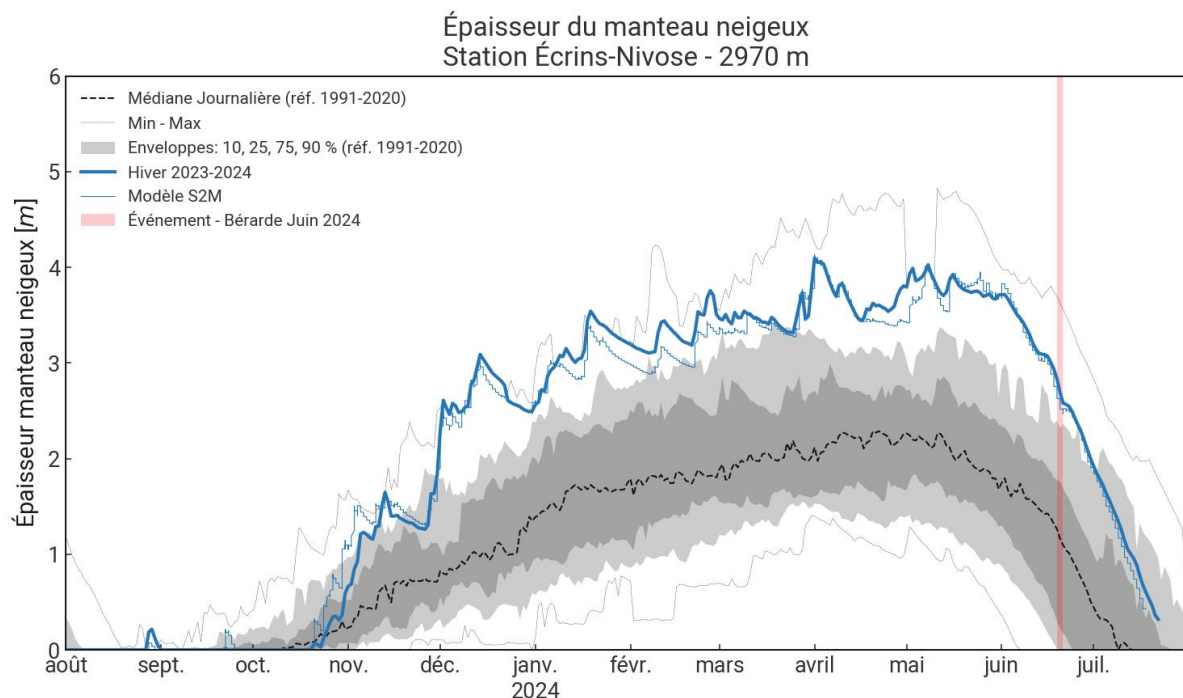


Figure 52: Épaisseur du manteau neigeux à la station nivôse des Ecrins (44.94N, 6.35E) pour l'hiver 2023-2024 (trait bleu) en rapport à la climatologie des observations de 1991 à 2020. Source : CNRM/CEN.

En parallèle, la période de retour de l'enneigement a été estimée à partir des séries longues de mesures d'accumulation nivale sur des glaciers proches (généralement mesurées en fin de printemps/début d'été). La période de retour de l'accumulation nivale de 2024 sur le glacier de Sarenne dans le massif des Grandes Rousses vers 2900 m d'altitude **est estimée à 15 ans**. L'enneigement de 2024 se classe à la 7^e position sur les 76 années d'observation. La période de retour de l'accumulation de 2024 sur le glacier Blanc entre 2800 m et 3300 m d'altitude est estimée à **environ 20 ans** (25 années de mesure).

La période de retour de l'enneigement en haute-montagne avant l'évènement est donc de l'ordre

de 15 à 20 ans.

5.2.2. La fonte nivale pendant l'évènement

L'arrivée de la masse d'air douce et humide par le sud a favorisé une fonte intense du manteau neigeux en altitude, qui était saturé par la fonte des jours précédents. Pour indication, les températures à la station nivôse de Bonne Pierre ont atteint 12.5°C le 19 juin (2970 m d'altitude).

Les images satellites du bassin versant avant et après évènement sont présentées en Figure 53. L'évolution du couvert neigeux ne peut pas simplement être imputé à l'évènement puisque 10 jours séparent les deux images. Néanmoins, nous pouvons noter :

- **Le 17 juin** : un manteau neigeux orange/ocre, couvert par une accumulation de dépôt de poussières de sable du Sahara, diminuant l'albédo et accélérant donc la fonte en période d'ensoleillement. Les zones plus blanches en altitude suggèrent un apport de neige récent ;
- **Entre le 17 et le 27 juin** : un manteau neigeux de couleur homogène qui suggère une fonte à toutes les altitudes. Le recul de l'enneigement est bien visible, avec un bassin versant enneigé à 59% le 17 juin et à 48% le 27 juin.

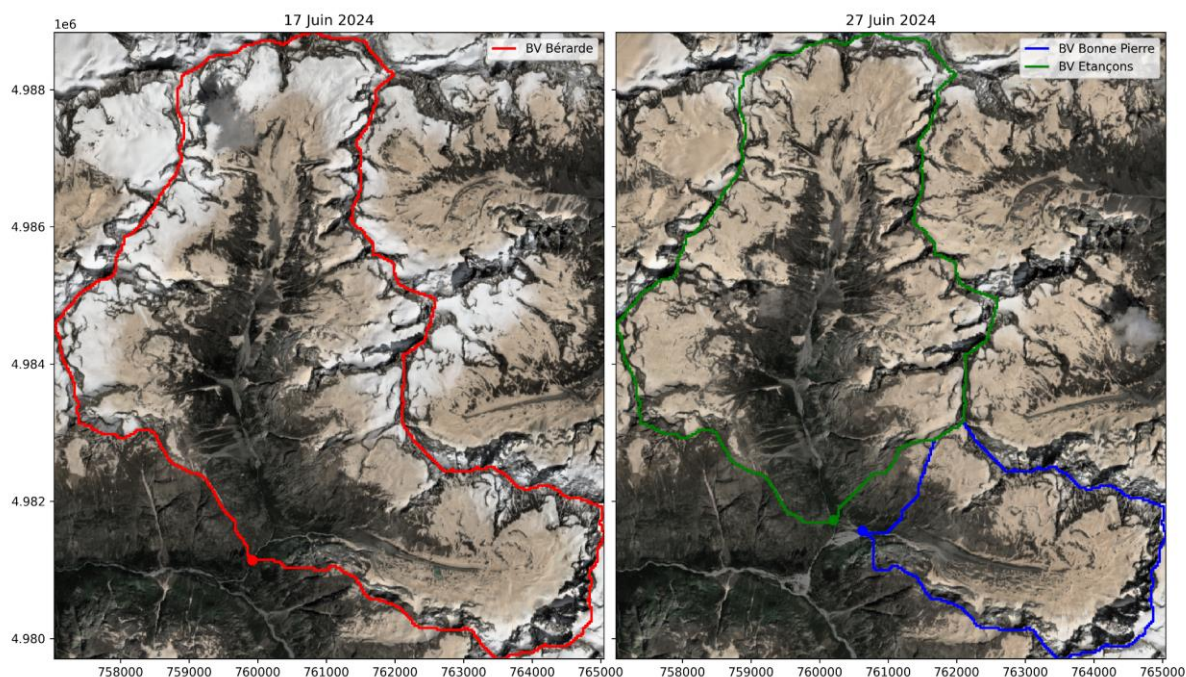


Figure 53: Images du satellite Sentinel-2 le 17 et 27 juin 2024. Les images permettent d'appréhender le couvert neigeux sur l'ensemble de la région en amont du hameau de la Bérarde, ainsi que les zones de dépôts générées par la crue entre les deux dates. Les limites du bassin versant et des sous-bassins versants sont mises en évidence. Source : CNRM/CEN.

Le modèle S2M permet d'estimer la fonte nivale pendant l'évènement, entre le 19 juin 12h et le 21 juin 12h (Figure 54). En 48h, le manteau neigeux a perdu localement jusqu'à 40 cm d'épaisseur. Cela se traduit par une perte d'équivalent en eau pouvant atteindre 140 mm sur les tranches d'altitude enneigées les plus basses.

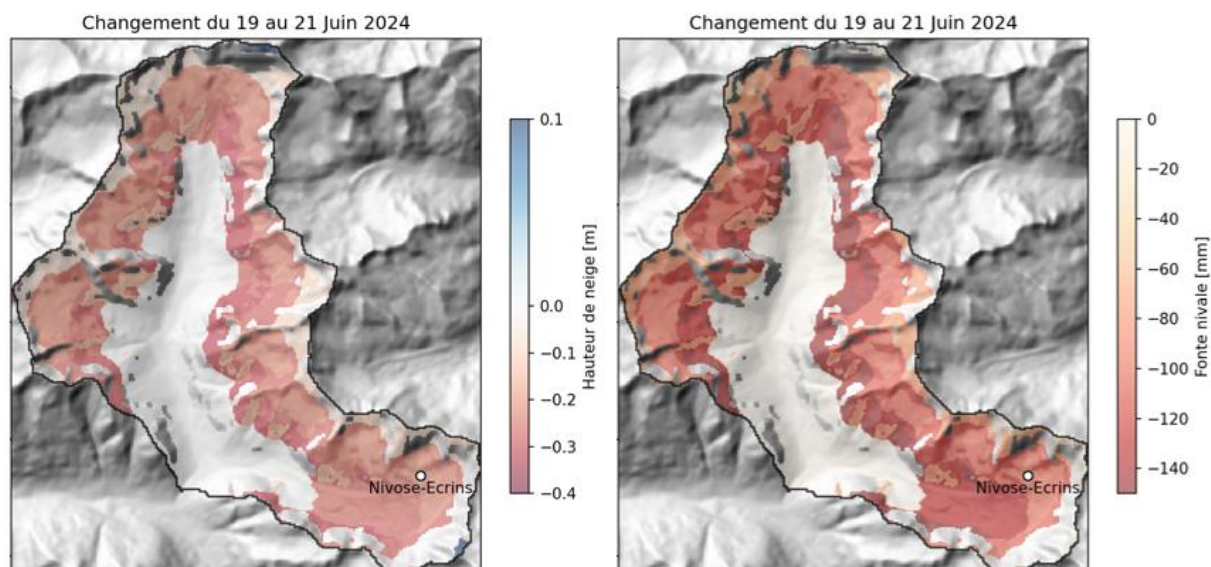


Figure 54: Fonte en hauteur de neige (gauche) et équivalence en eau du manteau neigeux (droite) sur le bassin versant du torrent des Etançons du 19 juin 14h au 21 juin 14h, selon le modèle S2M. Source : CNRM/CEN.

L'agrégation de cette fonte nivale à l'échelle du bassin versant et des sous-bassins permet d'estimer la contribution de la fonte nivale aux écoulements (Tableau 7). La contribution nivale est plus importante sur le bassin versant du torrent de Bonne Pierre, dont les altitudes sont supérieures au bassin versant du torrent des Etançons amont. La fonte nivale a donc ajouté à la pluie une lame d'eau **de l'ordre de 75 à 95 mm en 48h. Elle représente donc une contribution de l'ordre de 35% à 40% à la lame d'eau totale (pluie+fonte).**

Bassin versant	Etançons	Etançons amont	Bonne Pierre
Fonte nivale (mm)	75	72	94

Tableau 7: Contribution en eau de la fonte nivale estimée à partir des données S2M rapportée aux bassins versants entre le 19 juin 14h et le 21 juin 14h. Source : CNRM/CEN.

Il est par ailleurs intéressant de noter que la fonte marquée du manteau neigeux s'est initiée avant l'arrivée de l'essentiel des précipitations. La fonte estimée entre le 18 juin 10h et le 20 juin 10h est ainsi plus forte que celle affichée dans le Tableau 7.

5.2.3. Caractérisation de la fonte

La fonte nivale au cours de l'évènement a été mise en regard de l'historique modélisée sur le bassin versant des Etançons (Figure 55). Cette figure met en évidence que la fonte observée lors de l'évènement compte parmi les plus fortes valeurs de l'historique. Elle montre aussi que le mois de juin est associé aux valeurs de fonte nivale les plus élevées.

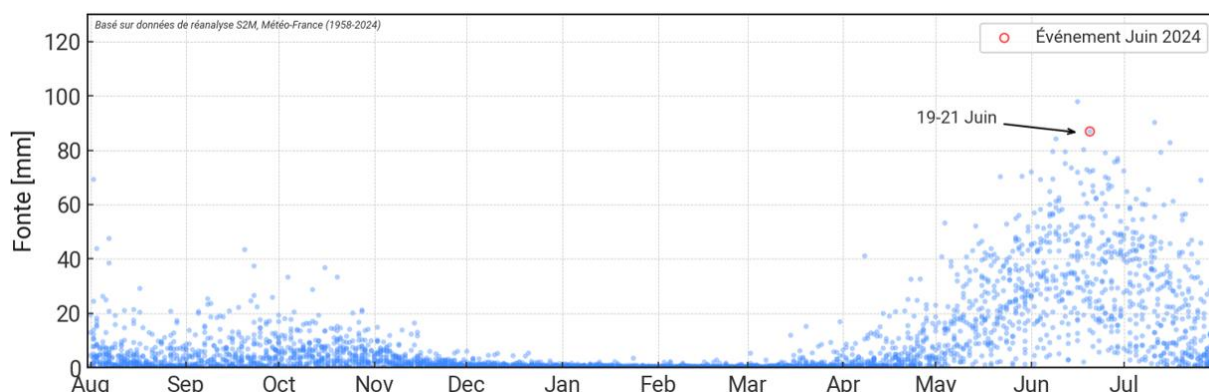


Figure 55: Saisonnalité des lames d'eau de fonte sur 48h sur le bassin versant des Etançons sur la période 1958-2024. L'épisode du 19 juin 7h au 21 juin 7h est mis en évidence. Source : CNRM/CEN.

Ainsi la période de retour d'une telle fonte sur 48h **est estimée à environ 20 ans.**

5.3. Caractérisation de la lame d'eau totale

Les précédents paragraphes mettent en évidence les ordres de grandeur des lames d'eau issues de la pluie et de la fonte nivale. L'analyse des pluies (précipitations liquides) montre qu'il est relativement rare

d'observer de telles lames d'eau au mois de juin. Les valeurs de pluie les plus fortes sont généralement observées en milieu d'été et en début d'automne, en l'absence de couverture neigeuse importante.

Nous estimons donc la période de retour associée à la concomitance de la pluie et de la fonte en considérant la lame d'eau totale sur le bassin versant du torrent des Etançons. La plus forte lame d'eau estimée sur 48h concerne la période du 19 juin 7h au 21 juin 7h, avec une période de retour estimée **de l'ordre de la centennale**. La Figure 56 met en avant la rareté d'une telle combinaison de pluie et de fonte.

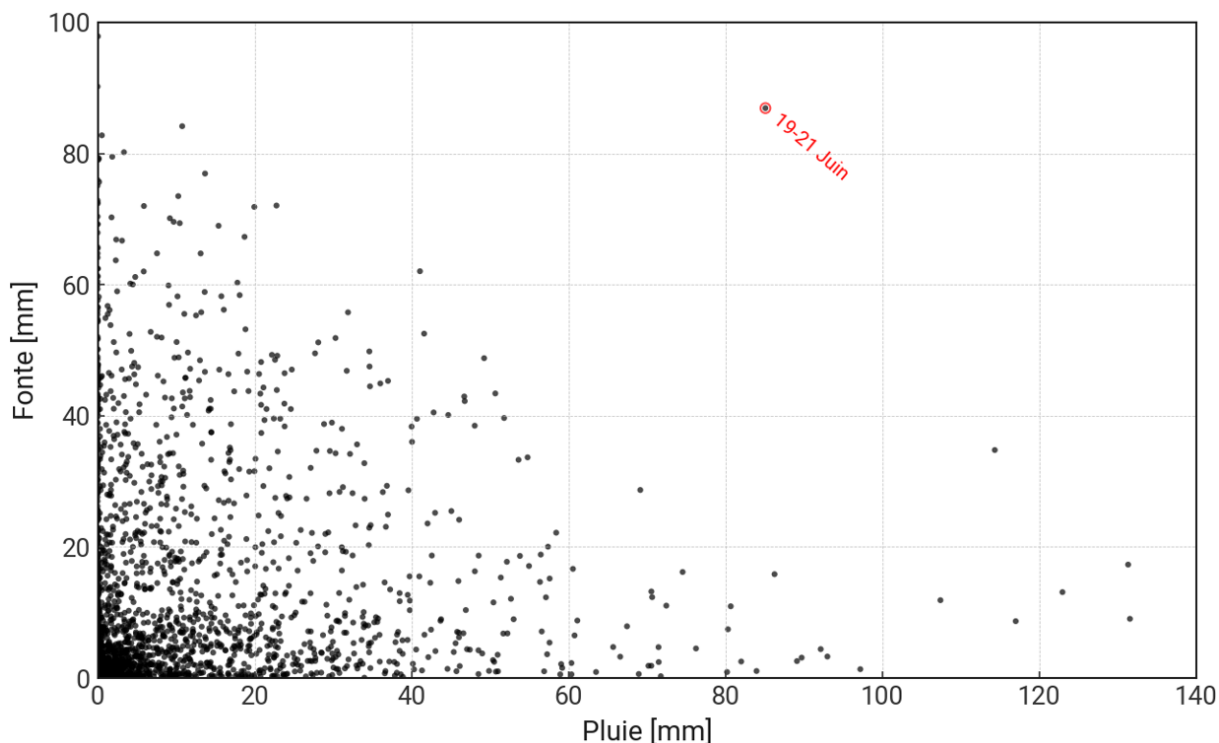


Figure 56: Caractérisation de rareté de la concomitance de l'événement de pluie et de fonte du 19 juin 7h au 21 juin 7h. Source : CNRM/CEN.

5.4. Résumé

Les analyses météorologiques et nivologiques ont mis en évidence les points suivants :

- En juin 2024, la quantité de neige est **importante en haute-montagne**. La période de retour d'un tel enneigement est de l'ordre de **15 à 20 ans** ;
- A partir du 18 juin, l'arrivée d'une masse d'air très douce en provenance du sud-ouest puis du sud a provoqué **une fonte nivale marquée**. Les taux de fonte les plus forts sont observés le 19 et le 20 juin. La période de retour de la fonte entre le 19 et le 21 juin sur le bassin versant des Etançons **est estimée à 20 ans** ;
- Des cumuls importants ont été relevés à la station de Saint-Christophe-en-Oisans correspondant à une période de retour **d'environ 10 ans**. Sur le bassin versant des Etançons on peut estimer le cumul de précipitations de l'ordre de 130 mm en 48h, avec une limite pluie-neige oscillant entre 3500 m et 4000 m d'altitude. Il n'est pas possible de qualifier une période de retour pour ces cumuls.
- Les pluies les plus fortes sont généralement observées en milieu d'été et en début d'automne sur le bassin versant des Etançons, en l'absence de couverture neigeuse importante. Ici, la concomitance des fortes pluies et de la fonte nivale très marquée aboutit à **une lame d'eau rare sur 48h**.

6. Le glacier de Bonne Pierre

Le torrent de Bonne Pierre prend sa source dans le glacier du même nom. L'importance de cette forme glaciaire dans le fonctionnement hydrologique du torrent et les remontées d'informations sur un lac supraglaciaire vidangé ont motivé des analyses diverses sur ce glacier dans le cadre de la rétro-analyse. Cette partie s'attache à présenter le glacier et son évolution, les connaissances acquises sur le lac supraglaciaire, et les observations de terrain faites après l'évènement.

6.1. Description et évolution

Le glacier de Bonne Pierre est un glacier couvert situé dans un large cirque nord à ouest, sous les sommets du Flambeau des Ecrins (3551 m), du Clocher des Ecrins (3808 m), du Dôme des Ecrins (4015 m), et de Roche Faurio (3730 m). En 2022, le glacier représente une surface de 1.74 km² pour une longueur de 3508 m. La pente moyenne du glacier est faible (16.3°), et le front se situe à 2400 m d'altitude (Figure 57).

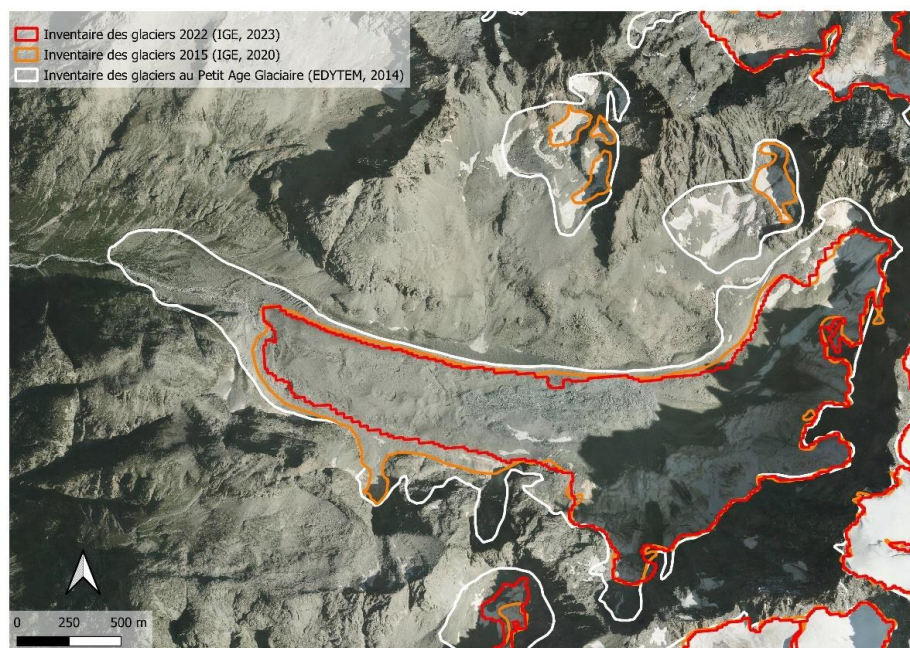


Figure 57: Glacier de Bonne Pierre au Petit Age Glaciaire, en 2015 et en 2022. Les sources des inventaires sont mentionnées dans la légende de la carte.

Le glacier est alimenté en débris par les chutes de blocs, écroulements et avalanches des faces nord et ouest constituant le cirque. Pour exemple, un écroulement important a été observé le 17 juillet 2016 sur le glacier. Un volume **de plusieurs centaines de milliers de mètres cubes** s'est détaché de la face nord du Flambeau des Ecrins avant de s'étaler sur le glacier dans une matrice de roche et de neige (Figure 58). Cet évènement récent illustre bien le type de phénomène alimentant en matériaux la surface du glacier.



Figure 58: Gauche : localisation du dépôt de l'écroulement du 17 juillet 2016 issu du Flambeau des Ecrins (source : IGE). En bleu est cerclée la zone de la dépression qui formera le lac de 2024. Droite : photographie aérienne du dépôt (source : PGHM).

6.1.1. Evolution de la surface du glacier

L'évolution du glacier de Bonne Pierre n'est pas mesurée dans le cadre de l'observatoire GLACIOCLIM, à la différence du glacier Blanc voisin. Néanmoins, l'utilisation de cartes anciennes, d'images aériennes et satellites ont permis de reconstituer l'évolution du glacier depuis le dernier maximum du Petit Age Glaciaire (PAG, milieu du XIX^e siècle).

Le glacier de Bonne Pierre a ainsi reculé d'un peu plus de 1 km depuis son maximum du PAG, soit une moyenne de -5,5 m/an. C'est presque **trois fois moins** que la vitesse de retrait observée au glacier Blanc (-14 m/an), la plus longue série dont on dispose pour un glacier à proximité, et deux fois moins qu'au glacier Noir (-10 m/an), situé lui aussi à proximité du vallon de Bonne Pierre. Ce retrait n'est cependant pas régulier dans le temps :

- Le retrait est assez rapide entre la sortie du PAG et les années 1920 (-9 m/an) ;
- Le retrait est peu marqué entre 1930 et le début des années 2000 (-1,7 m/an) ;
- Le retrait est soutenu depuis 2010 (-11 m/an).

L'évolution des surfaces établie à partir des mêmes documents indique que le glacier de Bonne Pierre a perdu environ une centaine d'hectares depuis 1820, ce qui représente **une perte de 55% de sa surface maximale du PAG**, soit en moyenne -2,8% par décennie (Figure 59). C'est moins que le glacier Blanc qui a régressé en surface à un taux de -3,6% par décennie entre 1853 et 2019.

En résumé, les pertes de surface et de longueur du glacier de Bonne Pierre au cours des 150 dernières années **sont plus faibles que celles du glacier Blanc et du glacier Noir**.

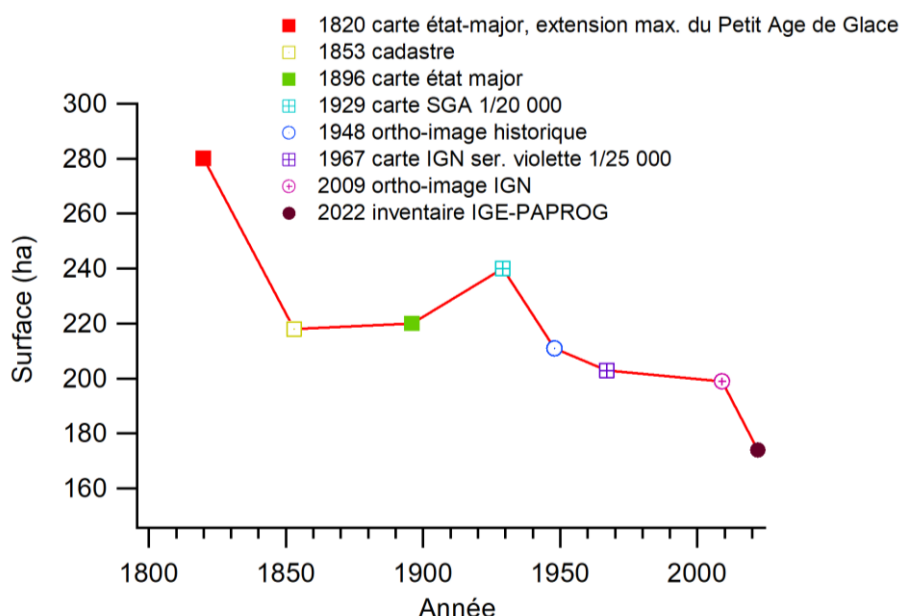


Figure 59: Évolution de la surface du glacier de Bonne Pierre depuis le Petit Âge Glaciaire à partir de quelques documents cartographiques et d'imagerie aérienne et satellite. Source : IGE.

6.1.2. Bilan de masse

Depuis 2014, l'utilisation des images satellites permet de reconstituer la topographie de surface. Il est ainsi possible de produire des différentiels d'altitude pour observer les pertes et gains d'épaisseur sur les glaciers (Figure 60).

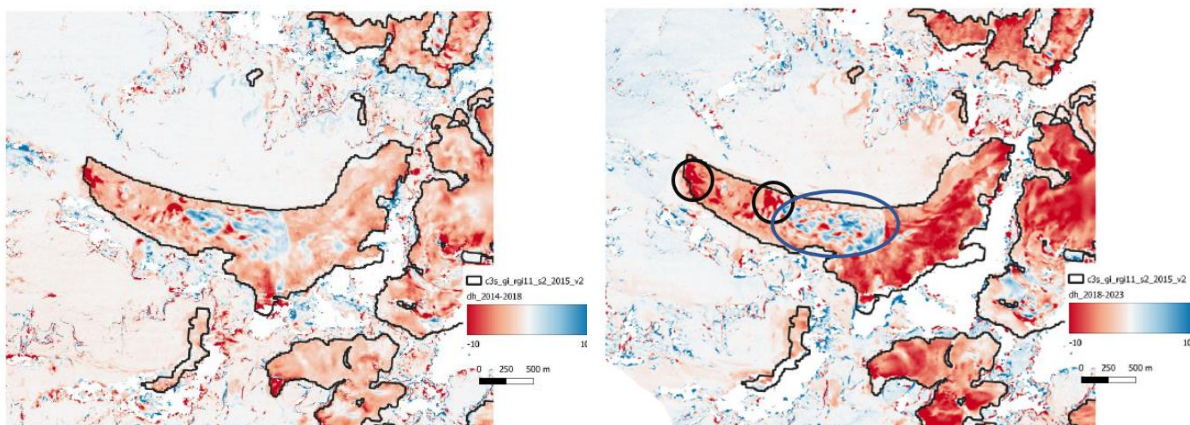


Figure 60: Cartes des changements d'altitudes entre 2014 et 2023 centrées sur le glacier de Bonne Pierre. Gauche : 2014-2018. Droite : 2018-2023. Rouge : abaissement. Bleu : réhausse. Les cercles indiquent les principales zones d'intérêt commentées par la suite. Source : LEGOS.

Les cartes des changements d'altitude montrent que :

- La partie centrale du glacier de Bonne Pierre située entre 2600 et 2750 m d'altitude s'épaissit entre 2014 et 2023. La zone d'épaississement (zone entourée en bleu sur la Figure 60) correspond à la zone de dépôt de matériaux de l'éboulement du 17 juillet 2016. Au-delà du dépôt en tant que tel expliquant l'épaississement entre 2014 et 2018, le gain d'épaisseur entre 2018 et 2023 pourrait s'expliquer par un ralentissement de la fonte sur cette zone (isolement par les dépôts) couplé à l'écoulement de la glace (apports en glace depuis l'amont) ;
- La langue terminale et la zone d'accumulation en amont de cette zone d'épaississement subissent des pertes d'épaisseur. Ces pertes d'épaisseur sont irrégulières : elles sont fortes sur la langue terminale du glacier et dans la zone de formation du lac (zones entourées en noir sur la Figure 60).

L'intégration de ces différences d'altitude à l'échelle du glacier permet d'estimer le bilan de masse. Le bilan de masse global de Bonne Pierre est de -0.54 m d'eau par an (± 0.3 m) sur la période 2014-2018 et de -0,82 m d'eau par an (± 0.25 m) sur la période 2018-2023. En comparaison, le bilan de masse du glacier Blanc sur ces périodes est de -1.15 m et -1.54 m d'eau par an. **La couverture détritique à la surface du glacier de Bonne Pierre** est à l'origine de ces bilans de masse moins déficitaires que ceux mesurés au glacier Blanc (voisin et donc exposé au même climat, mais non couvert).

6.1.3. Vitesses de surface

L'analyse des images aériennes et satellites a aussi permis d'estimer les vitesses de surface du glacier sur la période 2003-2024 (Figure 61).

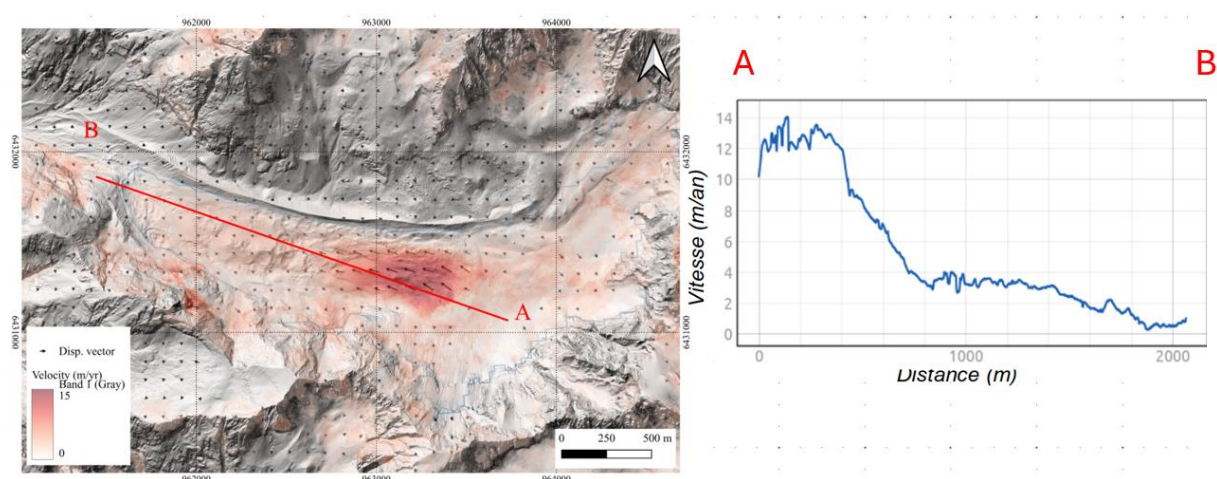


Figure 61: Carte de vitesse d'écoulement du glacier de Bonne Pierre moyennée sur la période 2003-2024 établie à partir des images aériennes et satellitaires à haute résolution (1 m). Profil de vitesse obtenu le long de la ligne longitudinale d'écoulement A-B. Source : ISTerre.

Les vitesses de surface montrent des valeurs contrastées :

- Vitesses faibles de l'ordre de **3 à 4 m/an** sur la partie aval du glacier ;
- Vitesses de l'ordre de **13 à 16 m/an** au centre du glacier, potentiellement liées à une évolution

de la dynamique suite à l'écroulement de 2016.

L'analyse de l'évolution des vitesses de surface montre **une diminution des vitesses depuis 2016** en aval des dépôts de l'écroulement, contrairement à la partie amont où la vitesse reste constante. Le ralentissement de l'écoulement sur la partie aval du glacier semble cohérent avec le ralentissement observé au glacier Noir à 2400 m d'altitude, à quelques kilomètres de là.

6.1.4. Dépressions de surface

La topographie de surface du glacier de Bonne Pierre est très chahutée. Une analyse diachronique s'est donc intéressée à l'évolution de l'état de surface du glacier, en recensant les dépressions sur les images satellites (exemple en Figure 62).

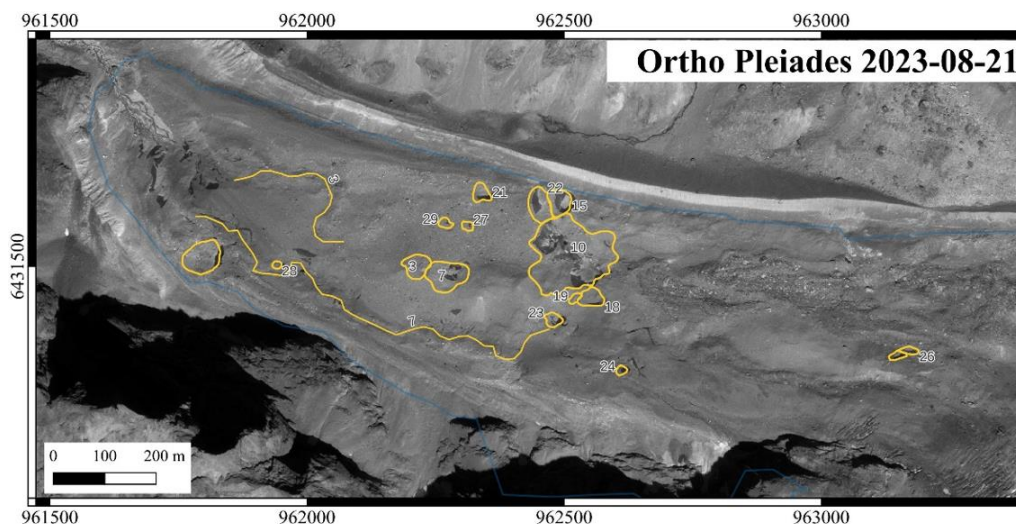


Figure 62: Dépressions de surface recensées sur l'image Pléiades d'août 2023. Source : ISTerre.

Cette analyse montre que le nombre de dépressions de surface sur le glacier de Bonne Pierre est en augmentation depuis les années 2000 (Figure 63). La surface totale des dépressions est estimée à environ 40 000 m² en 2024.

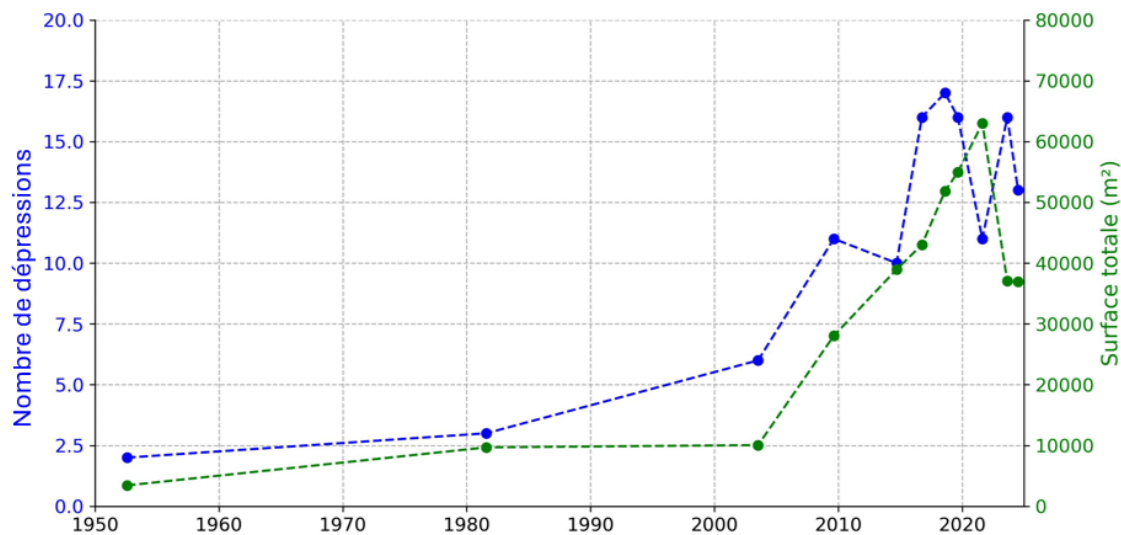


Figure 63: Evolution du nombre de dépressions et surface totale des dépressions. Source : ISTerre.

Pour résumer, le glacier de Bonne Pierre est associé à des pertes de masse et de surface plus faibles que les glaciers voisins au cours des 150 dernières années, probablement en partie du fait de la couverture détritique limitant la fonte. Depuis les années 2000, une perte de masse plus importante est observée, tout comme l'apparition de dépressions de surface sur la partie aval du glacier. Depuis 2016, un ralentissement de l'écoulement de la partie aval du glacier est aussi observé.

6.2. Le lac supraglaciaire

Un lac supraglaciaire était présent sur le glacier de Bonne Pierre avant l'évènement (dernière image optique du lac le 17 juin, suggestion de présence du lac sur l'image radar Sentinel-1 du 20 juin à 19h33). Ce lac était vide le 22 juin, au lendemain de l'évènement (Figure 64).

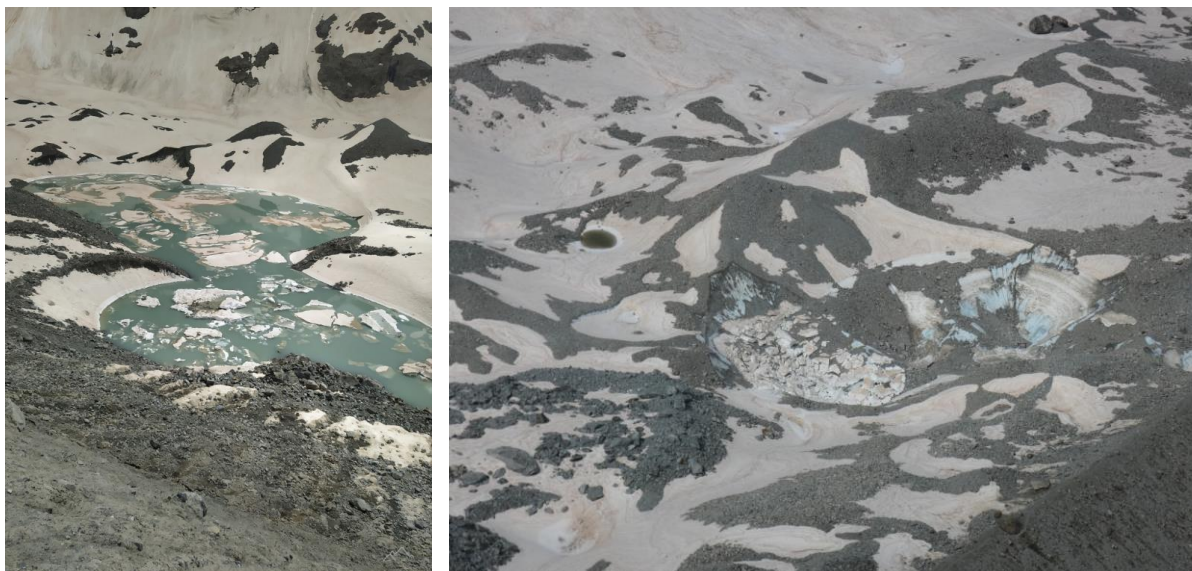


Figure 64: Lac supraglaciaire de Bonne Pierre le 13 juin 2024 (gauche, source : Camp2Camp) et le 22 juin 2024 (droite).

Ce lac se situe en rive droite du glacier, à environ 700 m du front, à 2575 m d'altitude (Figure 65). Il prend place au sein de plusieurs dépressions de surface mises en évidence en Figure 62.

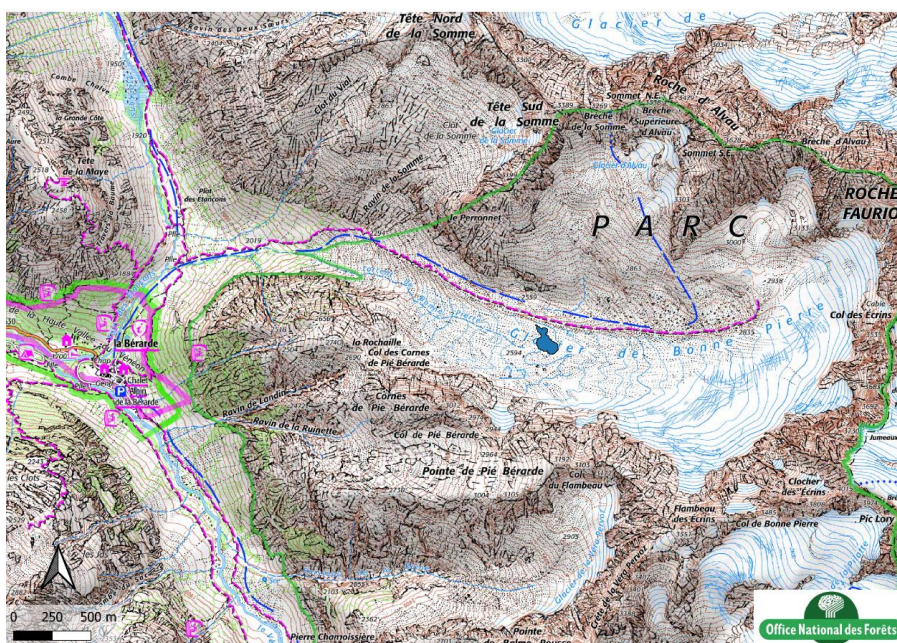


Figure 65: Emplacement du lac supraglaciaire, en bleu

Les mesures topographiques après évènement et les traces de marnage dans la neige ont permis d'estimer la surface du lac en 2024 à **14 000 m²** pour un volume de l'ordre de **100 000 m³** (Figure 66). Il est à noter que le niveau du lac semble contrôlé par un point bas présent à l'extrémité nord-ouest du lac. La cote estimée du lac ne peut donc pas être plus élevée.

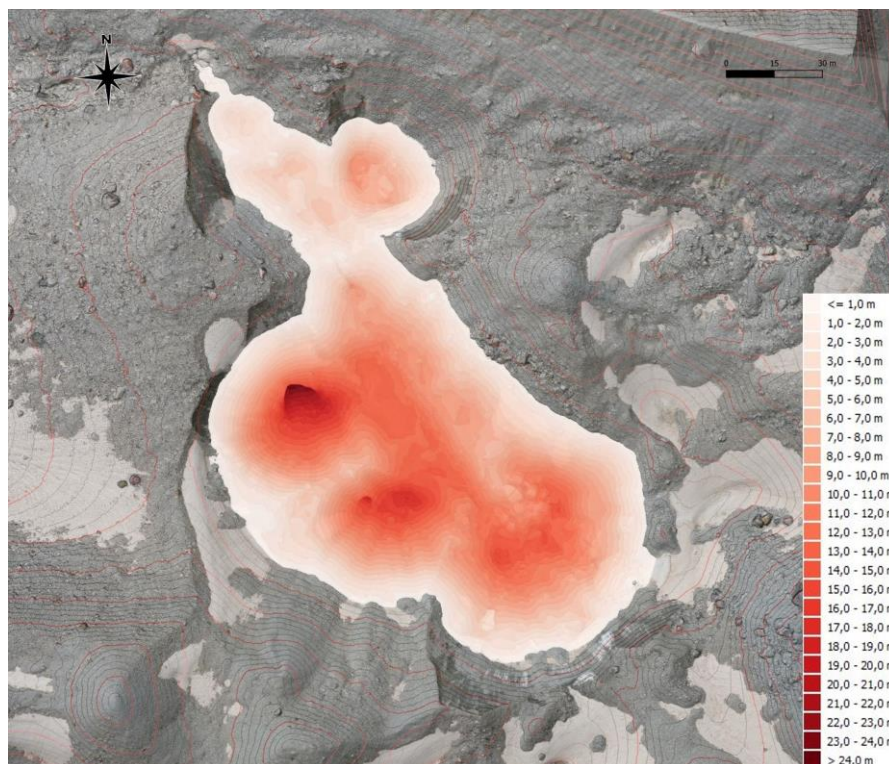


Figure 66: Contour et profondeur d'eau du lac supraglaciaire en juin 2024. Les profondeurs mettent bien en avant les différentes dépressions qui forment le lac.

L'analyse des images satellites au cours des 10 dernières années montre que :

- Les premières traces de ce lac sont visibles **en 2016** (Figure 67). La surface du lac (et donc potentiellement son volume) a progressivement augmenté entre 2016 et 2024. En 2023, la surface du lac est du même ordre de grandeur que celle de 2024 ;
- **Le lac est saisonnier** : il n'est visible qu'en fin de printemps et début d'été sur une période de quelques semaines, avant de disparaître. La disparition du lac en été s'effectue sur une période relativement courte, sans qu'une crue n'ait été observée en aval du glacier ces dernières années. En 2023, le lac est plein sur les images du 28 juin et est presque entièrement vide sur les images du 3 juillet.

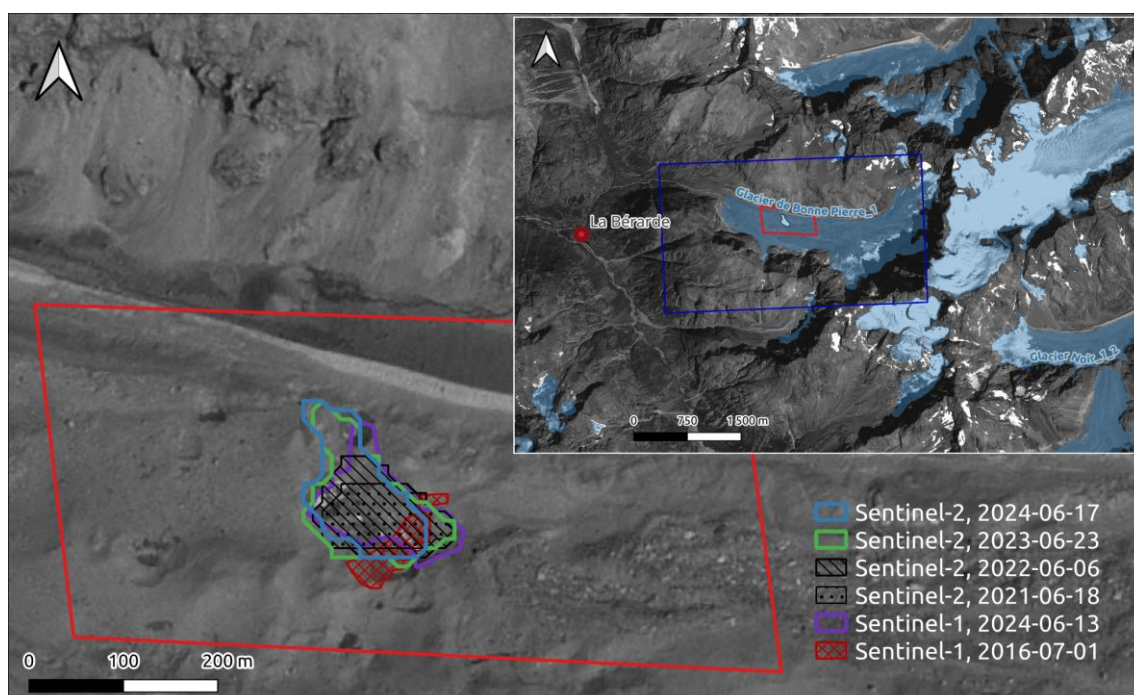


Figure 67: Le glacier de Bonne Pierre et les contours du lac dérivés des satellites de 2016 à 2024 sur fond d'image SPOT-7 du 08-08-2023. Source : CNRM/CEN.

6.3. Les observations de terrain

Aucune observation ne permet de qualifier précisément l'heure de la vidange ni sa durée, ou encore l'intensité des débits en aval du glacier. Les observations de terrain après l'évènement permettent cependant d'émettre des hypothèses sur ce phénomène glaciaire.

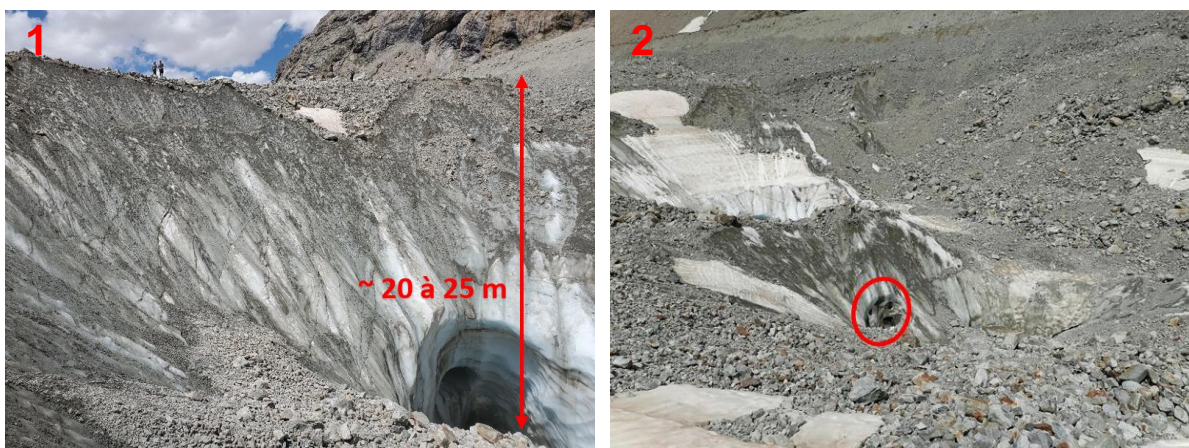
6.3.1. Le lac supraglaciaire

Les visites de terrain post-évènement ont permis de mettre en avant un certain nombre d'observations sur la vidange du lac :

- **En aval du lac** : aucune trace de surverse n'est visible en surface du glacier. La vidange s'est donc effectuée par des conduits intra-glaciaires ou sous-glaciaires. De manière plus générale sur le glacier, aucun signe ne suggère de débordement des bédrières (pas de « lessivage » des débris de surface). Il n'y a donc pas eu d'apport important en eau par la surface du glacier ;
- **Au niveau du lac** : un conduit de grosse section est visible dans la dépression la plus à l'aval ayant formé le lac. Ce conduit, d'un diamètre de 1.5 à 2 mètres environ, présente une pente très forte et semble se prolonger dans les entrailles du glacier. Un second conduit supérieur est visible. Il est horizontal et bouché, avec quelques sédiments déposés au fond. Cette galerie mesure 3 m de largeur à sa base environ et 2.50 m de hauteur au maximum. La visite effectuée le 28 juin 2024, une semaine seulement après l'évènement, a permis d'observer un autre conduit dans la dépression voisine ainsi qu'une crevasse reliant certaines dépressions. Les photographies prises par hélicoptère le 22 juin suggèrent aussi un/des conduits dans la petite dépression en rive droite du glacier (Figure 68, Figure 69, Figure 70) ;
- **En amont du lac** : une petite dépression qui semblait remplie d'eau vers 2600 m d'altitude, est également vide après l'évènement et faisant apparaître un conduit de vidange de petite section (Figure 70).



Figure 68: Emprise du lac supraglaciaire en bleu, et localisation des conduits observés le 28 juin (et par hélicoptère le 22 juin pour le n°4). Le fond de l'image est l'orthophotographie du 28 juin 2024 (source : Helimap).



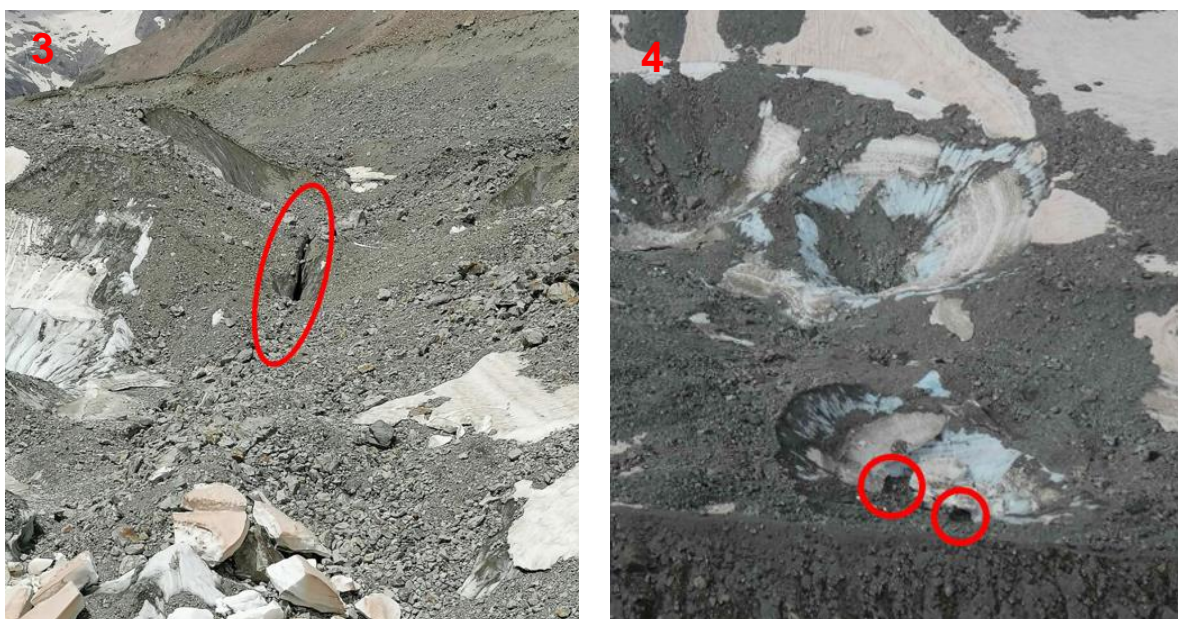


Figure 69: En haut à gauche : conduit n°1 de la Figure 68, dans la dépression située la plus en aval. En haut à droite : conduit n°2 de la Figure 68, situé dans la dépression voisine. En bas à gauche : crevasse (n°3 de la Figure 68) reliant plusieurs dépressions. En bas à droite : n°4 de la Figure 68, à proximité de la moraine latérale.



Figure 70: dépression vide et conduit apparent, en amont du lac vers 2597 m d'altitude.

La vidange du lac s'est donc effectuée par des conduits intra-glaciaires. Il n'est pas possible d'estimer un hydrogramme de vidange du lac en l'absence de connaissance des sections les plus limitantes des conduits empruntés, ni sur l'évolution de leur section pendant la vidange.

Par ailleurs, le conduit n°1, le plus imposant, est visible sur l'image satellite Pléiades du 15 octobre 2023, ce qui montre que cette forme ne s'est pas entièrement créée en 2024 (Figure 71).

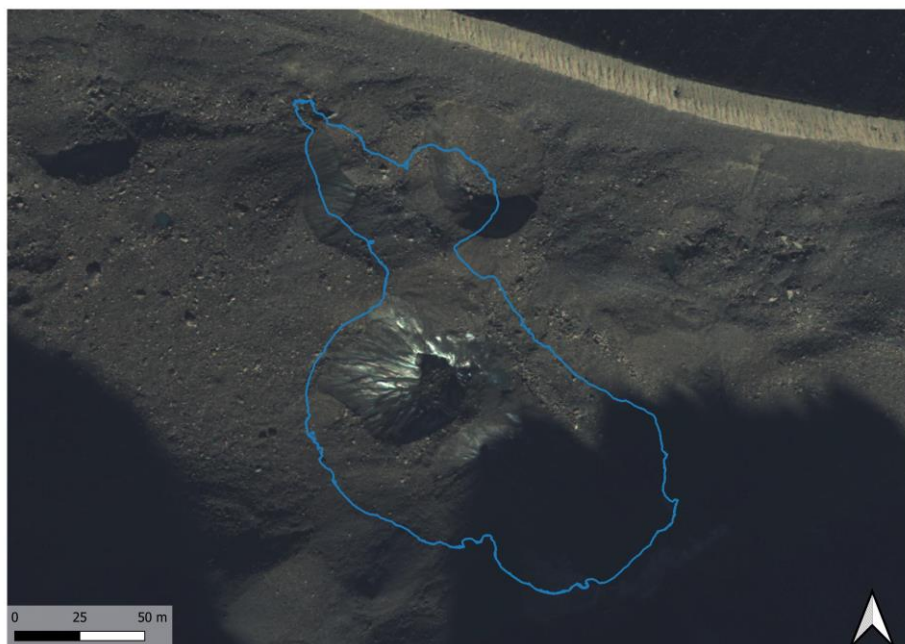


Figure 71: Emprise du lac en 2024 sur fond de l'image satellite Pléiades du 15 octobre 2023. Le conduit n°1 est visible au centre de l'image. Source : Pléiades © CNES _2023, Distribution AIRBUS DS, tous droits réservés. Usage commercial interdit.

6.3.2. Le front du glacier

Le front du glacier laisse apparaître une large voute en rive droite, d'environ 70 m², par laquelle ont probablement transité la plupart des écoulements pendant l'évènement. Le fond du chenal sous glaciaire est de type sédimentaire, avec les plus gros blocs de taille métrique (Figure 72). Ces sédiments ont été érodés par les écoulements sur plusieurs mètres.

Le 11 juillet 2024, le chenal sous glaciaire était très chargé, comme si l'écoulement sous glaciaire, 13 jours après la crue, n'avait pas fini de lessiver de nouvelles incisions ou de nouveaux chenaux à la base sédimentaire du glacier. Lors de la visite du 18 septembre, il n'y avait plus qu'un écoulement très faible dans ce chenal sous glacier, la plupart des écoulements arrivant par le deuxième chenal sous-glaciaire en rive gauche du front.



Figure 72: Comparaison de la section du chenal sous-glaciaire au front du glacier entre le 11 juillet et le 18 septembre 2024. On note le recul du front et l'élargissement de la voute en glace du chenal. Source : IGE.



Figure 73: Front du glacier de Bonne Pierre. Bédière principale et charge en matières en suspension du torrent émissaire le 11 juillet 2024. Source : IGE.

Une grande partie de l'écoulement drainant le lac, la couverture nivale et la pluie, est donc passée à la base du glacier en interface avec les sédiments sous-glaciaires.

6.3.3. L'écroulement de surface

Les visites du 18 septembre et 4 octobre ont permis l'observation de l'effondrement d'une cavité à une centaine de mètres à l'amont du front (Figure 74, Figure 75). Cet effondrement n'était pas visible le 7 août. Le volume de la cavité est de l'ordre de 5000 à 10 000 m³. Des deux côtés amont/aval sont visibles deux chenaux hydrauliques dont la section est de l'ordre du m² et qui pourraient être des chenaux d'alimentation et de vidange de cette cavité. Celle-ci se serait donc développée en « hernie » sur le conduit pour une raison à identifier (barrière hydraulique type puit de potentiel). La barrière thermique (langue terminale froide) semble peu probable vu la basse altitude du front du glacier et la faible vitesse d'écoulement du glacier. La forme de la cavité et la présence de ces conduits laissent penser à une origine hydraulique pour l'ouverture de cette cavité dans le glacier. Le plafond montre des signes de fracturation probablement causés par décompression après une mise en charge hydraulique lors de la phase de croissance du volume de la cavité.

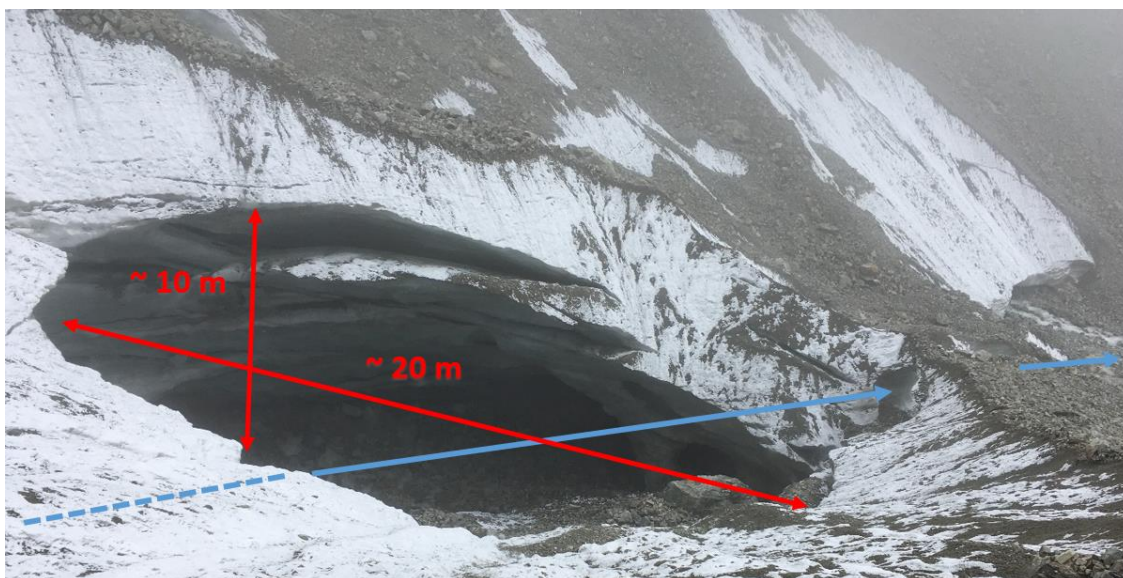


Figure 74: Cavité effondrée à l'amont du front du glacier, signes de décompression du plafond et alignement des deux chenaux d'alimentation et de vidange (4 octobre 2024, © E. Thibert-IGE).

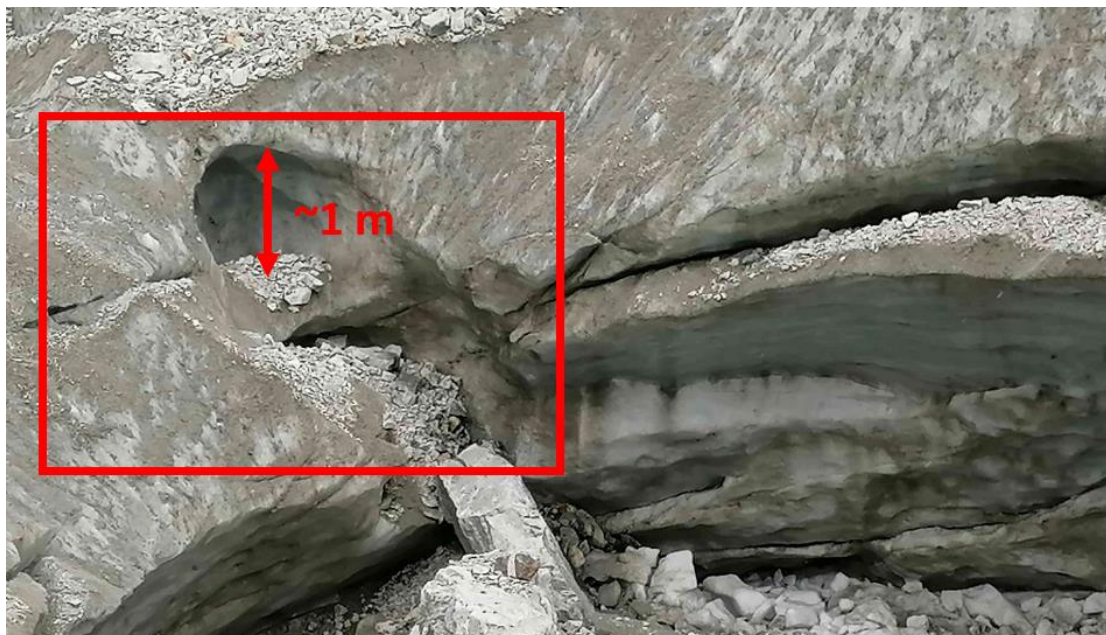


Figure 75: Conduit intra-glaciaire de vidange situé en aval de la cavité effondrée en amont du front du glacier.

La géométrie demi-sphérique et la taille de la cavité semblent indiquer que celle-ci s'est formée par la pression de l'eau dont la circulation à l'aval a été empêchée ou limitée (barrière hydraulique). L'agrandissement de la cavité, causé par le fluage de la glace sous l'effet de la pression d'eau, est un processus relativement lent. Par exemple, la cavité de Tête Rousse découverte en 2010 avec un volume d'environ 55 000 m³, aurait mis au moins 30 ans pour atteindre ce volume. Même si la cavité découverte à 100 m du front du glacier de Bonne Pierre est 10 fois plus petite, il est probable que sa formation ait duré plusieurs années.

La présence de cette cavité sur le chemin de vidange du lac principal pose la question du chemin emprunté par les précédentes vidanges du lac les années précédentes. En effet, il semble peu probable que les vidanges antérieures à 2024 aient traversé cette cavité, sans que celle-ci ne se vidange. Au contraire, la vidange de 2024 semble avoir emprunté un chenal traversant cette cavité. Il est possible, étant donné la topographie très tourmentée et en évolution rapide de la surface du glacier, que les cheminements hydrologiques sous et intra-glaciaire soient fortement tortueux et évoluent d'une année sur l'autre. Chaque dépression visible en surface représente une potentielle barrière hydraulique pour les écoulements sous-glaciaires. À partir des MNT de surface et du socle rocheux, il est possible d'estimer la distribution de ces barrières hydrauliques. Malheureusement, nous ne possédons pas à ce jour de MNT du socle rocheux pour le glacier de Bonne Pierre. Dans le rapport Annexe, en supposant une topographie linéaire du socle, nous estimons la présence de barrières hydrauliques le long d'un profil longitudinal partant du lac et rejoignant le front du glacier. Ce travail sera complété lorsque les données radar acquises en novembre 2024 seront disponibles.

6.4. Résumé

Les analyses du glacier de Bonne Pierre montrent que :

- Le glacier a relativement peu perdu de masse et de surface au cours des 150 dernières années en comparaison au glacier Blanc voisin. **Une accélération de la perte de masse, de la perte de surface, et l'apparition de dépressions de surface sont observées depuis les années 2000 ;**
- Le lac supraglaciaire est visible depuis 2016 et est en croissance jusqu'à 2024. Il disparaît chaque début d'été sans crue observée. Le volume du lac est estimé à **100 000 m³ en juin 2024**. La vidange du lac s'est effectuée essentiellement **en sous-glaciaire**. Il n'est pas possible de reconstituer un hydrogramme de vidange en l'absence de connaissance du réseau de drainage sous-glaciaire ;
- Un effondrement de surface est observé au cours de l'été 2024 à une centaine de mètres du front. Cet effondrement laisse apparaître **une cavité d'origine hydraulique** qui devait exister depuis plusieurs années. Cette cavité est traversée de l'amont vers l'aval par une conduite intra-glaciaire de 1 m² ;
- La complexité de la topographie de surface est favorable à la présence de lacs supraglaciaire mais pourrait aussi favoriser **la rétention d'eau dans le glacier par création de barrières hydrauliques**.

7. Evaluation de la contribution glaciaire

La crue du torrent des Etançons s'est donc produite au cours d'un épisode nivo-météorologique rare sur 48h, et un phénomène d'origine glaciaire semble avoir été observé à la même période. Dans cette partie, nous nous basons sur le déroulé de la crue et sur les observations afin d'essayer de qualifier la contribution glaciaire à la crue.

7.1. Temporalité de la crue

Les premiers débordements du torrent des Etançons à la Bérarde sont observées aux alentours de 0h le 21 juin. Le transport solide semble avoir eu lieu entre 0h et 8h, et de manière particulièrement intense entre 1h et 4h. L'augmentation du débit des Etançons en milieu de nuit est cohérente avec l'augmentation du débit du Vénéon aux Etages observée entre 22h et 2h.

Pour autant, les précipitations sont limitées en soirée du 20 juin et le passage pluvieux plus intense est observé entre 4h et 7h le 21 juin. Le torrent des Etançons a donc réagi avant le passage pluvieux. Les différentes simulations hydrologiques effectuées sur le Vénéon aux Etages suggèrent que **l'augmentation du débit en milieu de nuit ne peut pas être expliquée uniquement par les précipitations et par la fonte** (Figure 76, voir les contributions EDF et HYCAR dans le rapport Annexe). Le pic de crue hydrologique simulé par le modèle aux Etages a lieu à 8h le 21 juin, ce qui est cohérent avec les observations (9h à Plan du Lac, 11h à Bourg-d'Oisans).

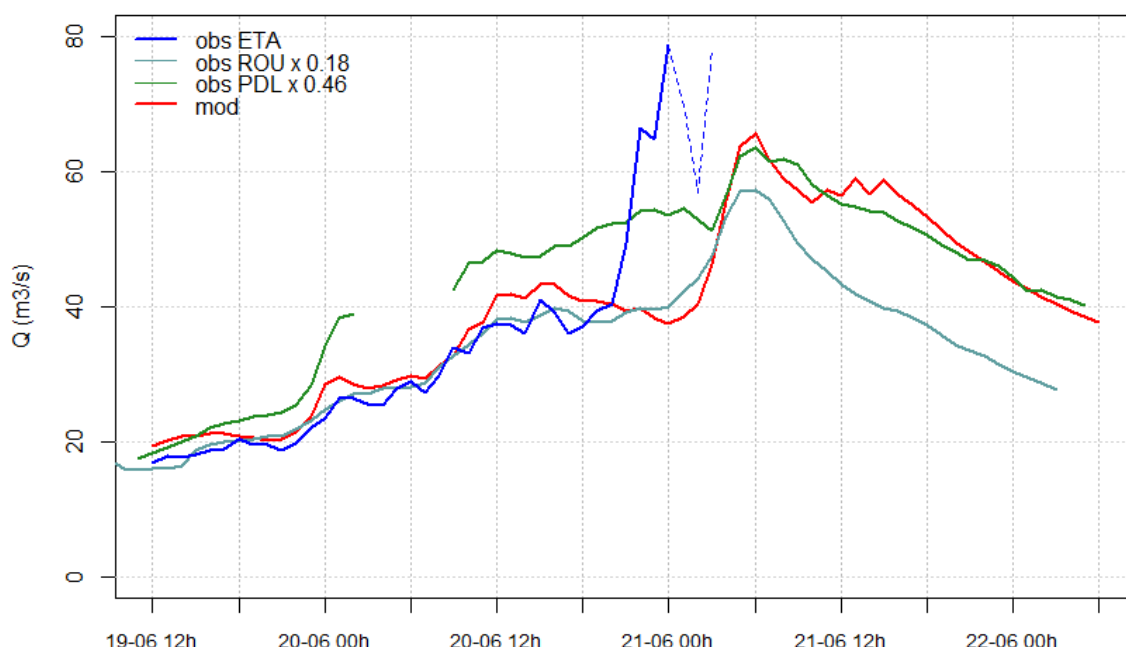


Figure 76: Débit du Vénéon aux Etages. En bleu : observation. En rouge : simulation du modèle hydrologique Mordor sur le Vénéon aux Etages. Attention : les heures sont en UTC (heure locale = heure UTC + 2).

Il est important d'avoir en tête que des incertitudes fortes existent sur les données présentées en Figure 76 :

- Incertitudes **sur les débits observés** aux Etages : l'augmentation rapide du débit est très probablement associée à un fort transport solide et à la présence de flottants, pouvant rehausser la hauteur d'eau et entraîner une surestimation des débits ;
- Incertitudes **sur les débits simulés** aux Etages : les températures mesurées avant et pendant l'évènement sur différentes stations de la région montrent une grande hétérogénéité, signe de la complexité de la masse d'air (zones plus douces que d'autres, signaux temporels très bruités). La température à appliquer en entrée du modèle, qui guide la fonte nivale et ainsi les débits, est donc à l'origine de fortes incertitudes.

Malgré ces incertitudes sur l'intensité des débits observés et simulés, il semble que **d'un point de vue de la temporalité**, les forçages de pluie et de fonte nivale ne permettent pas d'expliquer l'augmentation rapide du débit du Vénéon aux Etages en milieu de nuit du 20 au 21 juin. Des résultats similaires sur cette incohérence temporelle sont obtenus de manière indépendante avec le modèle hydrologique GR4H de l'INRAE, pour différentes configurations du modèle.

7.2. Intensité de la crue

Des estimations des débits maximums ont été réalisées en différents points. Celles-ci se basent sur des relevés des hauteurs de passage effectuées sur le terrain au droit de sections jugées « relativement stables », sur l'utilisation des relevés topographiques avant/après crue et sur l'application de lois d'écoulement. Ces estimations sont intrinsèquement très incertaines étant donné l'importance du transport solide et des changements de morphologie des cours d'eau pendant l'évènement. Elles sont donc à prendre avec précaution, mais permettent de donner des ordres de grandeur et de mieux comprendre les phénomènes observés. En parallèle, la modélisation hydrologique a été spatialisée sur le bassin versant des Etançons pour aboutir à des débits de pointe simulés selon la pluie et la fonte nivale.

L'estimation du débit de pointe sur le torrent des Etançons en amont de la confluence avec le torrent de Bonne Pierre donne des ordres de grandeur de 20 à 40 m³/s selon les laisses de crues. Le modèle hydrologique Mordor (EDF) simule un débit de pointe de l'ordre de 15 m³/s à 8h le 21 juin. Nous pouvons donc considérer que le débit de pointe sur le torrent des Etançons amont se situe dans une gamme de **15 m³/s à 40 m³/s**.

L'estimation du débit de pointe sur le torrent des Etançons à partir des relevés de terrain en aval de la confluence avec le torrent de Bonne Pierre est associé à de très fortes incertitudes en lien avec le transport solide. Néanmoins, **il semble probable que le débit de pointe du torrent de Bonne Pierre ait été du même ordre de grandeur, voire supérieur au débit de pointe du torrent des Etançons amont**, pour un bassin versant près de 2.5 fois plus petit. Cependant, les simulations hydrologiques suggèrent que le débit de pointe attendu sur le torrent de Bonne Pierre aurait été, en considérant uniquement la pluie et la fonte, de l'ordre de 6 m³/s à 8h le 21 juin. Le débit de pointe en sortie du glacier de Bonne Pierre (bassin versant de 4.7 km²) est quant à lui modélisé à seulement 3 m³/s à la même heure.

Les précipitations et la fonte nivale ne semblent donc pas pouvoir expliquer l'intensité des débits en provenance du vallon de Bonne Pierre. L'analyse couplée de la temporalité et de l'intensité de la crue suggère donc que **l'influence du glacier de Bonne Pierre sur la crue est avérée**.

7.3. Contribution du glacier de Bonne Pierre

L'influence du glacier de Bonne Pierre semble en partie liée à la vidange du lac supraglaciaire de 100 000 m³. Néanmoins, les indices issus des différentes analyses suggèrent que la contribution du glacier à l'évènement pourrait être plus forte :

- **Durée de l'évènement** : l'augmentation des débits du Vénéon aux Etages est observée dès le 20 juin 22h, et la majorité du transport solide semble s'être effectué entre 1h et 4h. Cela traduit une évolution notable de l'hydrologie sur une durée d'environ 6 heures, en l'absence de précipitations importantes (arrivée du passage pluvieux entre 4h et 7h) ;
- **Observations du glacier** : les observations de la cavité effondrée à une centaine de mètres du front suggèrent une vidange de ce volume supplémentaire, mais aussi des écoulements sous pression à proximité du front du glacier. La topographie de surface très chahutée serait favorable à la création de barrières hydrauliques favorisant la rétention d'eau à la base du glacier.

Le volume d'eau relâché par le glacier de Bonne Pierre est donc potentiellement supérieur à 100 000 m³. Il n'est cependant pas possible d'estimer le volume d'eau effectivement relâché par le glacier dans la nuit du 20 au 21 juin 2024, étant donné les incertitudes fortes sur les données de débit et l'absence de connaissance du réseau de drainage sous-glaciaire.

Il n'est pas non plus possible d'estimer quelle part du volume d'eau relâché était déjà stockée dans le glacier avant l'évènement (stockage saisonnier, au même titre que le lac) et quelle part du volume a été stockée suite aux fortes pluies et à la fonte des deux jours précédents (stockage temporaire à l'échelle de l'évènement). Cependant, la vidange annuelle du lac supraglaciaire sans crue observée les années précédentes suggère que les apports en eau très importants en haute-montagne entre le 19 et le 21 juin ont **servi de déclencheur** à la vidange du lac et potentiellement plus généralement du glacier, par augmentation de la pression dans les réseaux sous-glaciaires (vidange en quelques heures contre quelques jours les années précédentes).

7.4. Résumé

Nous pouvons retenir de ces analyses croisées que :

- La temporalité et l'intensité de la crue du torrent de Bonne Pierre en milieu de nuit du 20 au 21 juin ne peut pas être expliquée uniquement par les précipitations et la fonte nivale. **La contribution du glacier de Bonne Pierre à cette crue est donc avérée ;**
- Il semble probable que le glacier de Bonne Pierre ait relâché **un volume d'eau supérieur au volume du lac** supraglaciaire ;
- Il semble très probable que les forts apports en eau liquide par la pluie et la fonte au cours de l'évènement aient augmenté la pression dans les réseaux sous-glaciaires et **ainsi favorisé la vidange de l'eau stockée dans le lac et potentiellement dans le glacier.**

8. Synthèse de la crue du 21 juin 2024 à la Bérarde

Ce travail de rétro-analyse de la crue du torrent des Etançons dans la nuit du 20 au 21 juin 2024 met en avant les éléments de compréhension suivants.

Les débordements du torrent des Etançons ont eu lieu **le 21 juin à partir de 0h à la Bérarde**. Le transport solide a eu lieu entre 0h et 8h, avec un pic d'intensité de transport probable entre 1h et 4h. **Le pic de crue du Vénéon est observé plus tard dans la matinée**, aux alentours de 8h à la Bérarde et aux Etages, 9h à Plan du Lac, et 11h sur la Romanche à Bourg-d'Oisans.

200 000 m³ de matériaux se sont déposés à la Bérarde. L'essentiel de ces matériaux provient **du vallon de Bonne Pierre, qui a exporté 300 000 m³** de matériaux pendant la crue.

La crue du torrent de Bonne Pierre, et par conséquent la crue du torrent des Etançons à la Bérarde, revêt **un caractère exceptionnel** d'un point de vue du transport solide et des évolutions géomorphologiques. La période de retour d'un tel évènement est très **supérieure à la période de retour de la crue du Vénéon**.

Un tel phénomène a été observable en lien avec :

- **Des débits importants sur le torrent de Bonne Pierre**, liés à l'épisode météorologique (lame d'eau totale rare sur deux jours) et également à la vidange **d'un volume d'eau supplémentaire par le glacier dans la nuit du 20 au 21 juin**. Ce volume d'eau est probablement supérieur au volume du lac identifiable en surface ;
- **Une forte disponibilité en matériaux** dans le torrent de Bonne Pierre, une **forte connectivité sédimentaire avec la Bérarde** (absence de zone de régulation du transport solide, contrairement aux Etançons amont), et des pentes plus faibles au niveau de la Bérarde **favorables aux dépôts**.

L'intensité de la crue du torrent des Etançons est donc liée à un phénomène d'origine glaciaire qui semble potentiellement ne pas se limiter au lac supraglaciaire. Néanmoins, les forts apports en eau liquide en haute-montagne ont probablement servi de déclencheur à la vidange du glacier. **Il s'agit donc bien d'une crue liée à la concomitance d'un épisode météorologique et d'un phénomène glaciaire.**

9. Vision prospective

La synthèse de la crue du torrent des Etançons du 21 juin 2024 met en avant les différents facteurs ayant permis l'occurrence d'un tel phénomène :

- La quantité de matériaux mobilisables par le torrent de Bonne Pierre puis par les Etançons jusqu'à la Bérarde ;
- Les pluies et la fonte nivale ;
- Le glacier de Bonne Pierre.

Nous analysons l'évolution possible de ces trois facteurs afin de qualifier le caractère reproductible d'un tel phénomène.

9.1. La quantité de matériaux mobilisables

La quantité de matériaux mobilisables par un torrent peut être approchée en considérant (1) les zones contenant des matériaux potentiellement érodables (cônes de déjection, alluvions, dépôts glaciaires, éboulis) et (2) la connectivité de ces zones au réseau hydrographique. Nous analysons ci-dessous la connectivité sédimentaire entre la Bérarde et le bassin versant des Etançons, puis les volumes potentiellement mobilisables au sein des zones connectées.

9.1.1. Connectivité sédimentaire

Le fait que des stocks sédimentaires soient mobilisables n'implique pas nécessairement une augmentation significative de l'aléa pour des enjeux situés en aval. En effet, ces stocks peuvent être situés dans des zones éloignées, ou « déconnectées » des enjeux. Le concept de connectivité sédimentaire a ainsi été largement développé et utilisé dans l'étude des bassins versants torrentiels depuis une dizaine d'année.

L'indice de connectivité de Cavalli et al. (2013) est représenté en Figure 77 avec comme exutoire le sommet du cône de déjection des Etançons (secteur Bérarde). Cet indice tient compte de la distance à parcourir, de la pente et de la rugosité du terrain à un instant t. On observe des zones fortement connectées à l'exutoire du bassin, défini comme l'apex du cône en jaune, et des secteurs moins connectés à cet exutoire en violet foncé. **Cette carte fait clairement apparaître l'ensemble du secteur en aval du glacier de Bonne Pierre comme très connecté à l'apex du cône en comparaison par exemple des parties hautes du bassin des Etançons.**

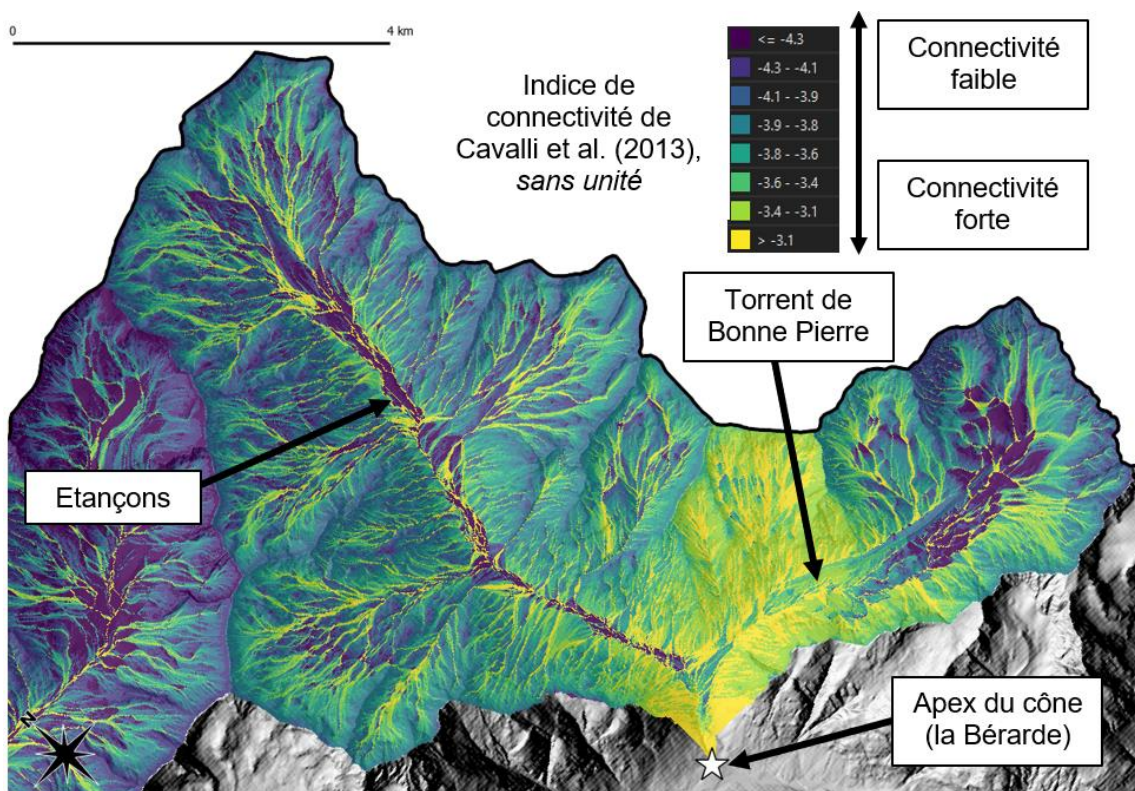


Figure 77: Indice de connectivité de Cavalli et al (2013) calculé avec comme exutoire l'apex du cône des Etançons. Le secteur en aval du glacier de Bonne Pierre ainsi que le versant en rive droite du torrent de Bonne Pierre apparaissent nettement mieux connectés (plus de jaune) que les versants sur les Etançons amont.

Cet indice de connectivité peut être croisé avec les zones contenant effectivement des matériaux érodables : dépôts glaciaires, éboulis, cônes de déjection, alluvions. La Figure 78 illustre les indices de connectivité moyens pour ces zones sources de matériaux potentiellement mobilisables. Ceci permet de mettre en évidence encore plus fortement la forte connectivité en aval du glacier de Bonne Pierre (zones en rouge) et la faible connectivité des Etançons amont (zones en bleu/vert/jaune).

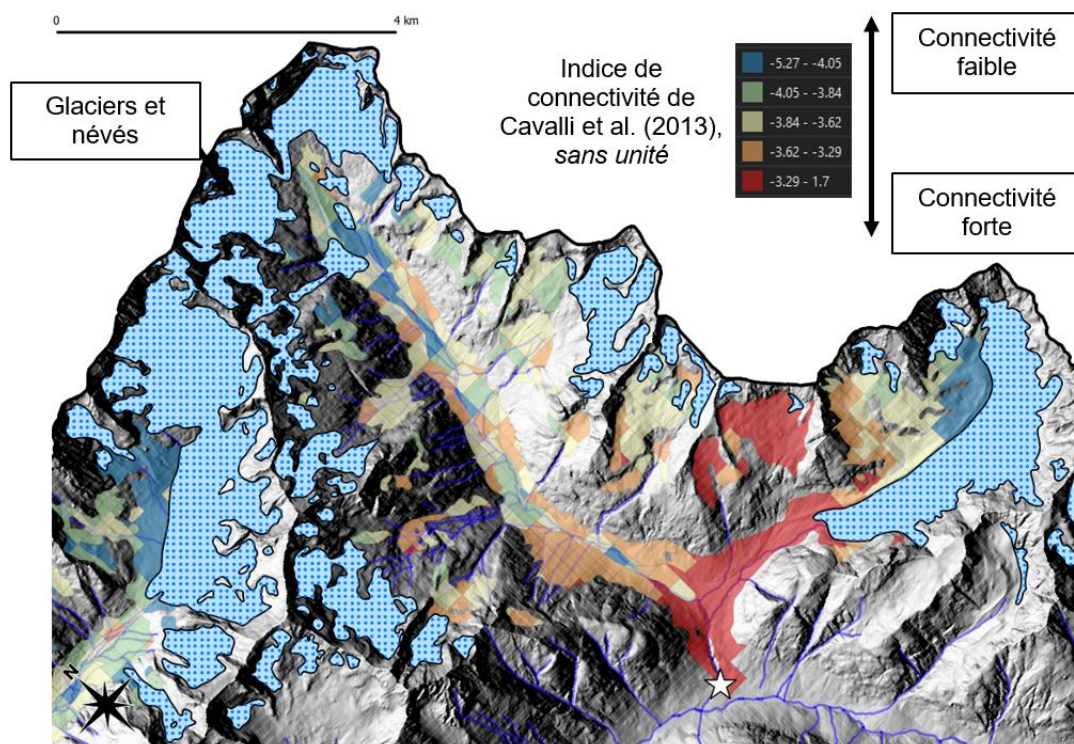


Figure 78: Extraction par carré de 250m des indices moyens de connectivité sur les zones sources de matériaux potentiellement mobilisables.

9.1.2. Stocks mobilisables

Évaluer les stocks encore mobilisables suite à la crue de juin 2024 est un élément essentiel pour déterminer si une évolution de l'aléa torrentiel, à la hausse ou à la baisse, est à considérer. Concernant le torrent de Bonne Pierre, qui concentre des sources sédimentaires très connectées au hameau de la Bérarde, on peut distinguer deux secteurs distincts : **le cône de déjection de Bonne Pierre à l'aval, et le chenal à l'amont.**

Concernant le cône de déjection, malgré une forte érosion de l'ordre de 100 000 m³ de matériaux, **un stock toujours très important est présent** (Figure 79 - haut). De plus, la moitié sud du cône a été fortement remaniée et les matériaux torrentiels présents sur ce linéaire **sont globalement peu stabilisés** (Figure 79 – bas). **Aussi le stock mobilisable sur ce secteur peut être considéré inchangé, en comparaison de la situation pré-crue.**

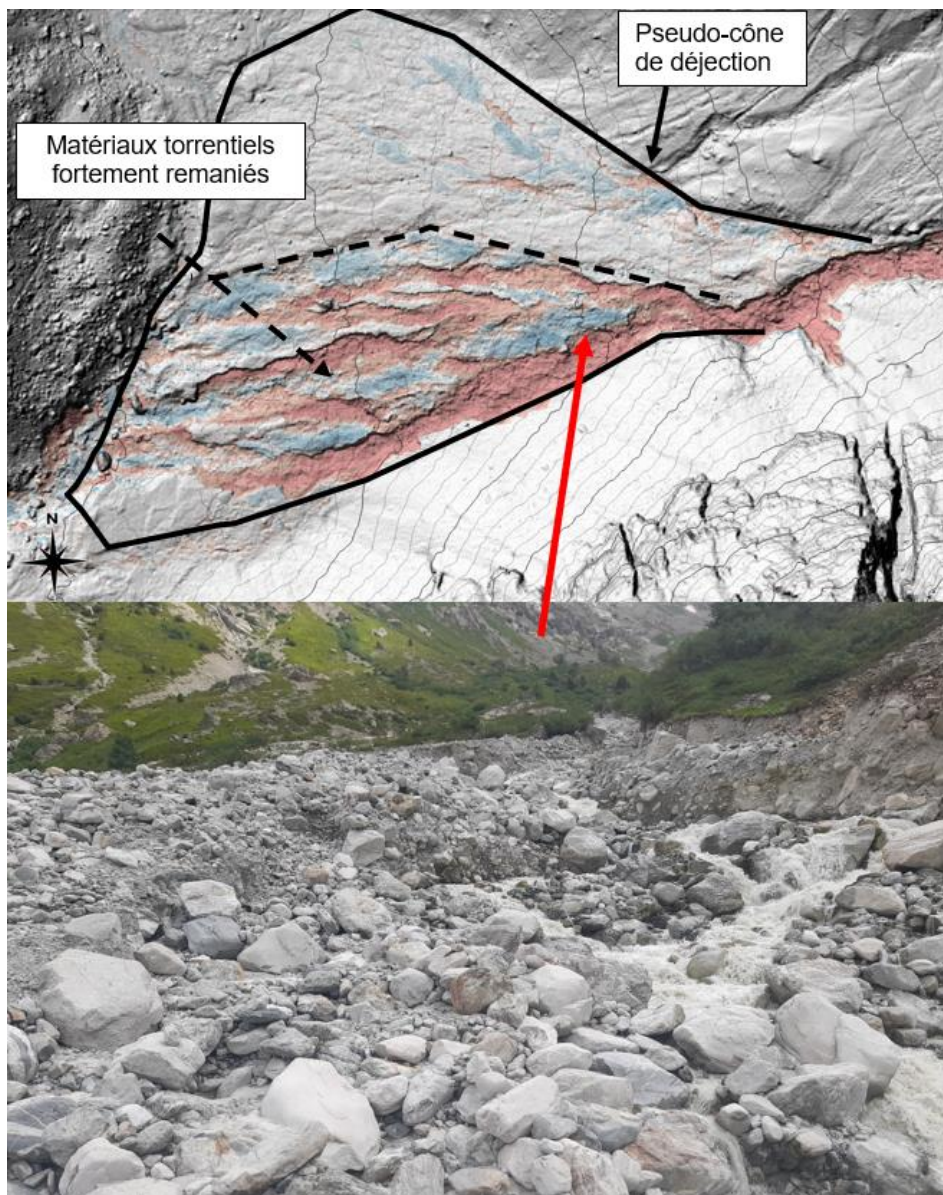


Figure 79: Haut : topographie du cône de déjection de Bonne Pierre présentant un stock élevé de matériaux, dont une partie significative en rive gauche constituée de matériaux torrentiels fortement remaniés (dégradé de couleur pour les érosions et dépôts). Bas : exemple du stock de matériaux fortement remaniés sur le cône de déjection.

Concernant le chenal en amont, on constate un élargissement et un enfoncement massif du chenal dans les dépôts morainiques. A de nombreux endroits, le lit a atteint le substratum rocheux, que ce soit en rive gauche ou en rive droite, notamment en aval de la marge proglaciaire (Figure 80).



Figure 80: Substratum rocheux affleurant à de nombreux endroits sur le linéaire entre le cône de déjection et le glacier.

Cette présence de substratum rocheux est bien visible sur le profil en long post-crue, où apparaissent à de nombreux endroits une forme en « marche d'escalier » ou sur les photographies aériennes (Figure 81). Il convient de noter que le substratum rocheux est apparent sur presque l'ensemble du linéaire en rive gauche, et en rive droite sur la partie aval du chenal. Ceci est un élément suggérant plutôt une limitation du processus d'incision et/ou d'érosion de berge au droit des secteurs « tenus » par ces points durs.



Figure 81: Photographie aérienne post-crue et présence de substratum rocheux sur le linéaire entre le sommet du cône et le glacier.

Il convient également de souligner que le gabarit du nouveau lit est nettement plus large que le lit initial (Figure 82). Aussi, une analyse du taux de blocs présents dans le chenal actif (probabilité de trouver de gros blocs en surface) suggère plutôt une augmentation de ce paramètre. Qualitativement, cela peut suggérer une plus grande stabilité du lit, **ou du moins n'oriente pas vers une augmentation de son instabilité**. Il convient de souligner que cette dernière analyse présente des incertitudes.

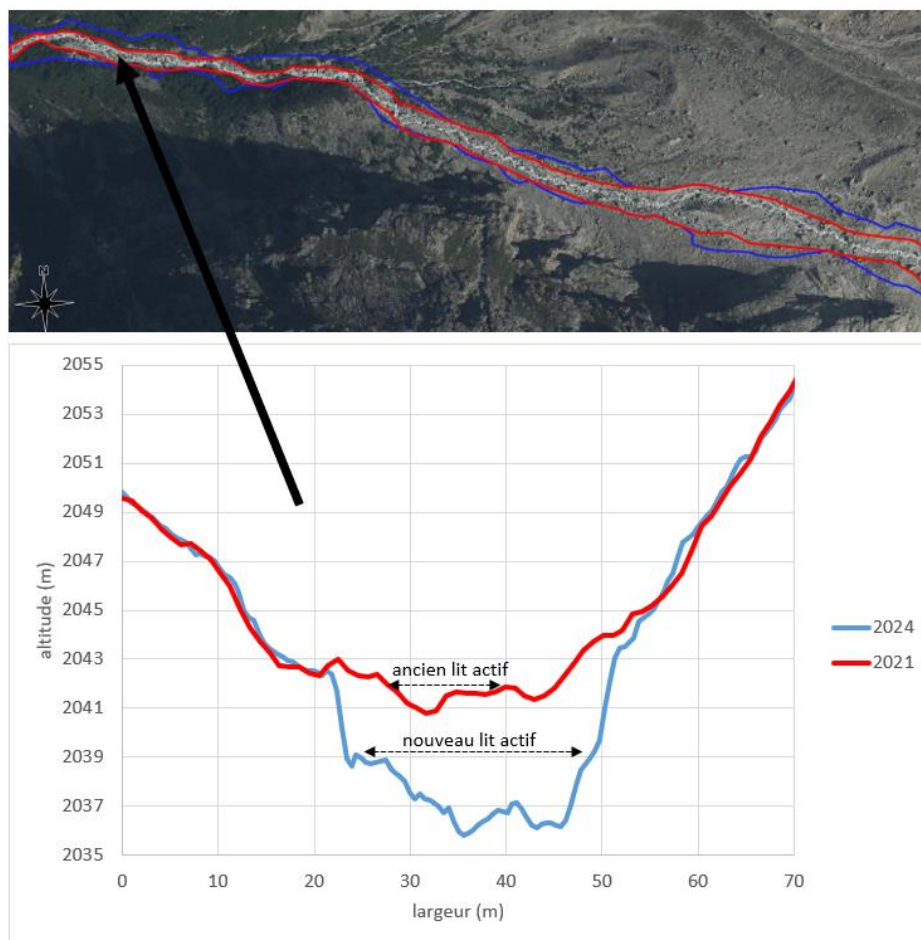


Figure 82: Elargissement significatif du gabarit du lit actif sur le tronçon entre le cône et le glacier.

En synthèse pour le chenal, l'ensemble de ces éléments peut laisser penser que les stocks mobilisables **au sein du chenal actif se sont réduits comparativement à la situation pré-crue**. Les taux linéiques d'érosion très élevés constatés durant l'évènement de juin 2024 semblent, au regard des éléments précités, moins probables à la suite de la crue. Néanmoins, les berges morainiques du chenal restent fortement instables. De même, certaines zones de moraines drainées par des affluents du torrent de Bonne Pierre n'ont pas été « lessivées » durant la crue. Les premières mesures sismiques effectuées dans la moraine proche du front du glacier (rive droite du torrent) suggèrent une épaisseur de matériaux de plusieurs dizaines de mètres. **La présence de ces matériaux morainiques instables en rive droite du torrent suggère une sensibilité plus forte aux prochaines crues (même de plus faible intensité) durant quelques années.**

Au final, même si une part non négligeable du stock présent initialement dans le chenal du torrent de Bonne Pierre semble s'être vidangée, **il reste sur ce linéaire et sur le cône de déjection des volumes mobilisables élevés, tout comme dans les talwegs tributaires entaillant les moraines sur ce secteur et bien connectés au cône de déjection**. Par ailleurs, le glacier de Bonne Pierre va continuer de se retirer, rendant disponibles de nouveau stocks de matériaux actuellement retenus en surface du glacier. **Au global, on peut évaluer les stocks encore mobilisables sur ce secteur à plusieurs centaines de milliers de mètre cubes.**

Notons que ces stocks, s'ils sont mobilisés lors d'un évènement de forte magnitude, vont vraisemblablement se déposer avec des pentes relativement fortes, du même ordre de grandeur que ce qui a été observé lors de la crue de juin 2024, et donc plutôt sur les parties hautes du cône de déjection des Etançons. A contrario, les matériaux provenant du bassin amont des Etançons vont avoir plutôt tendance à se déposer avec des pentes plus faibles et donc sur des parties plus en aval du cône des Etançons, voir à la confluence avec le Vénéon.

9.2. Le forçage météorologique et nivologique

L'épisode météorologique observé du 19 au 21 juin est caractérisé par des cumuls de précipitations importants avec une limite pluie-neige très élevée (de l'ordre de 3500 m à 4000 m). Une telle limite pluie-neige permet des apports d'eau importants en haute-montagne, et plus généralement une contribution de la quasi-totalité de la surface des bassins versants aux écoulements, favorisant la réponse hydrologique. **Le changement climatique, associé à un réchauffement de l'air, favorise**

des limites pluie-neige de plus en plus élevées en altitude. Les épisodes de pluie sur neige en haute-montagne seront de plus en plus fréquents (SROCC, GIEC 2019).

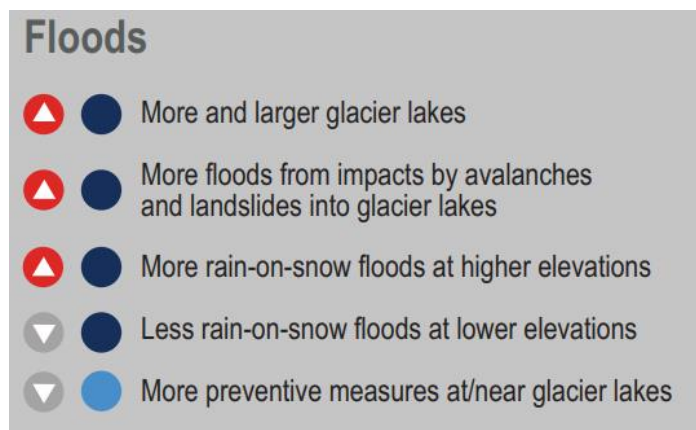


Figure 83: Extrait de la Figure 2.7 du rapport du GIEC sur l'océan et la cryosphère (2019), sur les changements attendus en haute-montagne dans le contexte du changement climatique au regard des crues.

La fonte nivale forte observée au cours de l'épisode a été rendue possible par une masse d'air très douce. La période de retour de la fonte nivale est **deux fois moins élevée** lorsque l'on considère la période 1980-2024 que lorsque l'on considère la période 1958-2024. Cela traduit que le changement climatique **rend plus probable des taux de fonte importants**. De futurs événements de fonte très marqués seront donc de plus en plus probables.

9.3. Le glacier de Bonne Pierre

Le lac supraglaciaire du glacier de Bonne Pierre apparaît de manière saisonnière depuis 2016. L'exploration du glacier effectuée à l'automne 2024 a montré que le syphon principal ayant permis la vidange du lac était en cours de regel. Les incertitudes sur le fonctionnement de ce lac supraglaciaire sont grandes, mais **il semble qu'aucun élément tangible ne permette d'exclure une reformation du lac au printemps 2025**.

La rétro-analyse de l'évènement a montré que le glacier de Bonne Pierre semble favorable à la rétention d'eau, et que le sur-aléa d'origine glaciaire ne se limite très probablement pas au lac. En surface du glacier, la complexification de la topographie et l'apparition de dolines favorables à la formation de lacs est observée surtout **à partir de la fin des années 2000**. Cette complexité de surface pourrait être à l'origine de la rétention d'eau à l'intérieur du glacier par la création de barrières hydrauliques. L'évolution de la distribution de ces topographies de surface pourrait expliquer des changements dans le chemin de vidange du lac d'une année sur l'autre. Les analyses glaciologiques suggèrent que la dynamique du glacier, en particulier son ralentissement, sa perte d'épaisseur générale associée à des pentes faibles, vont favoriser dans le futur la formation de lacs supraglaciaires à Bonne Pierre.

Ainsi, malgré les incertitudes fortes sur le fonctionnement hydrologique et hydraulique du glacier, aucun élément ne permet d'exclure de nouvelles rétentions d'eau à l'intérieur et à la surface du glacier de Bonne Pierre.

Il semble par ailleurs pertinent d'améliorer la compréhension du fonctionnement du glacier de Bonne Pierre dans les années à venir à partir de mesures de terrain et/ou de modélisation.

9.4. Scénario de référence

La crue du 21 juin 2024 est associée à un transport solide exceptionnel, rendu possible par une quantité importante de matériaux érodables connectés au cône de déjection du torrent des Etançons. Elle est par ailleurs liée à une concomitance d'un phénomène nivo-météorologique rare, couplé à un sur-aléa d'origine glaciaire dont la rareté n'est pas quantifiée.

L'analyse des différents facteurs ayant mené à cette crue montre que :

- La quantité de matériaux potentiellement mobilisables et connectés à la Bérarde dans le secteur du torrent de Bonne Pierre demeure, à la suite de la crue du 21 juin 2024, **de plusieurs centaines de milliers de mètres cubes**. Si le chenal du torrent de Bonne Pierre a en partie été purgé le 21 juin, la quantité de matériaux morainiques en rive droite du torrent est encore importante, tout comme la quantité de matériaux remaniés sur le cône de déjection de Bonne Pierre ;
- Le changement climatique **rend plus probable** des phénomènes de pluie sur neige en haute-montagne, ainsi que des taux de fonte importants ;
- L'évolution du glacier de Bonne Pierre depuis les années 2000 se traduit par un amincissement et une diminution de la surface du glacier plus rapides qu'auparavant, mais aussi par l'apparition de dépressions topographiques en surface. **Ces évolutions favorisent la rétention d'eau en surface et probablement à la base du glacier**.

Ainsi, bien que la crue du 21 juin puisse être caractérisée d'exceptionnelle au regard de l'historique et en lien avec la concomitance de plusieurs facteurs, l'analyse de chacun de ces facteurs ne permet pas d'exclure l'occurrence d'une crue d'une telle magnitude à l'avenir dans le contexte actuel de changement climatique. Il semble donc pertinent de considérer **la crue du 21 juin 2024 comme une nouvelle crue de référence du torrent des Etançons à la Bérarde**.

Cette crue est caractérisée par un très fort transport solide et un débit soutenu sur plusieurs heures. Couplée aux autres scénarios de référence possibles (crue avec un pic de débit plus soutenu), elle doit être prise en compte dans les réflexions en cours sur l'aménagement du hameau.

9.5. Les autres scénarios

Au regard de la compréhension apportée par ce travail, d'autres scénarios peuvent être imaginés. On retiendra notamment :

1. **Crue exceptionnelle liée à un forçage météorologique plus important** : crue du même type que celle du 21 juin 2024, avec un forçage hydrologique plus important (précipitations plus fortes, limite pluie neige plus élevée, fonte nivale plus importante, contribution plus importante des Etançons amont) ;
2. **Crue exceptionnelle liée à un forçage glaciologique plus important** : quantité d'eau plus importante dans le glacier, entraînant des débits plus importants sur une période plus longue sur le torrent émissaire du glacier de Bonne Pierre ;
3. **Crue exceptionnelle liée à une vidange soudaine du glacier** : vidange très rapide entraînant une montée des eaux brusque et un débit de pointe beaucoup plus important que celui observé le 21 juin.

Ces scénarios, bien que plausibles, sont très peu probables et leur occurrence ne peut être qualifiée. Ainsi, les scénarios 1) et 2) nécessitent une combinaison de facteurs simultanés (facteurs météorologiques et glaciaires) plus intenses qui donnent à ces scénarios un caractère plus exceptionnel que l'évènement du 21 juin. Le scénario 3) nécessite des modifications topographiques fortes du glacier conduisant à des rétentions d'eau pouvant faire l'objet de débâcles brutales. La connaissance acquise à ce jour dans ce travail ne permet pas d'envisager ce scénario comme un scénario de référence.

9.6. Les crues courantes

Il est important de noter que les modifications topographiques engendrées par cet évènement modifient non seulement les scénarios très intenses et très rares à prendre en compte dans les aménagements, mais vont également impacter les caractéristiques et effets des crues courantes. Cela pourrait se traduire par des apports solides plus fréquents qu'il faudrait prendre en compte dans la gestion d'un éventuel futur aménagement visant à protéger le hameau de la Bérarde.

10. Conclusion

Cet important travail de rétro-analyse a mobilisé dans un délai très contraint un grand nombre d'experts et de témoins pour mieux comprendre l'évènement ayant impacté le hameau de la Bérarde (Commune de Saint-Christophe-en Oisans) en 2024.

Ces travaux permettent de mieux comprendre la part de l'influence glaciaire dans cet évènement multifactoriel. L'apport d'eau par le glacier de Bonne Pierre a largement contribué à l'intensité et au caractère exceptionnel de l'évènement. La concomitance d'une vidange d'un tel volume d'eau par un glacier et d'un phénomène météorologique rare semble inédite dans les Alpes au regard de l'historique connu.

Enfin, ces éléments permettent de définir au mieux les caractéristiques de la crue torrentielle exceptionnelle du torrent des Etançons s'étant produit les 20 et 21 juin 2024. Cette crue est maintenant à considérer comme une crue de référence dans les réflexions en cours sur le réaménagement du hameau.



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