

Office Cantonal de l'eau

# Crue de L'Arve – Novembre 2023

## Analyse, bilan et perspectives

---



**Feuille de contrôle du document**

Titre	Crue de l'Arve – Novembre 2023 Rapport d'événement
Objet / sujet	
Auteur(s)	Etienne Monbaron-Jalade Davide Ceresetti Tahina Bachmann Michel Enggist Steve Hottinger Ion Iorgulescu
Service / Secteurs	Service de l'Aménagement des Eaux et Pêche (SAEP) Secteur Hydrologie et Extrême Climatique (HEC) Secteur Hydrométrie (HYD) Cellule de Surveillance des Crues (CELSUCR)
Date	26/03/24
Nom du fichier	_Crue_Arve_2023_V1_1_2024 03 26.docx
Statut	<input type="checkbox"/> Provisoire <input checked="" type="checkbox"/> Final
Distribution	Ge.ch
Visa	Direction de l'office cantonal de l'eau

**Versions, Modifications**

No	Chapitre	Version	Date
1.0	Tout	1	08.02.2024
2.0	tout	1.1	26.03.2024

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Résumé .....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Analyse météorologique .....</b>	<b>7</b>
2.1	En bref.....	7
2.2	Contexte météorologique.....	7
2.3	Analyse quantitative des précipitations .....	10
<b>3</b>	<b>Réponse hydrologique.....</b>	<b>12</b>
3.1	En bref.....	12
3.2	Débits de L'Arve .....	13
	3.2.1 <i>Dynamique de la crue</i> .....	13
	3.2.2 <i>Lame écoulée</i> .....	14
3.3	Estimation de la période de retour de la crue du 15 novembre 2023 .....	15
3.4	Variabilité spatiale de la réponse hydrologique à l'intérieur du bassin.....	17
<b>4</b>	<b>Gestion de l'évènement .....</b>	<b>21</b>
4.1	En bref.....	21
4.2	Acteurs de l'évènement.....	22
4.3	Rôle et objectifs de la Cellule de Surveillance des Crues .....	23
4.4	Pose de protections mobiles aux sites sensibles .....	24
4.5	Fermeture des ponts, des routes et cheminements pédestres.....	25
4.6	Lac Léman.....	28
<b>5</b>	<b>Dégâts .....</b>	<b>30</b>
5.1	En bref.....	30
5.2	Inondations de caves et sous-sols .....	30
5.3	Engouffrements dans le réseau d'eaux usées .....	31
5.4	Autres sites.....	34
<b>6</b>	<b>Analyse hydraulique.....</b>	<b>37</b>
6.1	En bref.....	37
6.2	Carte des dangers de 2013 .....	37
6.3	Validité de la carte des dangers : relevés géométriques et mise à jour du modèle hydraulique post-crue de 2015.....	40
6.4	Comparaison entre les phénomènes observés en novembre 2023 et les prédictions de la carte des dangers .....	42
6.5	Inspection post-crues 2023 des rives et des ouvrages.....	46
6.6	Embâcles.....	46
6.7	Gestion sédimentaire.....	47
<b>7</b>	<b>Les enseignements de l'évènement.....</b>	<b>50</b>
7.1	En bref.....	50
7.2	Les mesures pour améliorer la protection des sites sensibles .....	50
7.3	Les mesures pour améliorer les prévisions .....	52
7.4	Les mesures pour améliorer la gestion de crise.....	54
<b>8</b>	<b>Contexte et Perspective .....</b>	<b>56</b>
8.1	En Bref .....	56
8.2	Contexte.....	56
	8.2.1 <i>Contexte hydrologique 2023 : une fin d'année très humide</i> .....	56
	8.2.2 <i>Changement climatique</i> .....	59
8.3	Perspectives pour la suite.....	62
<b>ANNEXE I. Précipitations journalières cumulées [mm] aux stations Pluviométriques du Bassin Versant de l'Arve .....</b>		<b>63</b>

<b>ANNEXE II.</b>	<b>Crue de l'Arve de Novembre 2023 –Rétrospective hydrologique .....</b>	<b>64</b>
<b>ANNEXE III.</b>	<b>Impacts de la crue de L'Arve sur le réseau d'assainissement.....</b>	<b>65</b>
<b>ANNEXE IV.</b>	<b>Evaluation sommaire des modèles de prévision du bassin versant de l'Arve</b>	<b>66</b>

## 1 RESUME

Le présent résumé met en évidence les éléments clés à retenir du rapport:

- Du 11 au 15 novembre 2023, le bassin versant de L'Arve subit un phénomène météorologique typique pour le déclenchement d'un évènement majeur dans les bassins versants alpins.
- C'est finalement le cumul de phénomènes aggravants qui a contribué à la qualité exceptionnelle de l'évènement : pré-saturation du bassin versant, pluie sur manteau neigeux conséquent (>1500m), forte intensité de pluie en moyenne et haute montagne et pic d'intensité sur un bassin-versant saturé (14.11.23 entre 15h-00h).
- Le débit de pointe de 1010 m<sup>3</sup>/s (valeur exacte reste à valider), atteint le 15 novembre 2023 à 8h à Genève Bout du Monde, représente le plus haut débit enregistré depuis le début des mesures systématiques en 1904.
- Une analyse statistique effectuée à posteriori (c'est-à-dire en intégrant l'évènement du 15 novembre) lui a attribué une période de retour de 200 ans.
- Cette crue a pu traverser le canton sans dégâts majeurs, grâce à une excellente coordination et un suivi des différents partenaires agissant en cas d'évènement de crue qui a débuté déjà quelques jours avant l'évènement.
- Les dégâts recensés pendant l'évènement sont liés à un refoulement des réseaux et une infiltration par la nappe souterraine et non à un débordement de l'Arve.
- Les lignes d'eau et les débordements observés correspondent dans l'ensemble aux prédictions de la carte des dangers élaborée en 2013.
- Chaque nouvel évènement contribue à l'amélioration des modèles de prévision hydrologique utilisés dans le cadre de la gestion de l'évènement. L'évènement de 2015 a d'ailleurs permis d'établir les modèles de prévision qui ont permis un meilleur suivi de l'évènement.
- Les propriétaires de réseaux privés concernés par ce risque de crue et les propriétaires et exploitant des réseaux principaux (VdG et SIG) doivent mettre en œuvre des mesures visant à protéger les biens et les personnes face à ce type d'évènement, notamment via l'engouffrement dans les réseaux.
- Des investigations complémentaires sont prévues en 2024 pour améliorer la compréhension de l'évènement et la prévision d'évènements futurs.
- Une coordination avec les différents partenaires est prévue au premier trimestre 2024 pour faire un bilan de l'évènement.

Le présent rapport est constitué de plusieurs chapitres permettant de mieux comprendre l'évènement survenu le 15 novembre 2023 et ses conséquences, d'un bilan post-évènement ainsi que des perspectives pour la suite.

La structure du rapport est la suivante: chaque tête de chapitre commence par un résumé dans la section "En Bref" et les détails sont présentés ensuite et sont complétés si nécessaire par des annexes.

## 2 ANALYSE METEOROLOGIQUE

### 2.1 En bref

- ➔ Selon l'analyse effectuée par MétéoSuisse, la situation météorologique a été typique pour cette saison: la succession des fronts chauds puis froids, associés à une dépression creusée en approche sur le proche atlantique, dans un puissant courant d'ouest en altitude. La conjonction de plusieurs facteurs aggravants lui a donné un caractère exceptionnel : état antécédent humide, forte remontée des températures, précipitations abondantes surtout en altitude.
- ➔ Du lundi 12 au mercredi 14 novembre 2023 (72 h) des précipitations très importantes tombent sur la partie supérieure du bassin versant de L'Arve : 121 mm à Chamonix (FR), 232 mm à Vallorcine (FR), 129 mm à Samoëns (FR) et 178 mm à Emosson (CH).
- ➔ L'intensité maximale des précipitations a été enregistrée en fin d'épisode le 14 novembre entre 14h et minuit. En altitude on a enregistré des cumuls entre 30 et 50 mm sur 8h.
- ➔ Une très grande variabilité spatiale des précipitations peut être remarquée, avec des cumuls faibles dans la basse vallée de L'Arve. On enregistre ainsi seulement 38 mm du 12 au 14 novembre (3 jours) à Bonneville (FR).
- ➔ La période de retour des précipitations aux stations devra être évaluée plus précisément, notamment pour les durées de 4 à 12h. A ce stade on peut apprécier qu'elle est inférieure à 10 ans, pour les durées de 1 à 3 jours.
- ➔ Le 13 et 14 novembre 2023, on observe également une très nette remontée de la limite pluie-neige de 1'300m à ~2'800m, provoquant une fonte importante du manteau neigeux et des phénomènes de pluie sur neige.

### 2.2 Contexte météorologique

La situation météorologique est considérée par MétéoSuisse<sup>1</sup> [*...comme étant typique pour un mois de novembre : une succession de fronts chauds puis froids associés à une dépression sur le proche atlantique, dans un puissant courant d'ouest en altitude. La limite pluie-neige qui se trouvait en plaine au nord des Alpes, tôt dimanche matin, est remontée pour atteindre les 1800 mètres dimanche après-midi, puis dépasser les 2500 mètres durant la journée de lundi. À l'arrière du front chaud, une rivière atmosphérique (voir Figure ci-après) a contribué à diriger de l'air doux et très*

<sup>1</sup>MétéoSuisse-Blog:<https://www.meteosuisse.admin.ch/portrait/meteosuisse-blog/fr/2023/11/avis1215nov23.html>

humide en provenance des latitudes subtropicales directement sur les Alpes. Cette configuration, présentée à l'aide de l'eau précipitable dans l'atmosphère le 14.11.2023 à 00h, a ainsi contribué à augmenter les quantités de précipitations dans le secteur chaud entre lundi et mardi.] A noter que l'événement de mai 2015 a été provoqué par une situation météorologique similaire.

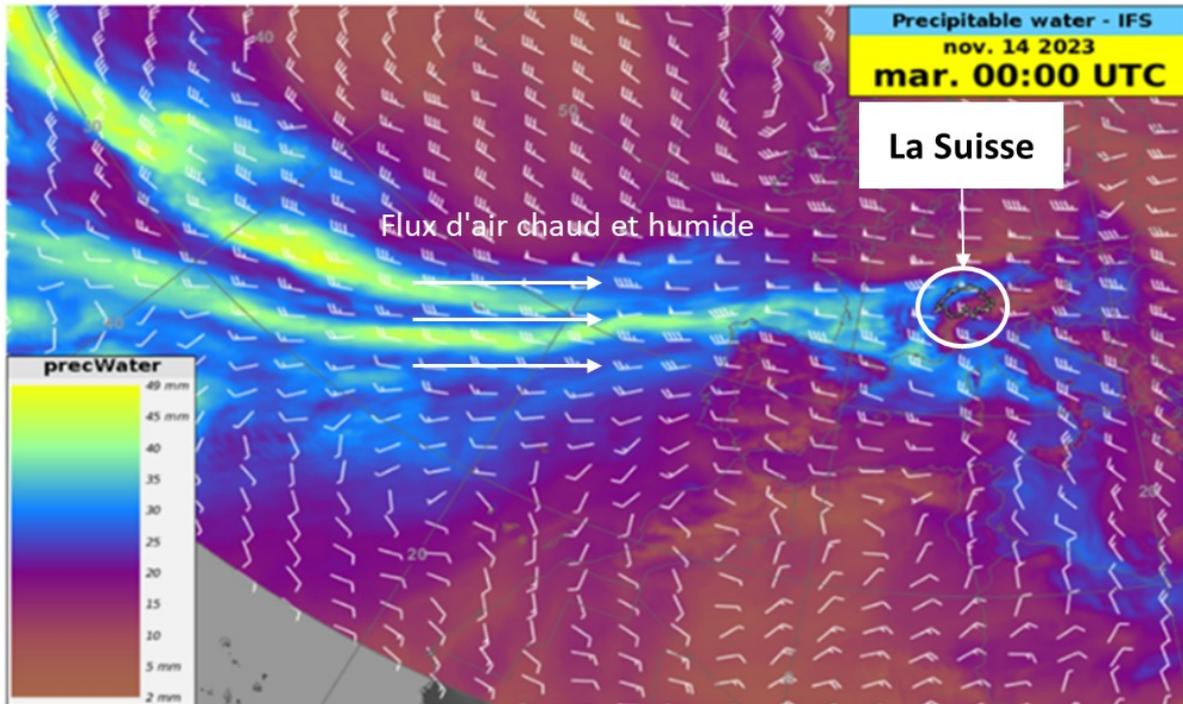


Figure 1: Illustration de la rivière atmosphérique amenant de sur 3 jours entre le 12 et le 14 novembre 2023 (source : MétéoSuisse-Blog<sup>1</sup>)

La Figure 2 ci-dessous présente l'évolution des températures mesurées aux stations françaises situées dans le bassin versant de L'Arve. On constate qu'entre le 11 et le 14 novembre les températures ont augmenté d'environ 10°C. L'isotherme 0°C est remontée de plus de 1'500 m. Cette augmentation des températures a constitué un facteur aggravant et a contribué de manière déterminante au caractère exceptionnel de la crue, car les surfaces contributives à l'écoulement de crue ont été considérablement augmentées. Or c'est justement en altitude que les précipitations les plus importantes sont tombées (voir ci-dessous). La remontée de l'isotherme 0°C a provoqué des phénomènes de pluie sur neige et la fonte du couvert neigeux existant.

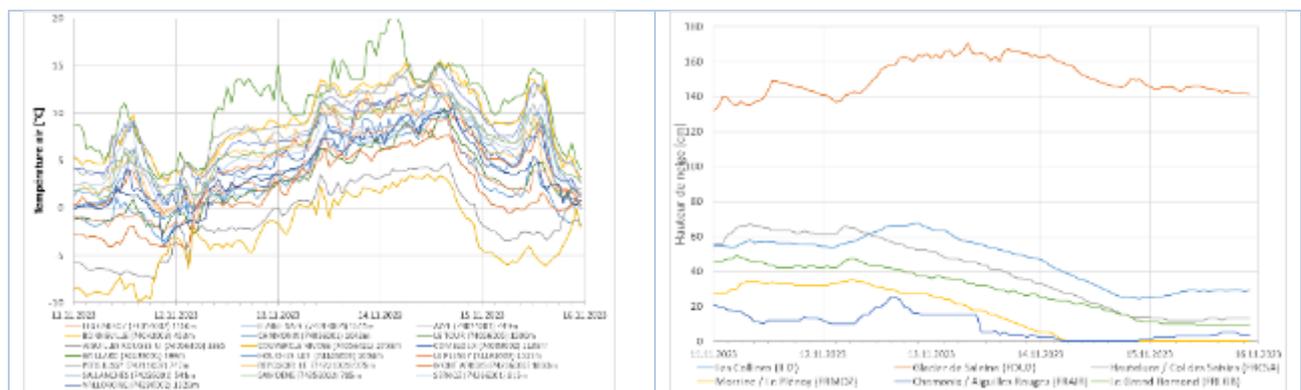


Figure 2: Evolution des températures (à gauche) et hauteur de neige (à droite) mesurées aux stations françaises situées dans le bassin versant de l'Arve

La Figure 3 ci-dessous présente une estimation, issue du modèle de simulation hydrologique RS du bureau Hydrique, de la variation du stock de neige (fonte ou accumulation) de la neige sur l'ensemble de l'événement en fonction de l'altitude. Le stock de neige et sa variation sont exprimés comme l'équivalent en eau de la neige (Snow Water Equivalent) et se mesure en millimètre [mm]. On constate que le modèle simule une fonte significative pour la gamme d'altitudes comprise entre 1200 m et 2100 m, qui représentent autour de 25% de la superficie du bassin versant. Même si significative, cette contribution reste néanmoins inférieure aux cumuls de précipitations sur la même période.

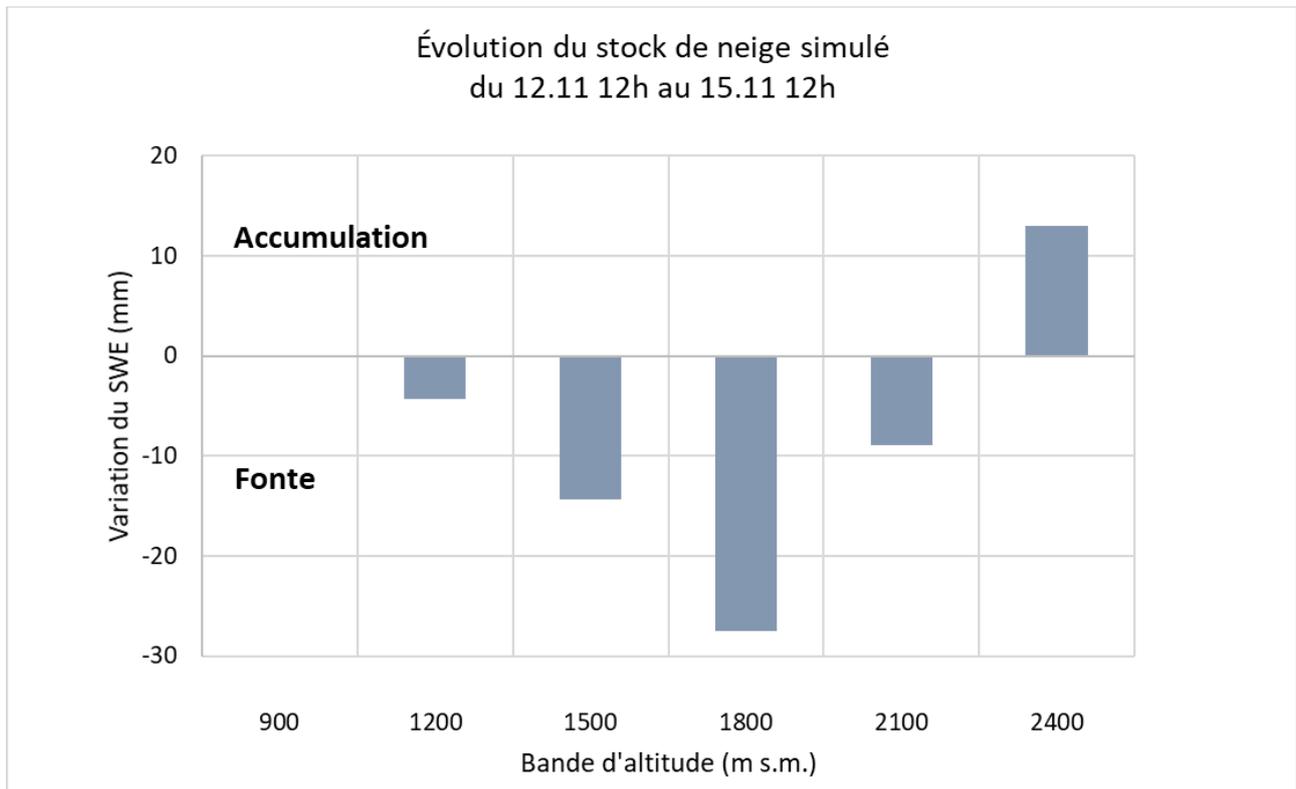


Figure 3: Evolution du stock de neige simulé (SWE) en fonction de l'altitude (source: Hydrique)

### 2.3 Analyse quantitative des précipitations

La Figure 4 ci-dessous présente le cumul de précipitations sur 3 jours sur le bassin versant de L'Arve entre le 12 et le 14 novembre établis par MétéoFrance.

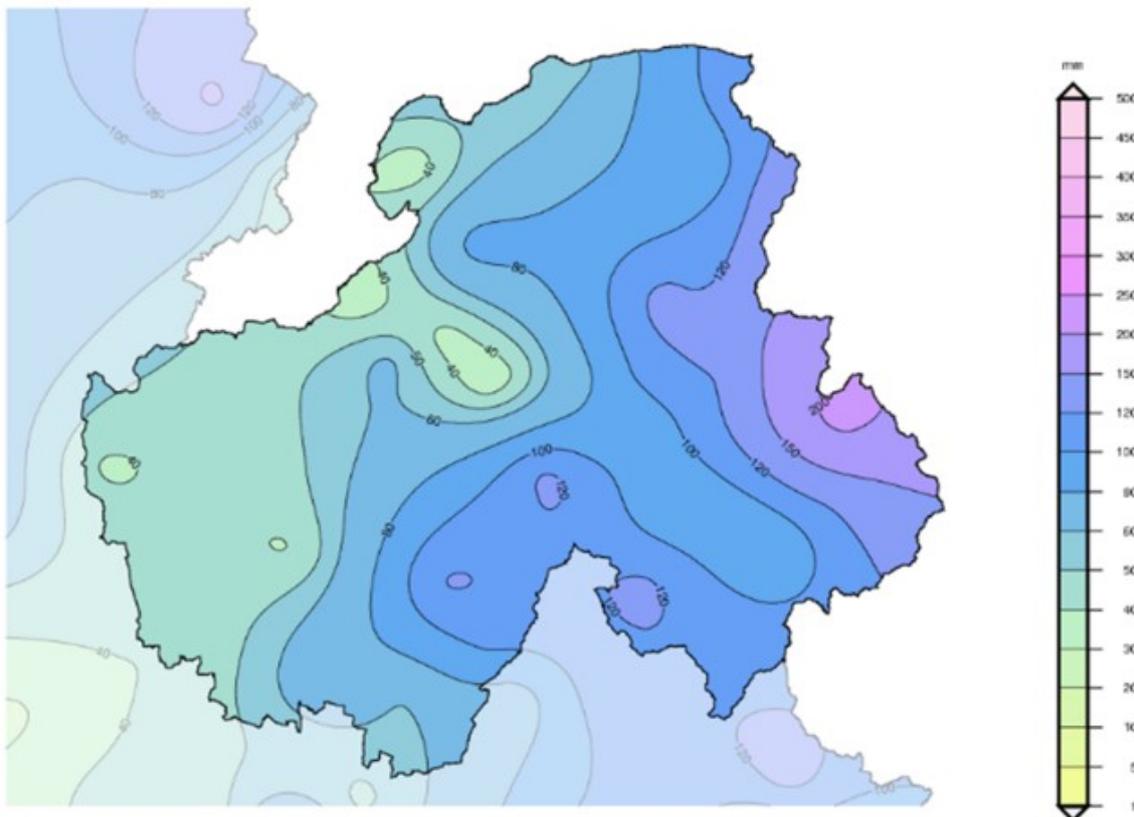


Figure 4 : Cumul de précipitations sur 3 jours entre le 12 et le 14 novembre 2023 (source: Météo France)

On peut constater un fort gradient orographique avec des cumuls qui ont dépassé 200 mm dans le Massif du Mont Blanc, mais ont été inférieurs à 40 mm dans la basse vallée de L'Arve. L'analyse des données enregistrées aux stations pluviométriques situées sur l'ensemble du bassin versant de l'Arve côté suisse et français confirme le gradient orographique constaté ci-dessus (cf. détails Annexe I). On peut constater une forte variabilité spatiale, avec des cumuls journaliers et pluri-journaliers variant d'un facteur supérieur à 4. Ainsi, sur la période du 12 au 14 novembre 2023 (3 jours) les stations situées à basse altitude comme Bonneville et Ayze ont des cumuls autour de 40 mm, alors que les stations situées en altitude ont enregistré des cumuls supérieurs à 160 mm (p.ex. Clusanfe 184mm, Vallorcine 232 mm).

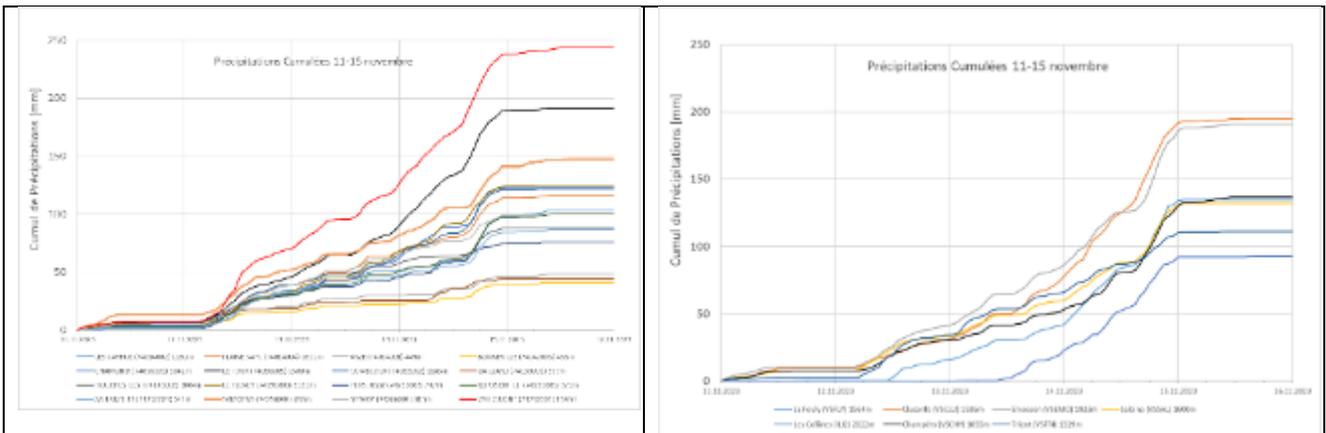


Figure 5: Cumul des précipitations du 11 au 15 novembre 2023 stations FR (à gauche - source SM3A) et CH (à droite - source GIN).

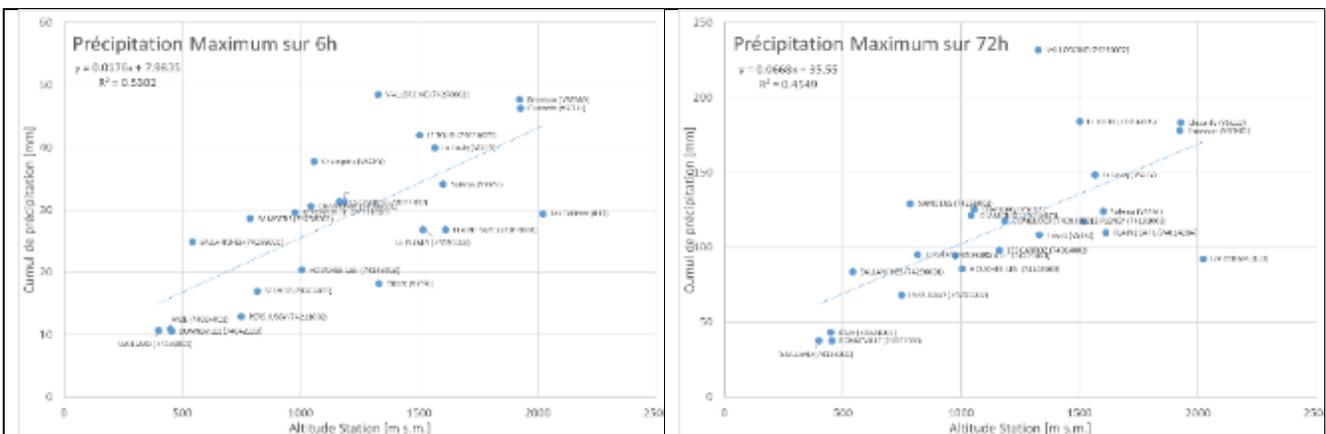


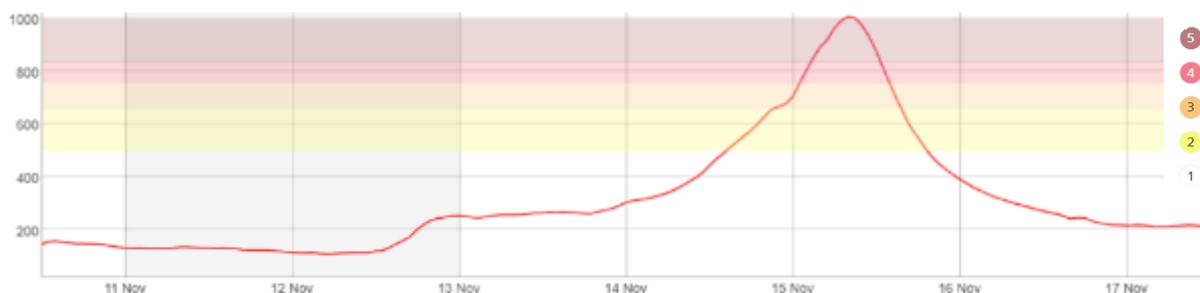
Figure 6: Précipitation cumulée en fonction de l'altitude de la station : maximum sur 6h (à gauche) et maximum sur 72h (à droite).

Le temps de retour des précipitations ponctuelles mesurées aux stations pluviométriques pour des durées de 1 à 3 jours est inférieur à 10 ans. Le temps de retour sur des durées de 4h à 12h des précipitations tombées en altitude le 14 novembre en deuxième partie de journée devrait être néanmoins évalué.

### 3 REPONSE HYDROLOGIQUE

#### 3.1 En bref

- Suite aux précipitations très importantes du 12 au 14 novembre 2023, L'Arve subit pendant cette période une crue exceptionnelle, de degré de danger 5 (niveau de danger maximum selon OFEV à  $> 820 \text{ m}^3/\text{s}$ ) avec un débit maximum atteint le 15.11.2023 à 8h de **1010  $\text{m}^3/\text{s}$** , valeur la plus haute mesurée jusqu'à ce jour (depuis 1904).



- Une analyse statistique effectuée à posteriori (c'est-à-dire en intégrant l'événement du 15 novembre) lui attribue une **période de retour de 200 ans**. Avant l'évènement, une période de retour de 300 ans aurait été attribuée au débit de  $1010 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ces évaluations sont faites en admettant une hypothèse de stationnarité<sup>2</sup>, i.e. qu'il n'y a pas de tendances dans les débits extrêmes, dus notamment aux changements climatiques.
- L'hypothèse de la stationnarité devra être analysée plus en détail, notamment au niveau des processus hydrométéorologiques, car les tests statistiques appliqués à la série des débits maximums ne permettent pas de la rejeter.
- C'est la contribution exceptionnelle, surtout pour la saison, de la partie haute du bassin versant de L'Arve qui a produit cette crue remarquable. La partie basse du bassin, généralement très active en saison froide, a beaucoup moins contribué.
- Une comparaison avec les crues les plus importantes observées jusqu'alors, celles de mai 2015 et de septembre 1968, montre la similarité entre ces événements, notamment sur les vitesses de montée en crue et en décrue.

<sup>2</sup> Stationnarité : exprime que les propriétés statistiques du phénomène ne varient pas dans le temps.

## 3.2 Débits de L'Arve

Le débit maximum a été atteint le 15.11.2023 à 8h et correspond à 1010 m<sup>3</sup>/s. C'est la valeur la plus haute mesurée jusqu'à ce jour (depuis 1904). La Figure 7 ci-dessous présente les débits mesurés de l'Arve à Genève sur la période du 12 au 17 novembre 2023. Sont aussi représentées les crues de septembre 1968 et de mai 2015, les plus importantes enregistrées depuis 1924 et jusqu'en novembre 2023.

*A noter que les valeurs maximales du débit de pointe pour la station Genève Bout du Monde ainsi que celles des stations françaises présentées dans la suite de ce rapport peuvent faire l'objet de révisions. En effet, ces valeurs correspondent à des extrapolations, très importantes pour certaines stations, des courbes de tarage par rapport aux plus grands débits jaugés. Des changements morphologiques (érosions ou dépôts) peuvent aussi modifier sensiblement les courbes de tarage.*

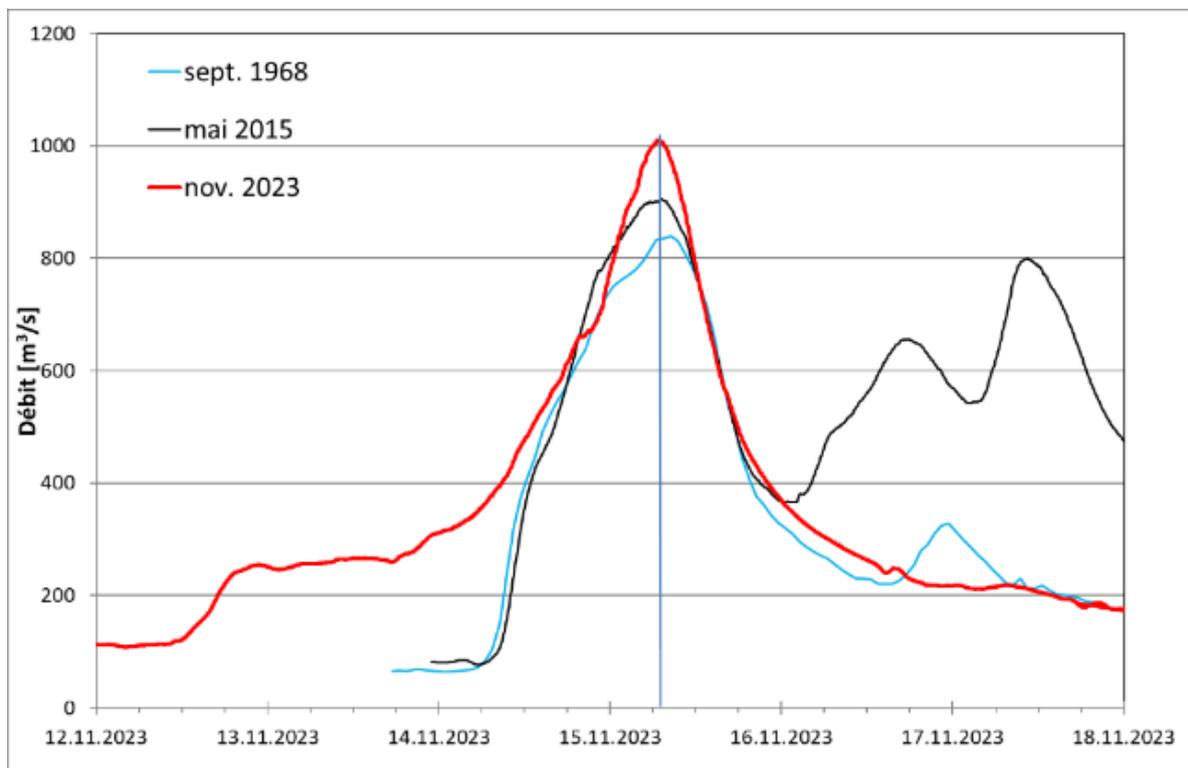


Figure 7 : Hydrogramme de la crue du 15 novembre 2023 et comparaison avec les crues de mai 2015 et de septembre 1968.

### 3.2.1 Dynamique de la crue

Le 12 novembre constate une première montée, rapide, de 120 à 230 m<sup>3</sup>/s suite au premier épisode de précipitations intenses du 12 novembre suivi d'un plateau pendant 24h. Le corps principal de la crue commence le 14 novembre vers 18h suite à l'épisode de précipitations intenses qui apporte entre 40 et 50 mm en 6h sur le versant occidental des Alpes. Le temps de montée est autour de 36h à 39h, nettement plus long que celui des crues de mai 2015 et de septembre 1968 (21 à 24h).

Le gradient (taux d'accroissement/diminution de débit par unité de temps) moyen pendant la montée entre le 13 novembre à 17h40 et le 15 novembre à 6h40 (37h) a été de 20.25 [m<sup>3</sup>/s h], alors que le gradient maximum horaire a été de 63.5 [m<sup>3</sup>/s h] le 14 novembre peu avant minuit. Le gradient maximum sur 6h, enregistré entre 14 novembre à 22h30 et 15 novembre 04h30, a été de 44 [m<sup>3</sup>/s h]. Le débit d'environ 1000 m<sup>3</sup>/s est maintenu pendant 1h30. Par la suite une décrue rapide, avec des gradients plus grands en valeur absolue à ceux de la montée, s'amorce à partir de 08h00 et se poursuit jusqu'au 16 novembre à 15h00. Le gradient calculé sur 31h est de -24.13 [m<sup>3</sup>/s h] avec un maximum de -66 [m<sup>3</sup>/s h] le 15 à midi. Le gradient maximum sur 6h pendant la décrue a été de -58 [m<sup>3</sup>/s h]; il a été enregistré le 15 novembre entre 09h30 et 15h30.

On peut constater que la forme de la crue de septembre 1968, ainsi que celle de mai 2015 sont similaires à la crue de novembre 2023, quoique les débits de pointe soient plus réduits de respectivement 16.8% et 8.6% et que les gradients sur la montée soient plus importants.

### 3.2.2 Lame écoulée

Le panneau de gauche de la Figure 8 ci-dessous présente le cumul du volume écoulé pendant l'événement exprimé en lame d'eau [mm]. Il s'agit d'un volume divisé par la superficie du bassin. Cette représentation facilite la comparaison avec les précipitations. Sont aussi représentées les précipitations moyennes sur le bassin versant de L'Arve (calcul Hydrique) et une estimation de l'écoulement de crue, calculé en soustrayant du débit observé un débit de 'base' de 100 m<sup>3</sup>/s constant pendant l'événement. Le panneau de droite compare la lame écoulée en novembre 2023 à celles enregistrées des crues de septembre 1968 et de mai 2015.

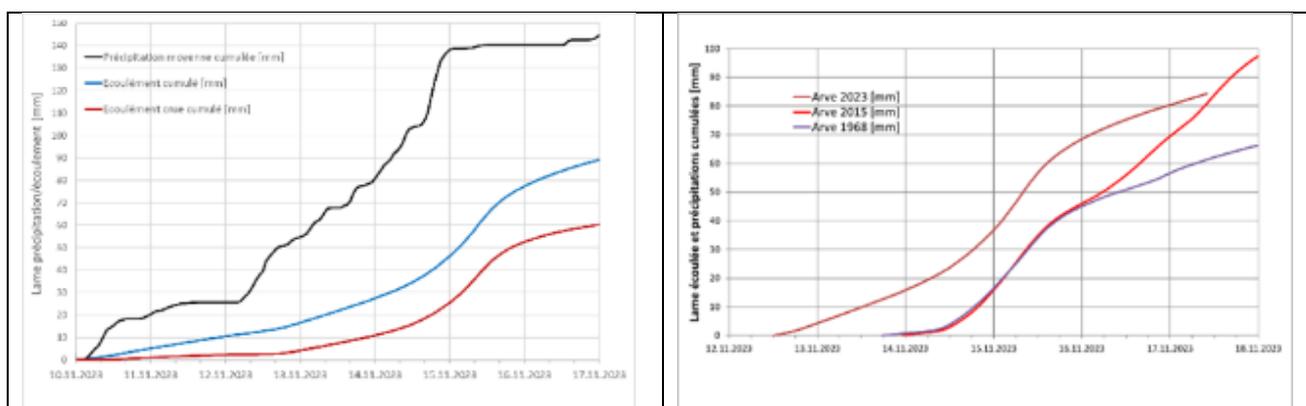


Figure 8 : Lames écoulées et précipitations cumulées pour la période 12.11.2023 au 18.11.2023 et comparaison avec les événements de septembre 1968 et de mai 2015.

On peut constater que pour les 120 h depuis le 12 novembre à midi jusqu'au 17 novembre à midi il s'est écoulé une lame de 85 mm. Ceci représente un volume 168 millions de m<sup>3</sup> soit 7.5% de l'écoulement moyen annuel de l'Arve. Cette lame d'eau est supérieure aux précipitations sur la partie aval du bassin mais représente autour de 40% des précipitations cumulées enregistrées dans les parties les plus arrosées du bassin versant (voir ci-dessus). La lame écoulée maximum sur 24h est de 34,3 mm (68.8 millions de m<sup>3</sup>).

### 3.3 Estimation de la période de retour de la crue du 15 novembre 2023

En fonction de différentes hypothèses concernant l'ajustement statistique des débits maximums de l'Arve à Genève, nous pouvons obtenir des estimations différentes du temps de retour. Il s'agit notamment d'hypothèses concernant la période de mesure, la distribution de probabilité (Gumbel, Generalized Extreme Value – GEV, ou autre) ou la méthode d'estimation des paramètres (maximum de vraisemblance/ Maximum Likelihood –ML ou moments linéaires / Linear Moments - L-MOM). En ce qui concerne les mesures, on dispose de mesures systématiques depuis 1904. Dans son évaluation statistique, l'OFEV utilise toute la série à disposition (c.à.d. depuis 1904) tandis que l'OCEau utilise les données depuis l'année 1924 en considérant que la station a été déplacé deux fois : en 1923 et en 1971. La Figure ci-dessous présente le débit maximum annuel depuis 1904, ainsi que la moyenne et l'écart-type centrés calculés sur une fenêtre glissante de 25 ans.

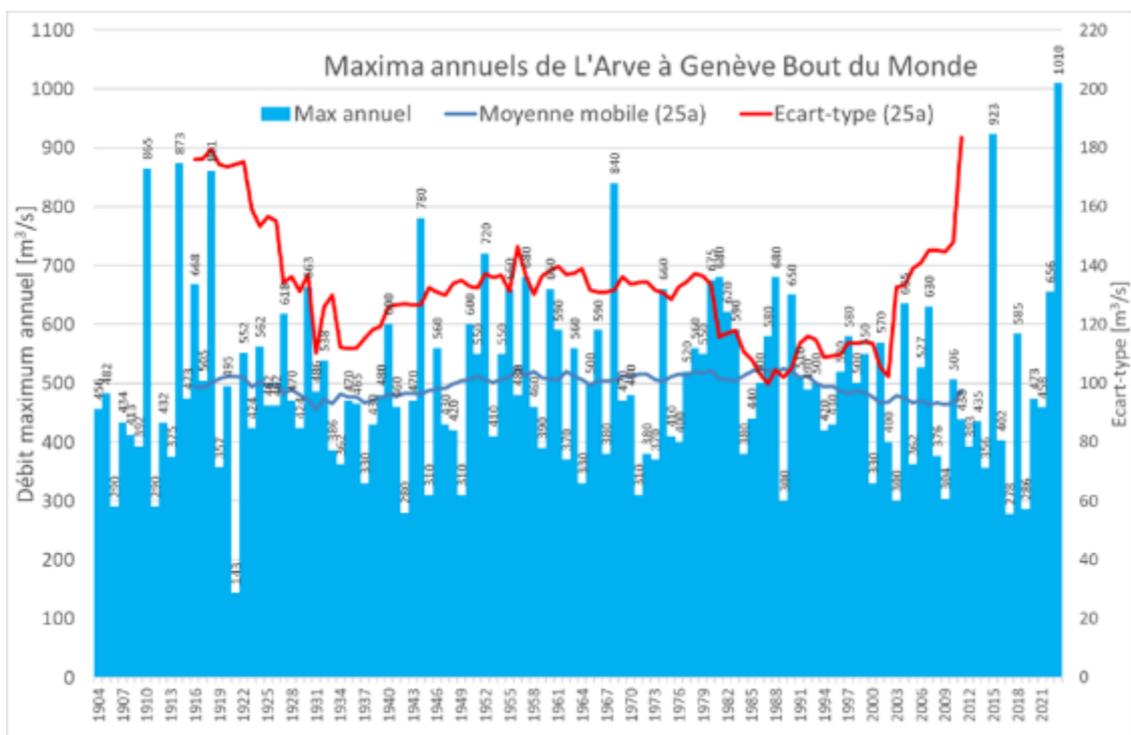
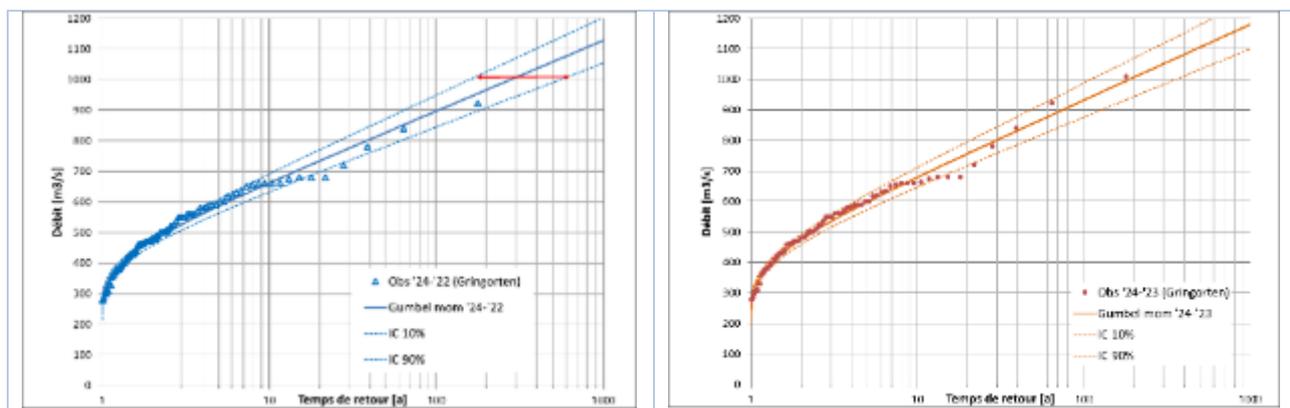


Figure 9: Débit maximum annuel de l'Arve à Genève (1904-2023); moyenne et écart-type calculés sur une fenêtre glissante de 25 ans.

On peut constater que la moyenne mobile reste relativement stable autour d'une valeur de 500 m³/s. Malgré les événements exceptionnels de 2015 et 2023 la valeur sur les derniers 25 ans est dans la partie inférieure de la plage de variation. On ne peut pas déceler une augmentation de la moyenne du débit maximum ces dernières années. Par contre on constate une augmentation de l'écart-type par rapport aux décennies précédentes. Toutefois il faut rester prudent dans les interprétations, parce que d'une part l'erreur type de son estimation est très importante (nettement plus importante que celle de la moyenne) et d'autre part des valeurs similaires de ce paramètre statistiques ont été déjà rencontrées au début du XX<sup>ème</sup> siècle.

Pour les ajustements statistiques, l'OCEau utilise la distribution de Gumbel alors que l'OFEV utilise actuellement la distribution *GEV (Generalized Extreme Value)*; d'autres distributions seraient envisageables. On doit noter que les ajustements présentés ci-dessous sont faits en considérant une hypothèse de stationnarité : c'est-à-dire qu'on suppose que la distribution des valeurs extrêmes ne change pas dans le temps. Cette hypothèse ne peut pas être rejetée sur la base de l'échantillon de débits maximums observés à Genève. Elle sera analysée dans la suite du document, notamment dans la section consacrée à la distribution spatiale de la réponse hydrologique, mais des études plus approfondies de ce sujet devraient être prioritaires.

Comme méthodes d'estimation des paramètres des distributions, on peut utiliser notamment la méthode des moments, du maximum de vraisemblance ou des moments linéaires (L-moments). Compte tenu des incertitudes, il convient d'utiliser des limites d'intervalle de confiance de l'estimation. Afin d'illustrer ces incertitudes, nous présentons ci-dessous deux ajustements faits en utilisant la même méthodologie (distribution de Gumbel, méthode des moments, série depuis 1924), mais faites en excluant et en incluant le débit de pointe enregistré le 15 novembre. Le premier ajustement, fait sur la série des maxima annuels 1924-2022 (panneau de gauche) attribue un temps de retour de 300 ans (intervalle de confiance entre 170 et 600 ans) au débit de 1010 m<sup>3</sup>/s. C'est la période de retour qu'on aurait attribuée le soir du 14 novembre 2023 à la pointe enregistrée le 15 novembre. Une analyse à posteriori, qui intègre la crue du 15 (panneau de droite), lui attribuerait un temps une période de retour de 200 ans avec un intervalle de confiance compris entre 120 et 400 ans.



**Figure 10 : Ajustement statistique des débits maximum instantanés sur la période 1924-2022 (à gauche) et 1924-2023 (à droite) avec intervalles de confiance à 80%; distribution de Gumbel avec ajustement selon la méthode des moments.**

La valeur centrale de l'ajustement proposé par l'OFEV en utilisant sur la série 1904-2019 la distribution GEV et la méthode du maximum de vraisemblance attribue au débit de pointe (1010 m<sup>3</sup>/s) un temps de retour supérieur à 300 ans (voir le panneau de gauche de la Figure 11 ci-après). La borne supérieure de l'intervalle de confiance à 97.5% implique un temps de retour supérieur à 100 ans. L'ajustement de la GEV sur la série 1924-2023 en utilisant les méthodes du maximum de vraisemblance (ML) et des L-Moments (L-MOM) aboutit à des estimations du temps de retour de respectivement 300 et 400 ans (Figure 10 panneau de droite). Néanmoins nous

estimons que le choix de la GEV devrait être justifié, car l'ajustement produit une borne supérieure (paramètre de forme inférieur à 0). A notre avis, les caractéristiques hydrométéorologiques du bassin versant de L'Arve ne supportent pas une telle borne.

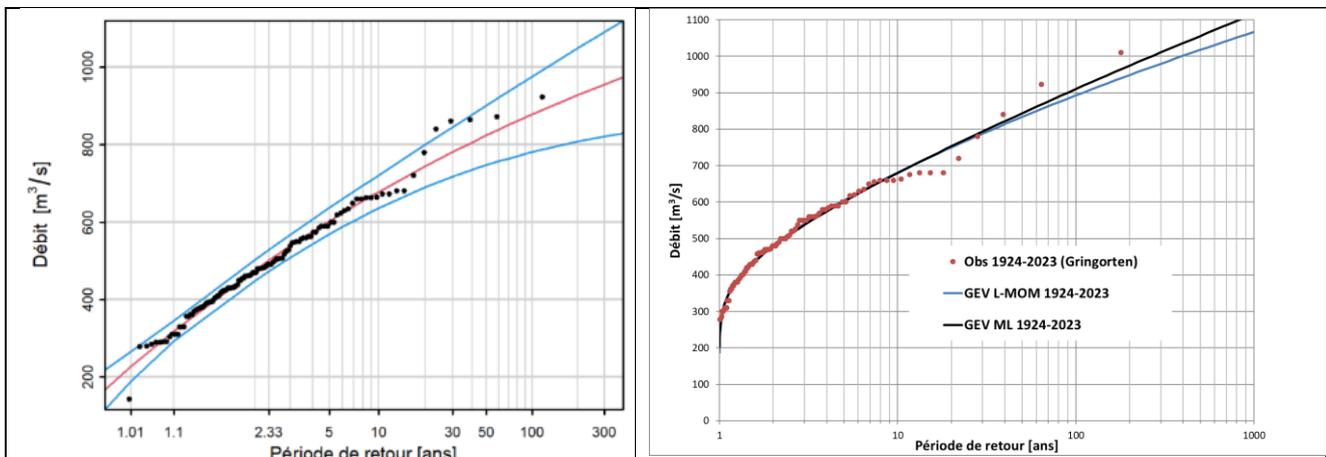


Figure 11 : Ajustement statistique des débits de pointe annuels 1904-2019 en utilisant la GEV, (Source : [www.hydrodaten.admin.ch](http://www.hydrodaten.admin.ch)) et ajustement de la GEV sur la série 1924-2023 avec les méthodes ML et L-MOM

En conclusion, et en tenant compte de toutes les incertitudes, l'OCEau estime que le débit de pointe de la crue du 15 novembre 2023 représente un débit bicentennal (Q200).

### 3.4 Variabilité spatiale de la réponse hydrologique à l'intérieur du bassin

A la station hydrométrique Genève Bout-du-Monde, le bassin versant de l'Arve a une superficie de 1976 Km<sup>2</sup>. Il est caractérisé par une gamme très étendue d'altitudes (de 370 à 4800 m.s.m.) qui implique une importante variabilité climatique et des conditions météorologiques. On constate aussi une variabilité du substrat géologique et de l'occupation du sol. Tous ces facteurs apportent une importante variabilité à la réponse hydrologique à l'intérieur du bassin. Cette variabilité spatiale est approchée par l'exploitation des mesures hydrologiques faites sur le cours principal et les affluents de la partie française du bassin versant, mesures transmises par le SM3A. La Figure ci-dessous présente le bassin versant de L'Arve et les stations hydrométriques pour lesquelles nous disposons des mesures de débit pour la crue du 15 novembre 2023.

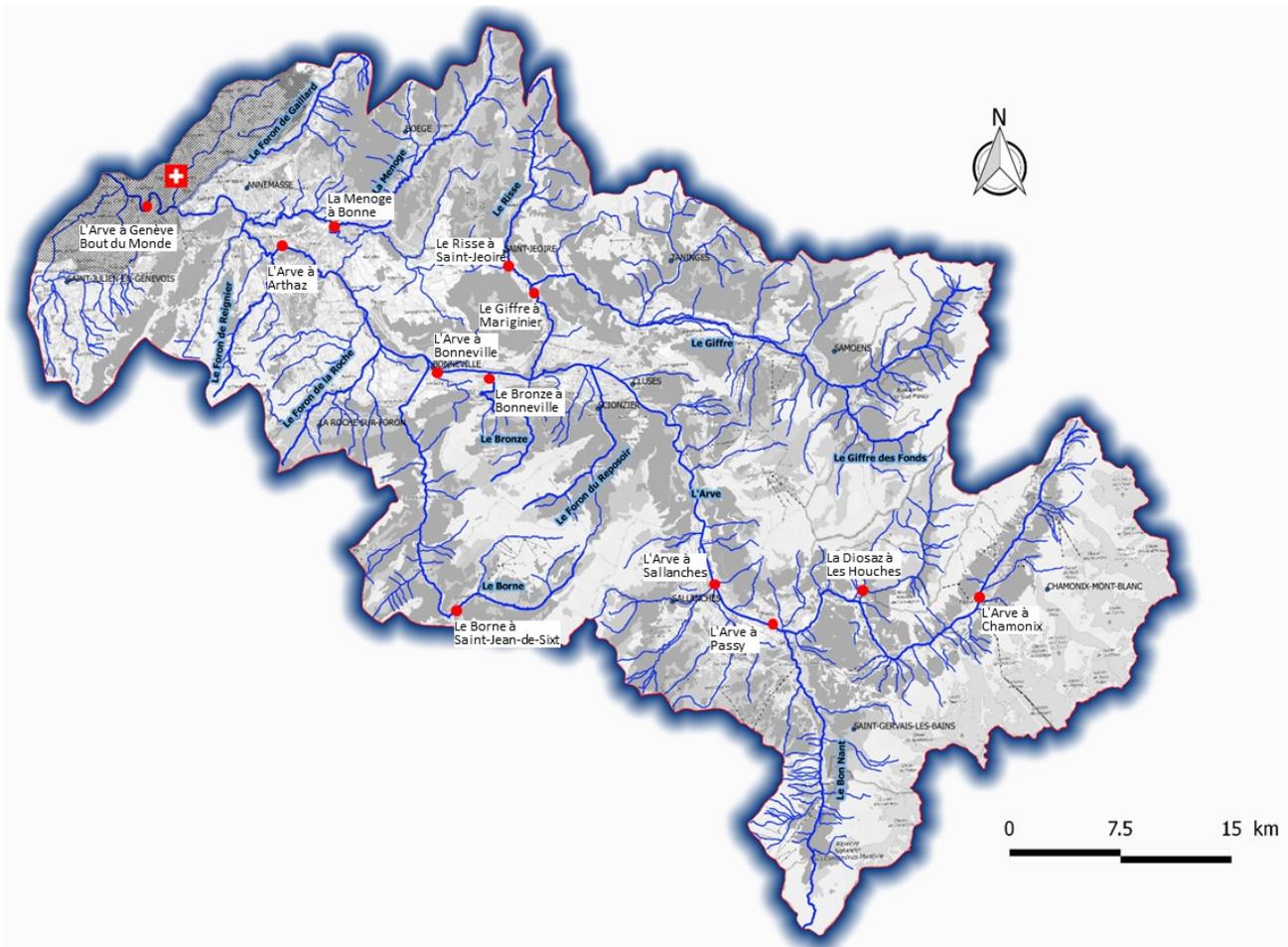


Figure 12: Stations hydrométrique du bassin versant de l'Arve

La Figure ci-dessous présente les débits spécifiques [ $\text{m}^3/\text{s km}^2$ ] des sous-bassins instrumentés ainsi que les lames écoulées cumulées depuis le début de la crue [mm]. On peut noter que les sous-bassins de moyenne montagne situés dans la partie amont ont des débits spécifiques les plus élevés.

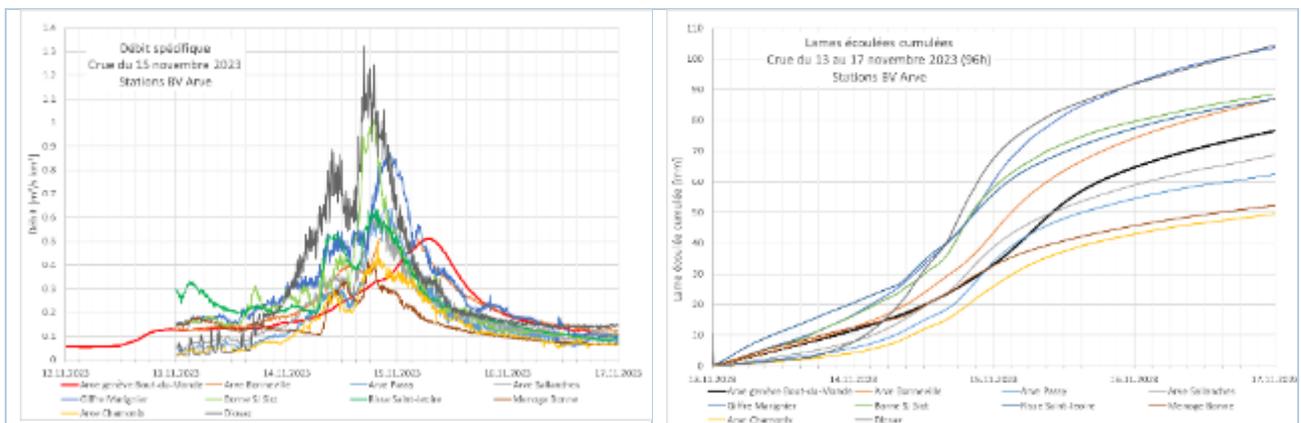


Figure 13: Débits spécifiques [ $\text{m}^3/\text{s km}^2$ ] et lames écoulées [mm] enregistrées aux stations hydrométriques du bassin versant de l'Arve. (Source : SM3A)

Les débits spécifiques les plus importants ont été enregistrés sur la Diosaz, le Borne à Saint-Jean-de-Sixt et sur le Giffre à Marignier. La Diosaz est un torrent qui prend sa source dans le massif des Aiguilles Rouges et a une superficie de  $54 \text{ km}^2$ . Toutefois ces valeurs doivent être interprétées

avec prudence, car la station est récente et sa courbe de tarage n'est probablement pas encore suffisamment consolidée pour cette gamme de débits. Le Borne à St-jean de Sixt et le Giffre à Marignier, qui ont des bassins versants montagneux, ont eux aussi des débits spécifiques très élevés. Les lames écoulées de ces bassins ont été supérieures voire nettement supérieures à celles enregistrées à Genève.

Les débits spécifiques et la lame écoulée de l'Arve à Chamonix ont été relativement faibles, mais exceptionnels à cette saison pour ce bassin versant à forte influence glaciaire. En effet le débit maximum de novembre 2023 est plus du triple du précédent record pour un mois de novembre. C'est aussi le cas de l'Arve à Sallanches qui a enregistré le plus important débit enregistré et le double du précédent record pour un mois de novembre. Ces remarques sont valables aussi pour l'Arve à Passy et Sallanches. Néanmoins les bassins ont eu des débits spécifiques et lames écoulées supérieures à ceux de l'Arve à Chamonix grâce à une plus grande superficie de moyenne montagne caractérisée par des fortes précipitations et des températures supérieures à 0°C. L'Arve à Sallanches a enregistré son débit record depuis le début des mesures, débit supérieur de 40% au précédent record établi en juin 2002.

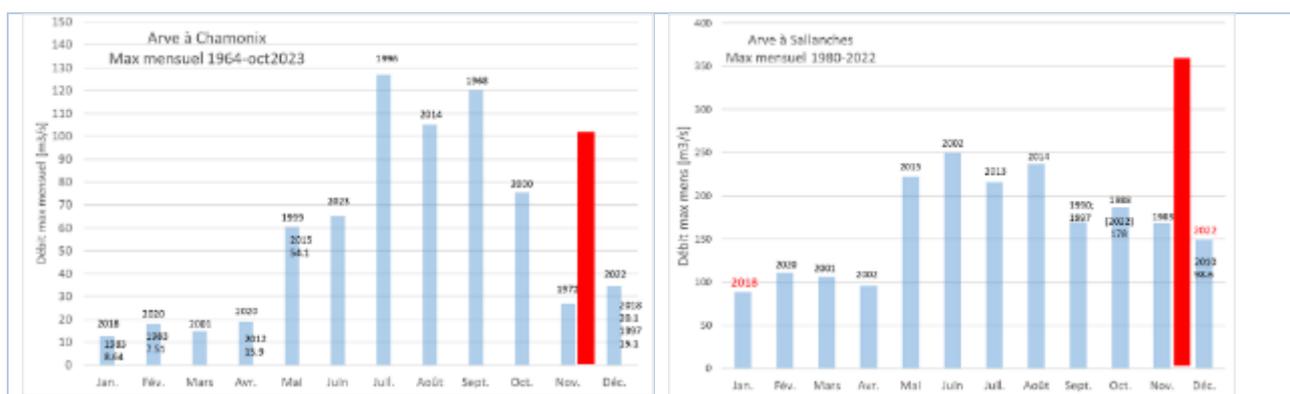


Figure 14: Débits maximums mensuels de l'Arve à Chamonix (à gauche) et à Sallanches (à droite)

Le Tableau 1 ci-dessous présente les débits maximums enregistrés à l'intérieur du bassin pour les crues de novembre 2023 et de mai 2015 ainsi que les débits maximums pour un ensemble de temps de retour à l'aide de la procédure CRUCAL, en utilisant une distribution de Gumbel (source: <https://www.hydro.eaufrance.fr/>, consultée le 20.12.2023. En *Gris*: valeurs à plausibiliser).

Tableau 1: Débits de pointe des crues de novembre 2023 et mai 2015 ainsi que débits caractéristiques (source : eaufrance)

Station	Q11.23 [m³/s]	Tr11.23 [a]	Q05.15 [m³/s]	Q2 [m³/s]	Q5 [m³/s]	Q10 [m³/s]	Q20 [m³/s]	Q30 [m³/s]	Q50 [m³/s]	Q100 [m³/s]	Période
L'Arve à Chamonix	100	50-100	54	59.1	71.4	79.6	87.4	91.9	97.6	105	1941-2022
L'Arve à Sallanches	357	>100	222	161	194	217	238	251	266	287	1980-2022
Le Giffre à Marignier	387	30-40	456	190	260	305	349	375	406	450	2011-2022
Le Risse à St-Jeoire	36.4	2-3	59.9	33.8	43.0	49.1	54.9	58.3	62.4	68.9	1974-2022
Le Bronze à Bonneville	19.0	40	>14.7	9.8	12.9	15	16.9	18.1	19.5	21.4	1969-2022
Le Borne à	67.4	100	53.8	28.4	38.7	45.5	52	55.8	60.4	66.8	1980-

St.Jean de Sixt											2022
L'Arve à Arthaz	1250		1020	426.0	537.0	611.0	681.0		773.0	841.3	1961-2011
La Menoge à Bonne	60	2	95.3	58.9	71.8	80.4	88.6	93.3	99.2	107	2008-2022
L'Arve à Genève	1010	200	923	<b>480</b>	<b>600</b>	<b>680</b>	<b>760</b>	<b>800</b>	<b>855</b>	<b>930</b>	1924-2023

La Figure ci-dessous compare les débits spécifiques de pointe des stations situées dans le bassin versant de l'Arve pour les crues de mai 2015 et de novembre 2023. On peut ainsi constater visuellement que le Borne, l'Arve à Sallanches et l'Arve à Chamonix ont eu des débits supérieurs en novembre 2023, alors que les pointes ont été plus importantes en mai 2015 sur le Giffre, le Risse et la Menoge.

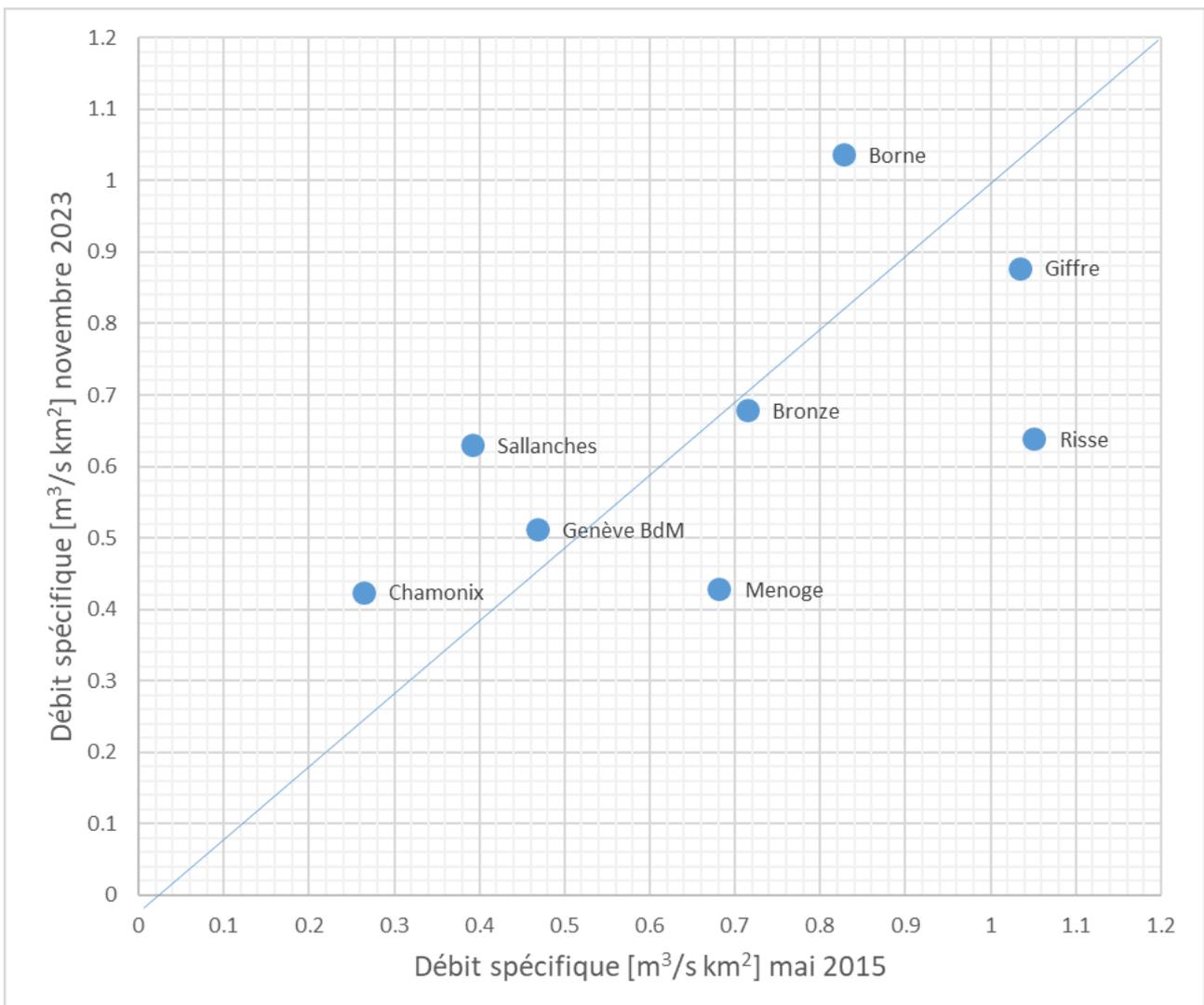


Figure 15: Débits spécifiques de pointe [m³/s Km²] pour les événements de mai 2015 et novembre 2023.

## 4 GESTION DE L'ÉVÈNEMENT

### 4.1 En bref

- ➔ Grâce à une excellente coordination des différents partenaires qui a débuté quelques jours avant l'évènement, la crue exceptionnelle de l'Arve survenue le 15.11.2023 a pu traverser le canton sans dégâts majeurs.
- ➔ La Cellule de Surveillance des Crues (CELSUCR) de l'Office cantonal de l'eau (OCEau) a rempli sa mission avec succès en assurant un suivi du phénomène hydrométéorologique (y. c. les semaines précédant l'évènement), en prenant des mesures préventives pour limiter les dégâts, en alertant à temps les différents partenaires pour la mise en place de mesures vers les lieux sensibles, en tenant compte de l'expérience de la crue de 2015.
- ➔ Une régulation des débits du Rhône et par conséquent du niveau du lac, avant et pendant l'évènement, ont permis de maîtriser la situation à la Jonction et de limiter le risque de débordement au niveau du lac, compte tenu du niveau haut de celui-ci, en raison des pluies importantes précédant l'évènement.
- ➔ Au gré de l'évolution de l'évènement, un grand nombre de ponts, routes, d'accès à des parkings et à des chemins pédestres ont dû être fermés pour assurer la sécurité de la population.
- ➔ Toutes les mesures qui ont été prises visent à garantir la sécurité du public, et à prévenir tout dégât important, notamment au vu du « tourisme de crue » en cours d'évènement ; celui-ci a en effet drainé de nombreuses personnes aux abords de l'Arve, afin de contempler la crue historique.

## 4.2 Acteur.rices de l'évènement

La gestion de cette crue exceptionnelle de l'Arve a été possible grâce à la coordination et le suivi de divers acteurs et actrices clés. Ceux et celles-ci sont décrits dans l'organigramme ci-dessous.

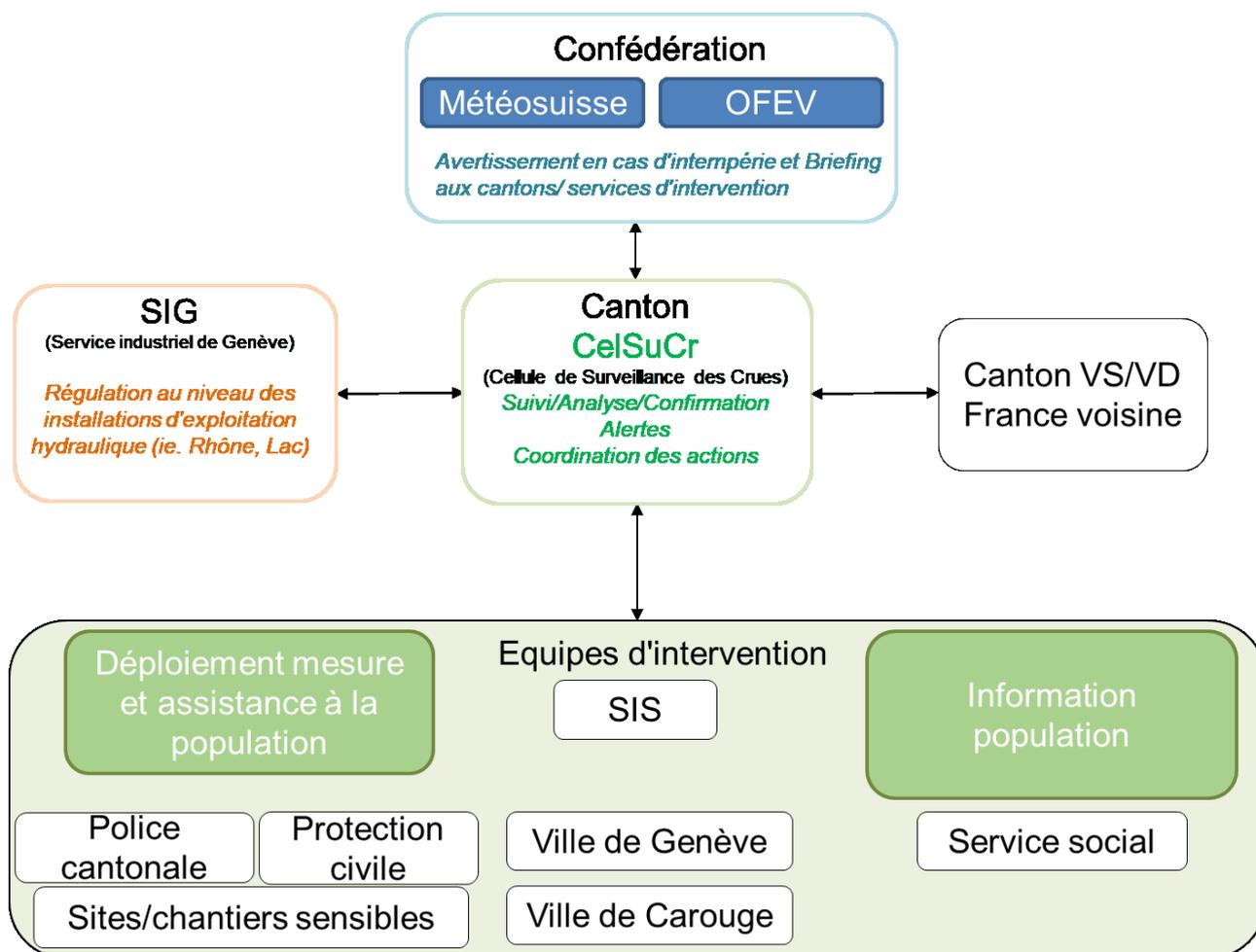


Figure 16: Organisation de la surveillance et intervention en cas de Crue

La mise en place de mesures, assistance et information à la population est pilotée par le service d'incendie et de secours (SIS) en collaboration avec la ville de Genève et de Carouge. Les rôles respectifs de ces instances d'intervention sont résumés ci-après:

1. Limitation, voire fermeture des accès au niveau des points critiques : ville de Genève et SIS
2. Installation des mesures mobiles de protection contre les crues et intervention en cas d'inondation: SIS ou partenaires contactés
3. Gestion de la circulation routière : Police
4. Surveillance des zones interdites d'accès : Protection civile

### 4.3 Rôle et objectifs de la Cellule de Surveillance des Crues

La Cellule de Surveillance des Crues (CeISuCr) est une instance de l'Office Cantonal de l'Eau (OCEau), gérée par des collaborateur-trices du service de l'aménagement des eaux et de la pêche (SAEP). CeISuCr assure une veille hydrologique permanente sur le territoire du canton de Genève afin de suivre et documenter les phénomènes hydrométéorologiques des bassins versants de Genève en particulier sur: L'Arve, le Rhône et le Léman. En cas de prédiction d'un évènement de crue sur l'Arve, CeISuCr est responsable d'alerter les partenaires clés (présenté ci-dessus) sur la situation locale, et assure un suivi accru du bassin-versant de l'Arve, y compris le niveau du Léman et le débit du Rhône. Par ailleurs, une surveillance de la situation sur les autres cours d'eau genevois est faite en parallèle, en fonction de la localisation des fortes précipitations.

Sur la base: de l'observation des données en temps réel (pluies, débits, températures, etc.), des outils de prédiction hydrométéorologique et de l'expertise des membres de CeISuCr, une alerte (et son suivi) est mise en place envers les partenaires, pour déclencher différentes actions en fonction des seuils décrits dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2: Seuils d'action cantonaux et mesures

Seuil d'action en fonction du débit de L'Arve (m <sup>3</sup> /s)	Conséquences du dépassement du seuil	Mesures déployées par les équipes d'intervention
250	<b>CeISuCr</b> : Début de la vigilance et de la surveillance accrue. En cas de prévision d'atteinte du prochain seuil, préalerte des partenaires puis validation de l'alerte en cas de confirmation d'atteinte du prochain seuil dans les 24-48h.	Interdiction des accès sous les ponts/souterrains Information aux populations à risque
400	<b>Conséquences</b> : Premiers débordements sous les ponts et le long du cours d'eau. <b>CeISuCr</b> : Confirmation d'alerte et seuils risquant d'être atteints	Evacuation des populations situées sous les ponts Régulation au niveau du barrage du Seujet Information aux bâtiments à risques Intervention sur demande des équipes SIS
600	<b>Conséquences</b> : Premiers cas d'engouffrement dans les réseaux <b>CeISuCr</b> : Confirmation d'alerte et seuils risquant d'être atteints En cas de prévision d'atteinte du prochain seuil	Mesure de protection mobiles (le long des berges, aux points vulnérables des bâtiments, ...) Fermeture de ponts et surveillances des infrastructures Information à la population Gestion du trafic
800	<b>Conséquences</b> : Risque de dommages sur certains ponts et risque de débordement du cours d'eau <b>CeISuCr</b> : suivi et information sur l'évolution de la crue / décrue	Gestion et évacuation potentielle des embâcles Observation de la sécurité structurelle des ponts

L'équipe est également consultée tout au long de l'évènement, ainsi que pour confirmer la fin des mesures de protection mises en place. L'instance a également été fortement sollicitée en cours d'évènement par les médias, en raison de la qualité exceptionnelle de l'évènement et son impact sur les mouvements de la population.

Dans le cas d'un retour stable à la normale, l'état d'alerte est levé par l'équipe CeISuCr.





Figure 18 : Pose de protection contre les crues (Quai Ansermet), (à gauche sac de sable à droite boudins gonflables)



Figure 19 : Mesures de protection mobile pour les entrée de parking (en cours d'installation)

Elles ont été placées au droit des zones les plus basses aux abords de l'Arve, notamment sur le quai Ansermet, au niveau de certaines entrées de parkings souterrains qui ont été fermés par précaution, ainsi qu'au niveau du bâtiment de la RTS, particulièrement menacé. Au moment du pic de  $1010 \text{ m}^3/\text{s}$ , l'Arve n'a pas débordé à ces points, toutefois de justesse.

#### 4.5 Fermeture des ponts, des routes et cheminements pédestres

Les mesures de protection mises en place visent à éviter la présence de personnes et de véhicules à des endroits présentant un risque important d'inondation ou qui pourraient devenir instables en cas de crue.

Au gré de l'évolution de l'événement, un grand nombre de ponts, routes, d'accès à des parkings et à des chemins pédestres ont dû être fermés pour assurer la sécurité de la population.

**Fermeture des ponts:** lors d'évènement de crue d'une telle importance, les ponts représentent des ouvrages sensibles, puisque par définition ils se situent en travers du cours d'eau et sont donc particulièrement exposés.

Plusieurs facteurs peuvent fragiliser et mettre en danger ces structures :

- Le risque d'affouillement des bases des piles des ponts

- Le risque d'embâcle, provoqué par les troncs d'arbre et/ou les matériaux charriés
- Le risque de chocs générés par les troncs et les matériaux
- La pression exercée par le débit important sur les culées ou le tablier des ponts

La décision de fermeture des ponts est prise par les ingénieurs civils de la ville de Genève, du Service de l'aménagement, du génie civil et de la mobilité (AGCM), en fonction de l'observation de l'évolution de la crue, et de la revanche disponible sous les ponts.

L'évènement a nécessité la fermeture de cinq ponts : Ponts de Vessy, des Acacias et de la Fontenette, Pont du Val d'Arve et Pont de Carouge.



Figure 20 : Fermeture des ponts

Ci-dessous, un aperçu de la situation au niveau du Pont du Val d'Arve, où la revanche était encore relativement faible 2 h après le pic de crue. Les structures métalliques sous l'arcade favorisent la formation d'embâcles, conduisant à des dépôts importants à l'amont du pont. Un phénomène d'érosion est observé à l'aval du pont en cours d'évènement.



Figure 21 : Pont du Val d'Arve: 2 h après le pic de crue : situation à l'amont – gauche et à l'aval - droite

Les ponts qui étaient suffisamment hauts, comme le pont Wilsdorf, le pont de Sierne et le pont de Saint-Georges sont restés ouverts durant la totalité de l'événement.

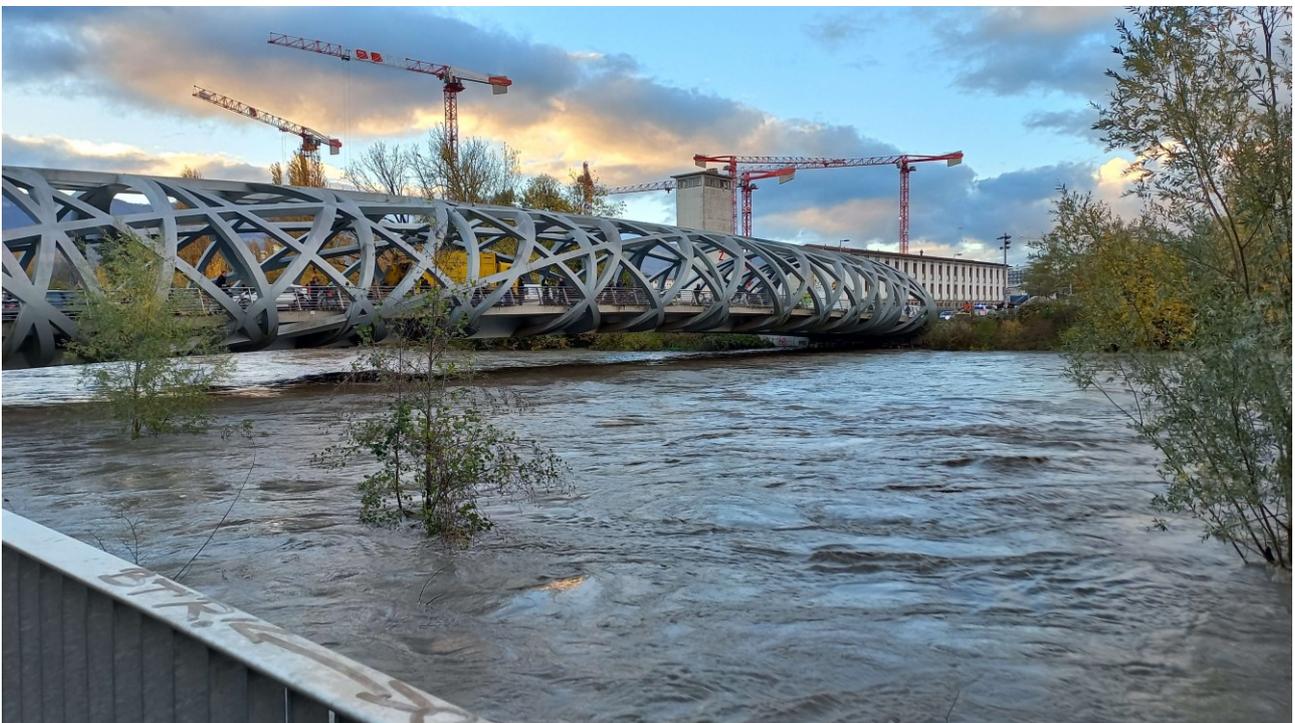


Figure 22 : Pont Hans Wilsdorf. L'accès piéton et voitures a été garanti grâce à sa structure surélevée.



Figure 23 : Pont de Sierne 15.11.2023 à 7:00 ( à gauche) Pont St-George 16.11.2023 à 11h28 (à droite)

**Fermeture des routes:** Outre les mesures provisoires présentées au chapitre 4.4, une partie du Quai E.-Ansermet a été fermée à la circulation routière, voire pour certains tronçons à la circulation

piétonne en raison du risque de débordement de l'Arve, et pour faciliter les actions des équipes d'intervention. Malgré le haut débit, l'Arve n'est pas sortie de son lit au niveau de ces points bas critiques.



Figure 24 : Fermeture de l'accès au Pont de Vessy

**Restrictions des accès aux cheminements piédestres** avant, durant et après l'évènement. Les accès piétons aux abords de l'Arve ont été fermés dans les zones submergées pour assurer la sécurité de la population plus de 24h avant l'évènement.



Figure 25: Restrictions des accès aux abords de l'Arve

#### 4.6 Lac Léman

La régulation du niveau du lac est régie par la concession d'exploitation des Services industriels de Genève (SIG), qui influe sur les débits du Rhône (cf. Figure 26, traitillé vert).

Quand le niveau sur l'Arve au pont Wilsdorf atteint  $372.15 \text{ m.s.m.}$  le débit du Rhône doit être réduit de sorte à favoriser le passage de L'Arve en centre-ville et limiter le plus longtemps possible le

risque d'engouffrement dans les réseaux. Ceci implique de manière inévitable une montée du niveau du lac dès le moment où le débit de sortie est inférieur au débit d'apport d'eau dans le Léman.

Dès le 14 novembre, la décision a été prise de maintenir le débit du Rhône au minimum, soit à 80 m<sup>3</sup>/s (barrage du Seujet), afin de ne pas aggraver la situation à la Jonction (cf. Figure 26, courbe orange clair). Ce débit minimum a été maintenu jusqu'à ce que le risque de débordement soit écarté.

Le résultat immédiat de cette décision a été une remontée très significative du niveau du lac Léman, de +30 cm en moins de 48h (voir Figure 26, courbe bleue foncée), en dehors de son enveloppe réglementaire (traitillé vert). Il faudra près d'une semaine d'ouverture complète du barrage du Seujet pour l'y ramener (courbe orange clair). Le même principe de gestion a été appliqué aux deux crues qui ont eu lieu dans le mois de décembre.

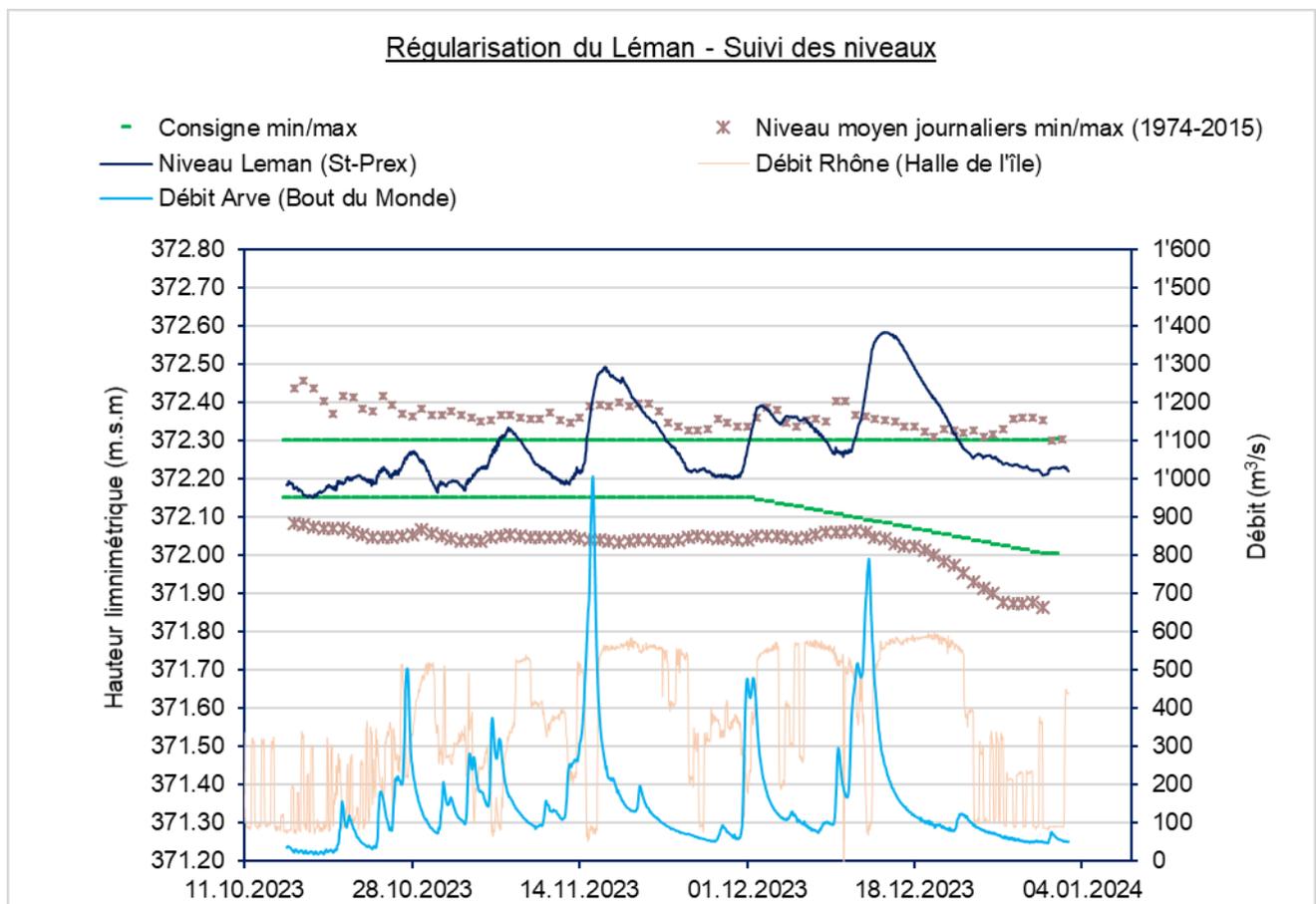


Figure 26 : Lac Léman – Remontée du niveau du lac pendant la crue de l'Arve de novembre 2023

## 5 DEGATS

### 5.1 En bref

- Grâce à une prévention des risques efficace, une bonne coordination des services d'intervention pendant l'événement, et aux mesures prises par le canton depuis 2015, les dégâts sont demeurés très localisés et de faible ampleur.
- Aucune victime n'est à déplorer malgré l'ampleur du phénomène.
- Les dégâts recensés sont uniquement des dégâts matériels tels que:
  1. Inondations de caves et sous-sols.
  2. Engouffrements dans le réseau d'eaux usées (EU).
- Aucun débordement de l'Arve de grande ampleur n'a eu lieu au centre-ville, ce qui a permis de limiter fortement les dégâts.
- L'effet sur l'Arve des événements de crues successifs fera l'objet d'études complémentaires notamment concernant : l'érosion des rives et le charriage de matériaux.
- Les propriétaires de réseaux privés concernés par ce risque de crue et les propriétaires et exploitant des réseaux principaux (VdG et SIG) doivent mettre en œuvre des mesures visant à protéger les biens et les personnes face à ce type d'événement, notamment via l'engouffrement dans les réseaux.

### 5.2 Inondations de caves et sous-sols

Les principaux dégâts ont été le fait d'inondations de caves et de sous-sols, essentiellement dans le quartier de la Jonction. Le SIS et la protection civile sont intervenus sur de nombreux sites, afin de mettre en place des équipements de pompage.

Les origines de ces inondations de sous-sols ont été de 3 natures :

- Infiltrations de nappe phréatique
- Entrées directes des eaux de l'Arve par les collecteurs EC
- Surcharge du réseau EU/EM par l'intrusion des eaux de l'Arve

Les équipes d'intervention et de secours ont ainsi été amenées à traiter environ une trentaine de bâtiments publics ou privés, touchés par ces remontées d'eau en sous-sol, que ce soit par refoulement des réseaux ou par infiltration de la nappe (cf. Figure 27). Notons toutefois que les bâtiments les plus impactés en Ville de Genève ont été ceux de Science I et Science II, du parking

et locaux annexes de la Coop de la Jonction et du Centre sportif des Vernets. (Source : SIS-CETA).

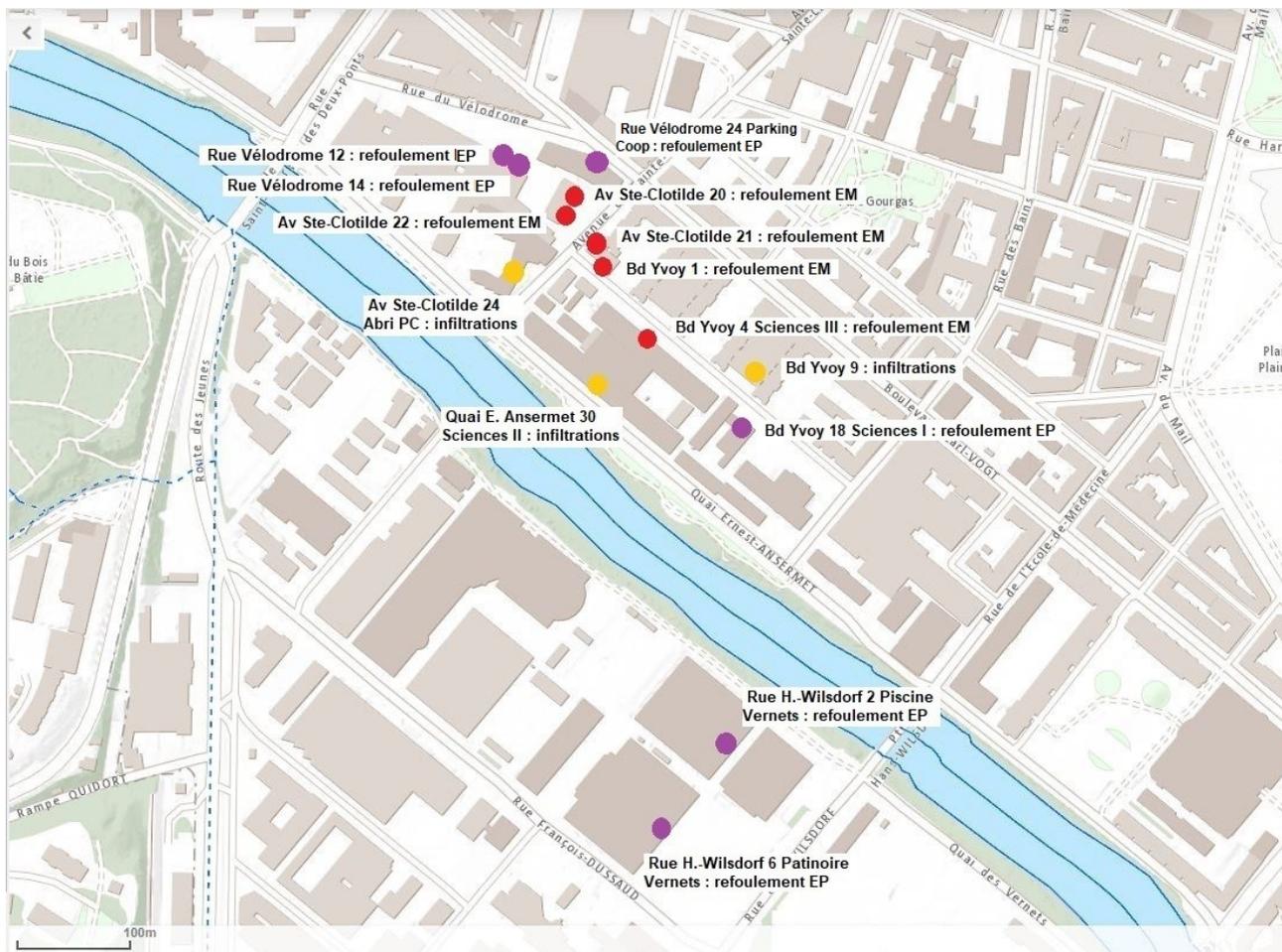


Figure 27 : Biens immobiliers impactés secteur Jonction (chaque point représente un sous-sol qui peut regrouper plusieurs bâtiments)

### 5.3 Engouffrements dans le réseau d'eaux usées

Pendant toute la durée de la crue de l'Arve, le réseau d'assainissement communal de la Ville de Genève a été touché. En effet, celui-ci est situé à proximité immédiate du tronçon urbain de l'Arve, sur les rives mêmes du cours d'eau.

Comme indiqué sur la Figure 28, plusieurs ouvrages du réseau d'assainissement existent (nommés « trop-plein » ou « déversoir d'orage ») sur les branches latérales, juste avant que ces dernières ne rejoignent le collecteur principal longeant les berges de l'Arve. Il s'agit, pour ceux qui ont engouffrés et d'aval en amont, des ouvrages Vg 22, Vg 12, Vg 44, Vg 13, Vg 26, Vg 21 et Vg 4.

Tous ces ouvrages permettent de délester en direction de l'Arve les collecteurs en cas de surcharge de ceux-ci. Cependant, un niveau exceptionnellement haut de cette rivière permet – pour l'instant et bien que ce sens des flux ne soit pas recherché – à cette dernière de rentrer en sens inverse dans le réseau d'assainissement de la Ville de Genève (voir Figure 29).

A ce sujet, voir la note technique complète « Crue de L'Arve – Novembre 2023 – Impacts sur le réseau d'assainissement » - Service de l'aménagement des Eaux et de la Pêche (SAEP) (cf. Annexe III).

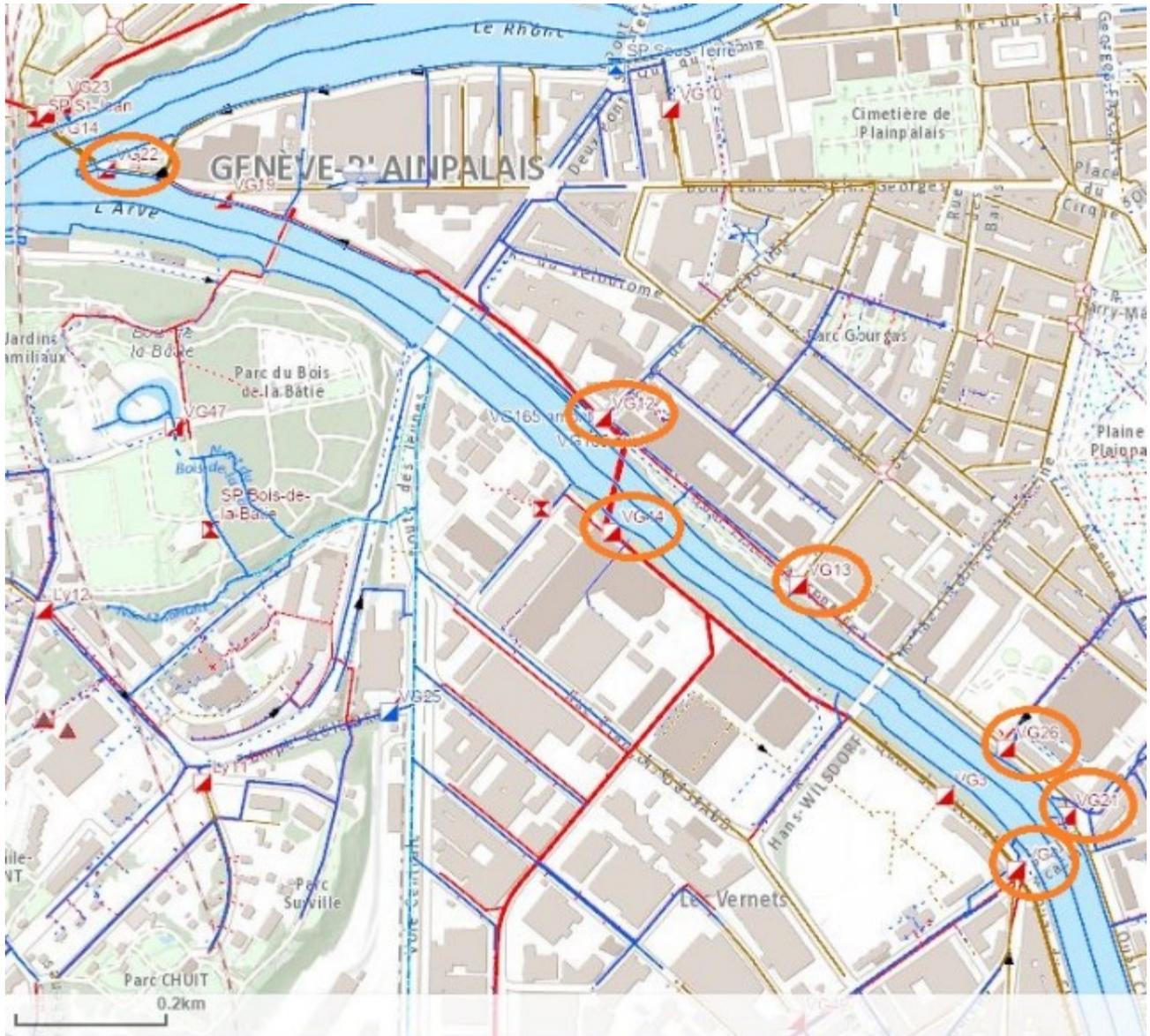


Figure 28 : Arve et ouvrages du réseau d'assainissement

Outre de surcharger les collecteurs en eaux non polluées et de provoquer des inondations de sous-sols par refoulement dans certaines évacuations privées d'habitations, l'apport par l'Arve de quantités très importantes de limons conduit à encrasser les filtres de la STAP de St-Jean et de la STEP d'Aire, amenant à l'arrêt ponctuel des installations précitées, avec comme conséquences potentielles une mise en charge additionnelle des collecteurs et des refoulements dans les sous-sols de bâtiments ainsi qu'à des déversements d'EU diluées dans le milieu naturel.

Les observations dans le réseau d'eaux usées pendant cet événement ont permis d'identifier certaines faiblesses du réseau et ainsi de confirmer des pistes très concrètes pour des mesures d'améliorations.



**Trop-plein Vg12 le 15 nov 2023 à 6h50**



**Trop-plein Vg13 le 15 nov 2023 à 7h05**



**Trop-plein Vg21 le 15 nov 2023 à 8h30**



**Trop-plein Vg26 le 15 nov 2023 à 7h30**



**Trop-plein Vg13 le 21 nov 2023 à 7h30**



**Trop-plein Vg22 le 15 nov. 2023 matinée**



**Trop-plein Vg4 le 15 2023 à 12h20**



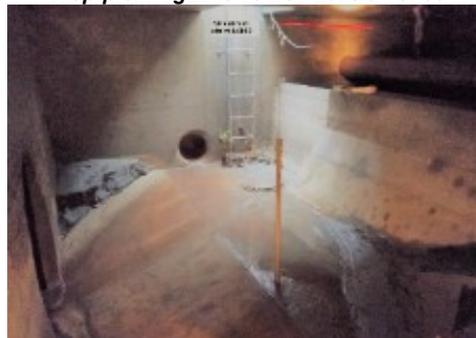
**Trop-plein Vg22 le 15 nov 2023 à 13h30**



**Trop-plein Vg44 le 15 à 13h00**



**Trop-plein Vg12 le 21 nov 2023**



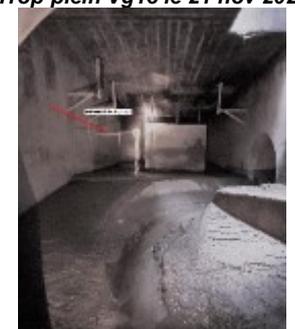
**Trop-plein Vg26 le 21 nov 2023**



**Trop-plein Vg13 le 21 nov 2023**



**Trop-plein Vg21 le 21 nov 2023**



**Trop-plein Vg26 le 21 nov 2023**

**Figure 29 : Engouffrements dans le réseau EU VdG**

## 5.4 Autres sites

### Exutoire de la Seymaz dans L'Arve

Le niveau de la Seymaz à proximité de l'exutoire dans l'Arve a engendré des inondations de parcelle. Il s'agit principalement de jardins et pelouses. Ceci n'est pas lié à une crue importante de la Seymaz mais à l'effet barrage offert par l'Arve et qui empêche à la Seymaz de s'y déverser.



Figure 30 : Zone d'expansion de la Seymaz en rive droite à proximité de l'exutoire dans l'Arve.



Figure 31 : Inondation de parcelle en rive droite de la Seymaz à l'amont de la route de Florissant.

### Station de pompage chez Maulini

La STAP a été inondée par refoulement depuis l'aval. Les eaux usées ont été déviées directement dans l'Arve. Les équipes des SIG étaient sur place pour la remise en fonction environ 2h après le pic de crue.

### Gravière de Sierne (Maulini)

Similairement à ce qui était arrivé en 2015, l'eau a atteint une profondeur de l'ordre de 1.00-1.20 m par-dessus le terrain du site Maulini.



Figure 32 : Vue amont gravière de Sierne en 2015 (source: Photo Duret SA) (a) et en 2023 (b) (source: OCEau)

### Menuiserie (Pont de Sierne)

Le niveau d'eau mesuré à l'échelle limnimétrique située en rive droite environ 50 m à l'amont du pont de Sierne a atteint le niveau 393.40 m.s.m, ce qui n'a pas été suffisant pour inonder le site. Une visite de terrain effectuée le 15.11 à 10 h a mis en évidence l'absence d'inondations.

### Restaurant (Pont de Sierne)

Contrairement à 2015 où le site avait été inondé, les mesures prises par l'OCEau en 2020 ont permis d'éviter toute inondation. Le mur vitré a en effet protégé le bâtiment, avec environ 40 cm supplémentaires restants pour protéger la parcelle.



Figure 33 : Terrasse du restaurant – Pont de Sierne en 2015 (a). Le même restaurant en 2023 a été épargné à l'inondation grâce aux murs de protection et murs vitrés (b).

### Pont CFF (Léman Express) sur l'Arve

Le Pont CFF entre la gare des Eaux-vives et la gare de Lancy-Bachet n'a pas eu de problème particulier. Quelques débordements sans conséquences sont observés aux abords de l'Arve.



Figure 34 : Nouveau Pont CFF entre la gare des Eaux Vives et la gare de Lancy-Bachet

#### STEP de Villette

La STEP de Villette, touchée en 2015 par la crue, a bénéficié depuis de mesures de protection, et n'a pas subi de dommages lors de cet évènement.

#### Barrage de Vessy

Quelques débordements ont été observés sur le site du barrage de Vessy, sans toutefois causer de dégâts significatifs. Les niveaux observés ont été relevés.



Figure 35 : Barrage de Vessy post-évènement

## 6 ANALYSE HYDRAULIQUE

### 6.1 En bref

- L'Arve a montré sa capacité à faire transiter la crue bi-centennale de novembre 2023 en plein centre-ville sans provoquer de débordements majeurs et sans faire de dégâts importants. Les hauteurs d'eau observées confirment les calculs hydrauliques effectués dans le cadre de l'établissement de la carte des dangers en 2013.
- La carte des dangers de l'Arve établie en 2013, conformément aux dispositions légales, met en évidence les zones à risques, dont certaines ont depuis été protégées.
- La crue de novembre 2023 correspond à un événement de temps de retour 200 ans d'après les débits retenus dans le cadre de la carte des dangers.
- La géométrie de l'Arve a été relevée suite à la crue importante de 2015. Des modélisations hydrauliques effectuées sur la base de cette nouvelle géométrie en 2017 montrent un effet minime sur les lignes d'eau et valide la carte des dangers.
- Les observations de terrain durant la crue de novembre 2023 sont en adéquation avec les prédictions de la carte des dangers (lignes d'eau, emprises des inondations).
- Relativement peu de bois flottants ont été observés pour une crue d'une telle ampleur. Le processus d'embâcle n'a pas été un phénomène aggravant, malgré la faible revanche observée à certains ponts.
- Une étude morphologique sera lancée début 2024 et sera complétée par une analyse hydraulique. L'objectif de ces études est de mettre en évidence les effets des crues successives de fin 2023 sur le lit du cours d'eau et par conséquent sur l'évaluation du danger par les cartes de dangers afin d'évaluer si une mise à jour est nécessaire.

### 6.2 Carte des dangers de 2013

Conformément aux dispositions légales en vigueur qui ont comme but "de protéger des personnes et des biens matériels importants contre les actions dommageables des eaux", le Service de l'écologie de l'eau (SECOE) de l'Office cantonal de l'eau (OCEau) du Département du territoire, a élaboré les cartes de dangers inondation liés aux crues de l'Arve en 2013.

Ces cartes permettent de délimiter les différents périmètres du territoire soumis aux inondations et définir le type de danger. L'estimation du danger est faite en fonction de l'intensité de la crue (hauteur d'eau et vitesse d'écoulement) et de sa probabilité (fréquence, appelé également période de retour et abrégé "TR").

Les cartes de dangers de l'Arve avaient permis de détecter les zones à risques suivantes et localisées sur la Figure 36 :

1. Villette : le tronçon de la Seymaz jusqu'au Pont de Villette (courbe de remous de l'Arve pouvant impacter notamment la STEP) ainsi que la gravière située en rive gauche de l'Arve ;
2. Barrage de Vessy ;
3. Boucle de Vessy : l'érosion des berges est la contrainte principale de cette zone ;
4. Centre sportif du Bout-du-Monde : les terrains de foot sont en danger d'inondation moyen et les terrains de tennis en danger faible ;
5. Fontenette : le centre de loisirs à l'aval du Pont du Val d'Arve en rive gauche est en danger moyen. Des inondations centennales peuvent aussi toucher le stade de foot à la Fontenette ;
6. La Promenade des Orpailleurs : au niveau du puit de Carouge, en rive gauche directement à l'aval du Pont de la Fontenette ;
7. Quai Ernest-Ansermet : la rive droite entre le Pont des Acacias et le Pont Hans-Wilsdorf est localement en zone de danger faible (Uni Mail et RTS) ;
8. Le chemin de la Gravière à Genève au niveau du point bas
9. Le pont Saint-Georges : le tunnel pour piétons en rive droite est régulièrement inondé par de hautes eaux.
10. La passerelle du Bois de la Bâtie : la revanche pour la crue centennale est de l'ordre de 50 cm. Le risque d'embâcle existe.
11. La pointe de la Jonction

Des mesures de protections ont depuis permis de sécuriser certains secteurs, en particulier la rive gauche en aval du Pont du Val d'Arve (secteur Fontenette) et la rive gauche en aval du Pont de Sierne (secteur Villette).

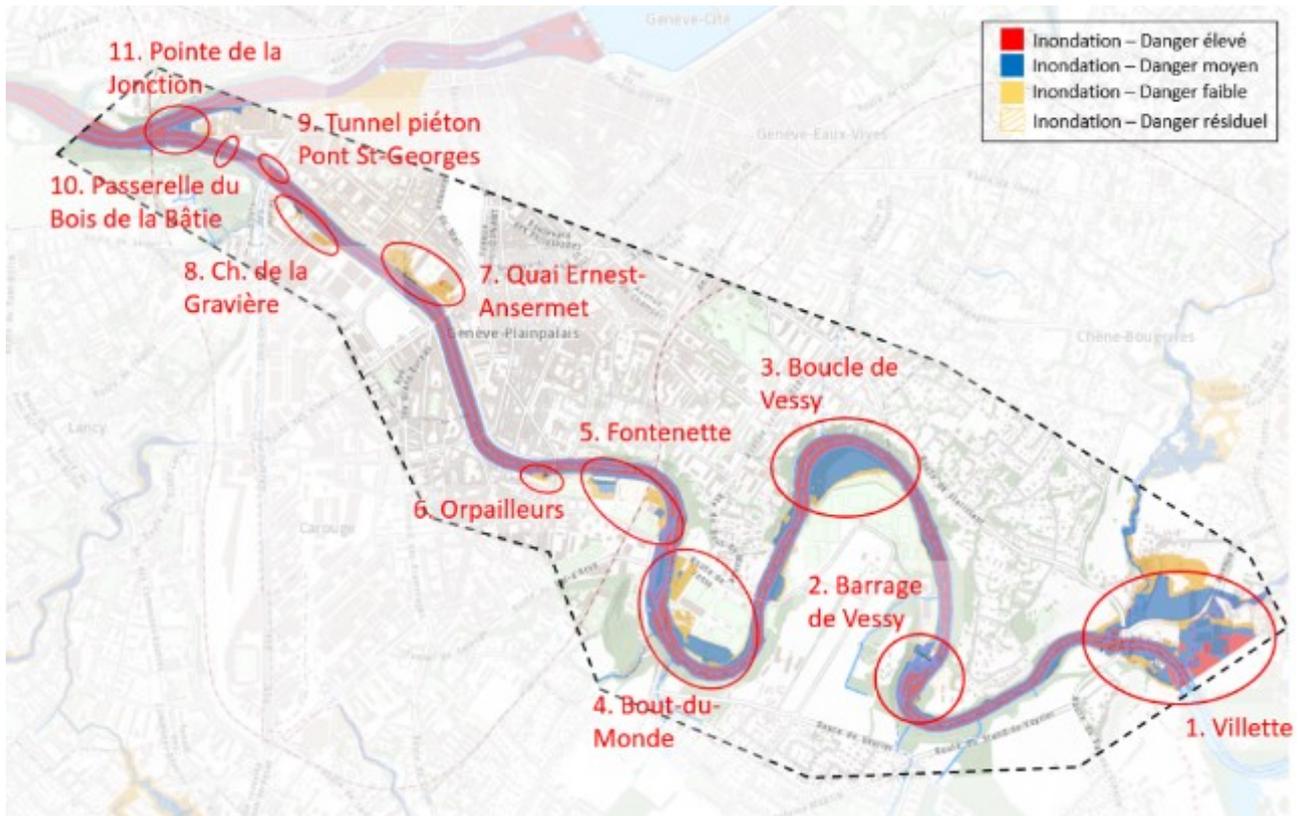


Figure 36 : Carte des dangers de l'Arve et principales zones à risques

Les modélisations hydrauliques servant à l'élaboration de la carte des dangers ont considérés les débits de crue suivants pour l'Arve :

Tableau 3 : Débit retenus dans le cadre de la carte des dangers de 2013

Temps de retour [an]	Débit (Intervalle de confiance à 80%) [m <sup>3</sup> /s]	Débit retenu carte des dangers 2013 [m <sup>3</sup> /s]
30	734 - 818	820
100	840 - 952	950
300	935 - 1070	1070

Selon l'hydrologie retenue pour l'établissement de la carte des dangers présentée au Tableau 3, le débit de 1010 m<sup>3</sup>/s de la crue de novembre 2023 est compris entre un temps de retour de 100 ans (950 m<sup>3</sup>/s) et 300 ans (1070 m<sup>3</sup>/s). Cette crue correspond ainsi bien à un événement de temps de retour 200 ans tel qu'analysé au chapitre 3.3 ci-dessus.

Les inondations observées durant l'événement de novembre 2023 devraient ainsi correspondre aux phénomènes décrits par la carte des dangers pour un événement de fréquence moyenne (TR 100 ans) à faible (TR 300 ans).

### 6.3 Validité de la carte des dangers : relevés géométriques et mise à jour du modèle hydraulique post-crue de 2015

Suite à l'importante crue de mai 2015 (débit de 923 m<sup>3</sup>/s mesuré à Genève), un bilan hydraulique et morphologique de l'Arve avait été réalisé<sup>3</sup>. Les principales conclusions sont les suivantes :

- **Mise à jour importante de la géométrie du cours d'eau**, grâce à de nombreux relevés de profils, en associant différentes techniques (bathymétries mono- et multi- faisceaux, profils de géomètres, relevés par drones).
- **Bilan du charriage (graviers) :**
  - La période 2004-2010 avait montré une tendance aux dépôts de graviers sur le secteur suisse de l'Arve (env. +10'000 m<sup>3</sup>/an).
  - La période 2010-2016 montre une tendance inverse, soit une érosion d'environ 70'000 m<sup>3</sup>. Cet effet est très largement dû à un effet de « chasse » lié à la crue de 2015.
  - Cette étude n'a ainsi pas mis en évidence d'éventuels dépôts de graviers susceptibles d'aggraver la situation de danger suite à la crue de 2015, à l'exception d'un secteur au Bout-du-Monde.
- **Hydraulique:**
  - Sur la majorité du tracé de l'Arve, les lignes d'eau en crue calculées en 2017 sur la base de la géométrie de l'Arve mise à jour sont comparables avec les anciennes (voir la Figure 37 ci-dessous). D'une manière générale, elles sont inférieures de quelques centimètres, à l'exception du secteur du Bout-du-Monde, où l'on observe un léger rehaussement des lignes d'eau.

---

<sup>3</sup> « Arve-Rhône Urbain - Etape 3 - Bilan hydraulique et morphologique suite à la crue de 2015 », décembre 2017, AquaVision

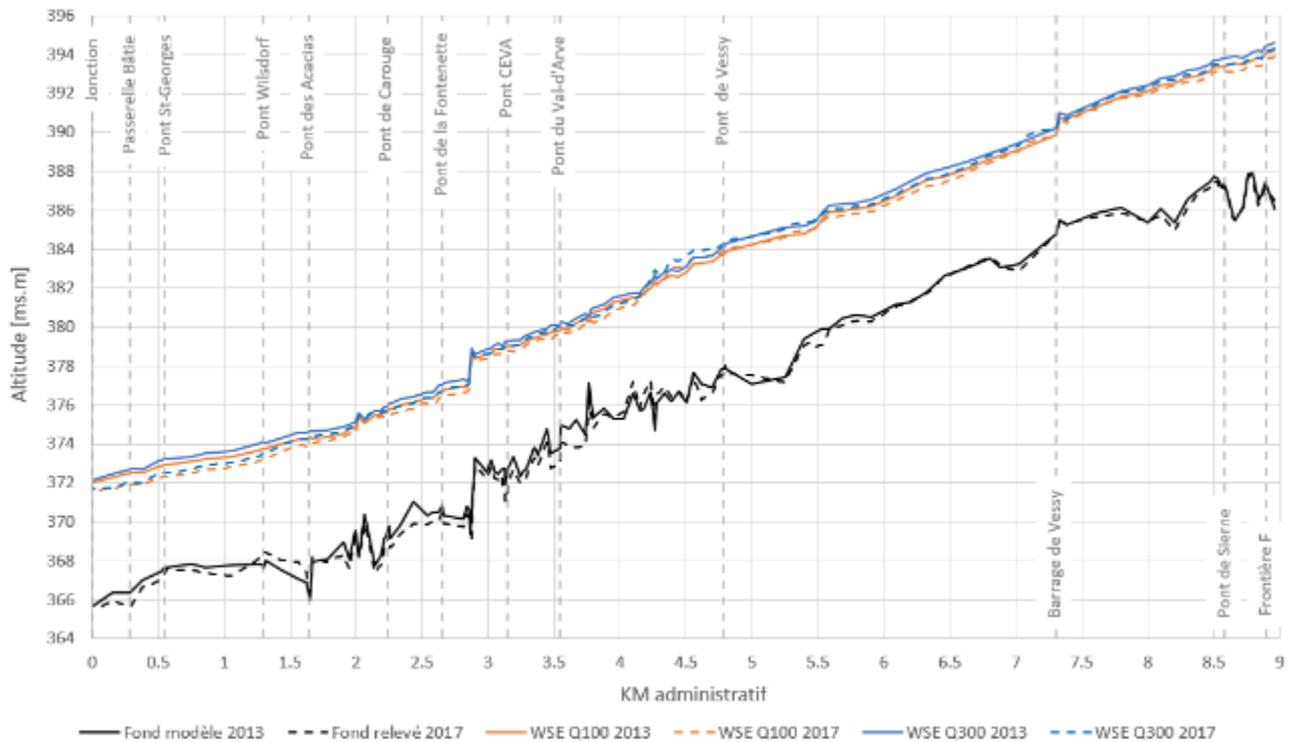


Figure 37 : Comparaison des lignes d'eau de temps de retour 100 ans et 300 ans calculées après relevé post-cru de 2015 (traitillé) avec les lignes d'eau de la carte des dangers de 2013

La carte des dangers de 2013 n'a ainsi pas été modifiée suite à la crue de 2015, car les changements sont négligeables, ou allant dans le sens de la sécurité. La validité de la carte des dangers a ainsi été assurée, ces conclusions pouvant toutefois être légèrement pessimistes.

## 6.4 Comparaison entre les phénomènes observés en novembre 2023 et les prédictions de la carte des dangers

La carte des dangers inondation de l'Arve peut être confrontée aux observations de terrain effectuées par l'équipe CelSuCr de l'OCEau en charge de la surveillance des crues. L'emprise des inondations pour les zones à risques de la carte des dangers mises en évidence à la Figure 36 en fonction de la période de retour, peut être visualisée via la carte des inondations (Figure 38). En cas de prédictions parfaites, l'événement historique de novembre 2023 devrait ainsi mettre en évidence des inondations correspondant aux emprises vert clair (TR 300 ans) à vert foncé (TR 100 ans) de la carte des inondations.

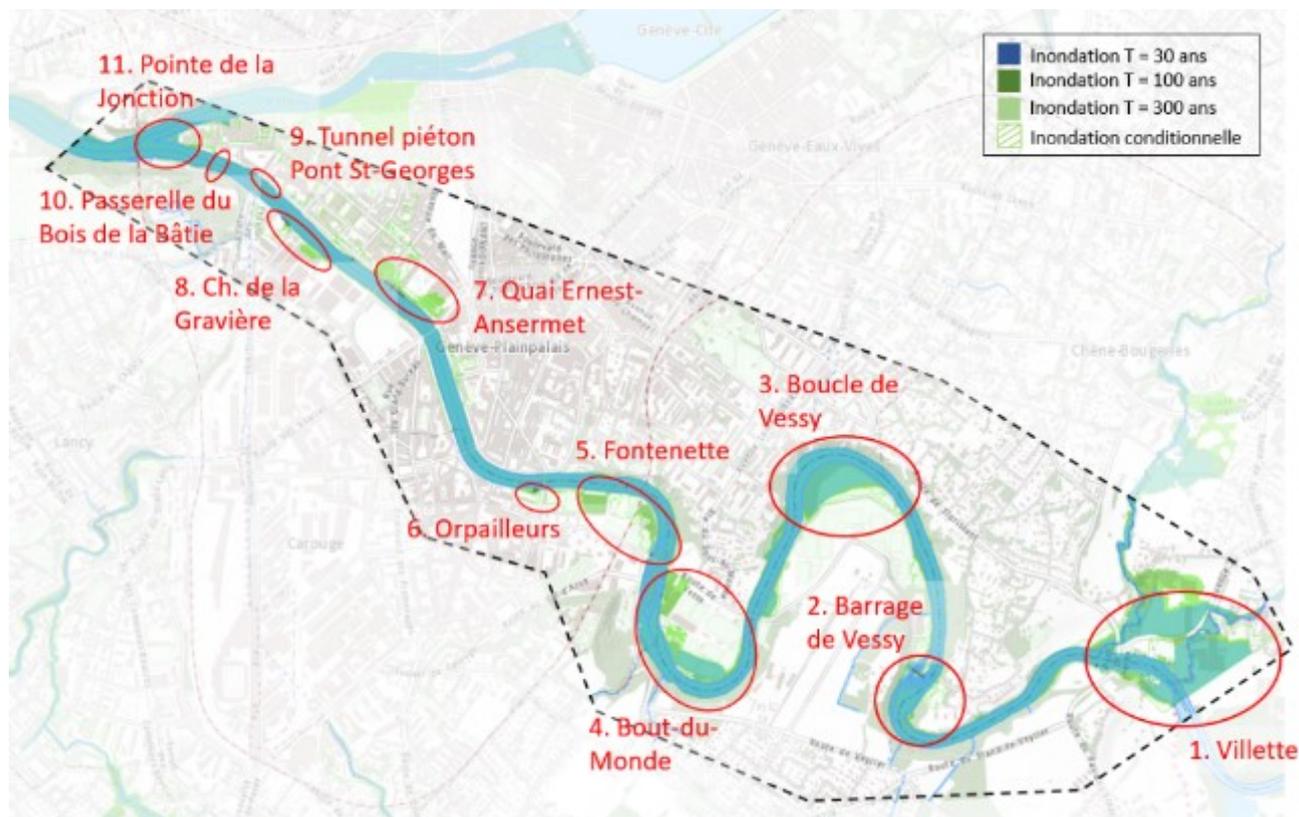


Figure 38 : Carte des inondations de l'Arve et principales zones à risques

Le Tableau 4 compare les observations réalisées durant la crue aux prédictions de la carte des dangers via la carte des inondations.

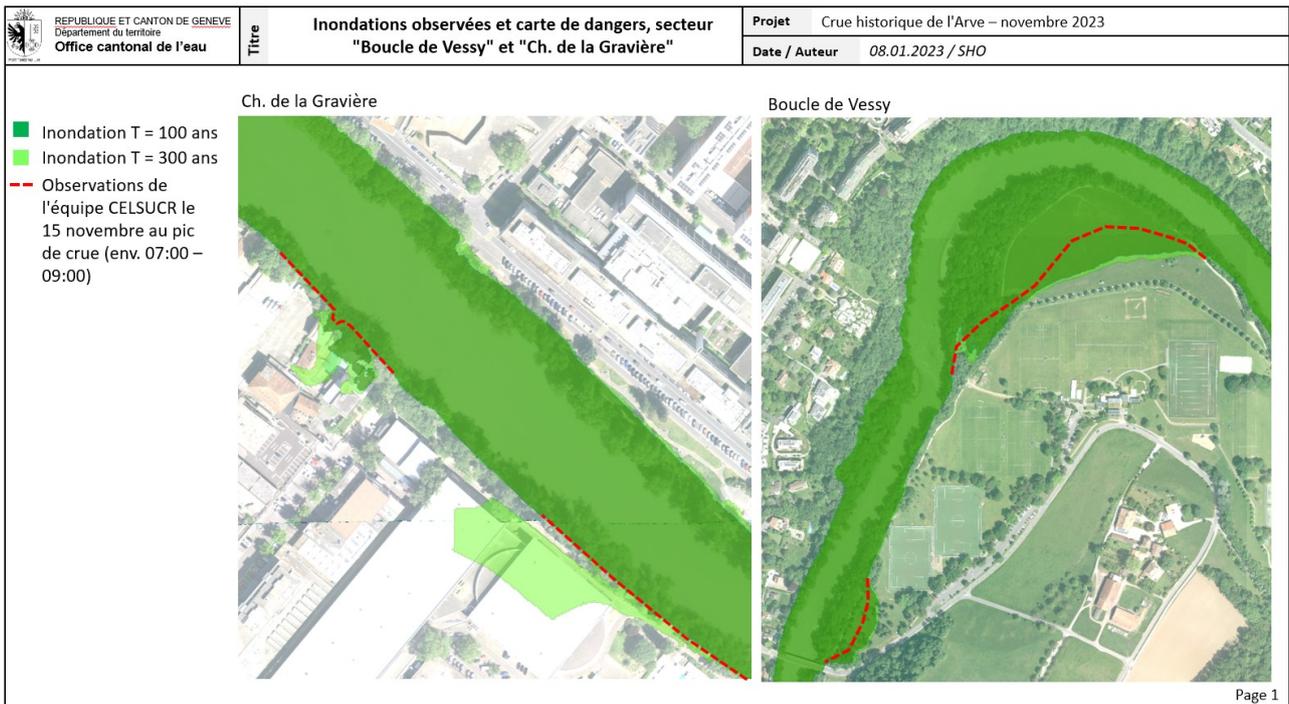
Tableau 4 : Comparaison entre les prévisions de la carte des inondations et les observations

Zone à risque selon la carte des dangers	Inondation prévue par la carte des inondations	Observations CelSuCr lors de l'épisode de crue de novembre 2023 (TR 200 ans)	Illustration
1. Villette	En rive droite, débordements le long de la Seymaz via la Courbe de remous de l'Arve et inondation de la gravière en rive gauche	Emprise de l'inondation <b>conforme aux prédictions</b> de la carte des inondations	
2. Barrage de Vessy	Débordement sur l'îlot central et en rive gauche dès TR 30 – TR 100 ans, emprise ~ similaire pour TR 300 ans	Emprise de l'inondation <b>conforme aux prédictions</b> de la carte des inondations	
3. Boucle de Vessy	Débordement en rive gauche dès TR 30 ans, emprise ~ similaire pour TR 100 ans et TR 300 ans	Emprise de l'inondation inférieure aux prédictions de la carte des inondations  → <b>La carte des dangers surestime légèrement les lignes d'eau</b>	
4. Centre sportif du Bout-du-Monde	Terrains de foot en danger moyen (TR 30 ans), terrains de tennis en danger faible (TR 100 ans)	Aucune observation	-
5. Fontenette	Inondation du centre sportif dès TR 100 ans	<b>Aucun débordement</b>  → Les mesures de protection mises en place permettent de protéger le site pour TR 200 ans au moins	-
6. Orpailleur	Inondation du puit de Carouge dès TR 100 ans	La capacité est atteinte, mais sans débordement  → <b>La carte des dangers surestime légèrement les lignes d'eau</b>	
7. Quai Ernest-Ansermet	Débordement sur le quai dès TR 100 ans, propagation pour TR 300 ans	La capacité est atteinte au point bas (KM 1.360), mais sans débordement.  → <b>La carte des dangers surestime légèrement les lignes d'eau</b>	

Zone à risque selon la carte des dangers	Inondation prévue par la carte des inondations	Observations CeISuCr lors de l'épisode de crue de novembre 2023 (TR 200 ans)	Illustration
8. Ch. de la Gravière	Débordement sur le chemin dès TR 100 ans, propagation pour TR 300 ans	Emprise de l'inondation légèrement aux prédictions de la carte des inondations  → <b>La carte des dangers surestime légèrement les lignes d'eau</b>	
9. Tunnel piéton du Pont St-Georges	Inondation du tunnel piéton rive droite	<b>Observations conformes aux prédictions</b> de la carte des dangers	
10. Passerelle de la Bâtie	Revanche au pont < 0.5 m pour TR 100 ans	Revanche observée d'au moins 0.5 m.  → <b>la carte des dangers surestime légèrement les lignes d'eau</b>	
11. Pointe de la Jonction	Pointe inondée dès TR 30 ans, hauteur d'eau au niveau du canoë club de ~ 0.8 m pour TR 100 ans, ~ 1 m pour TR 300 ans	Emprise de l'inondation conforme à la carte des inondations, hauteur d'eau ~ 0.5 m.  → <b>la carte des dangers surestime légèrement les lignes d'eau</b>	

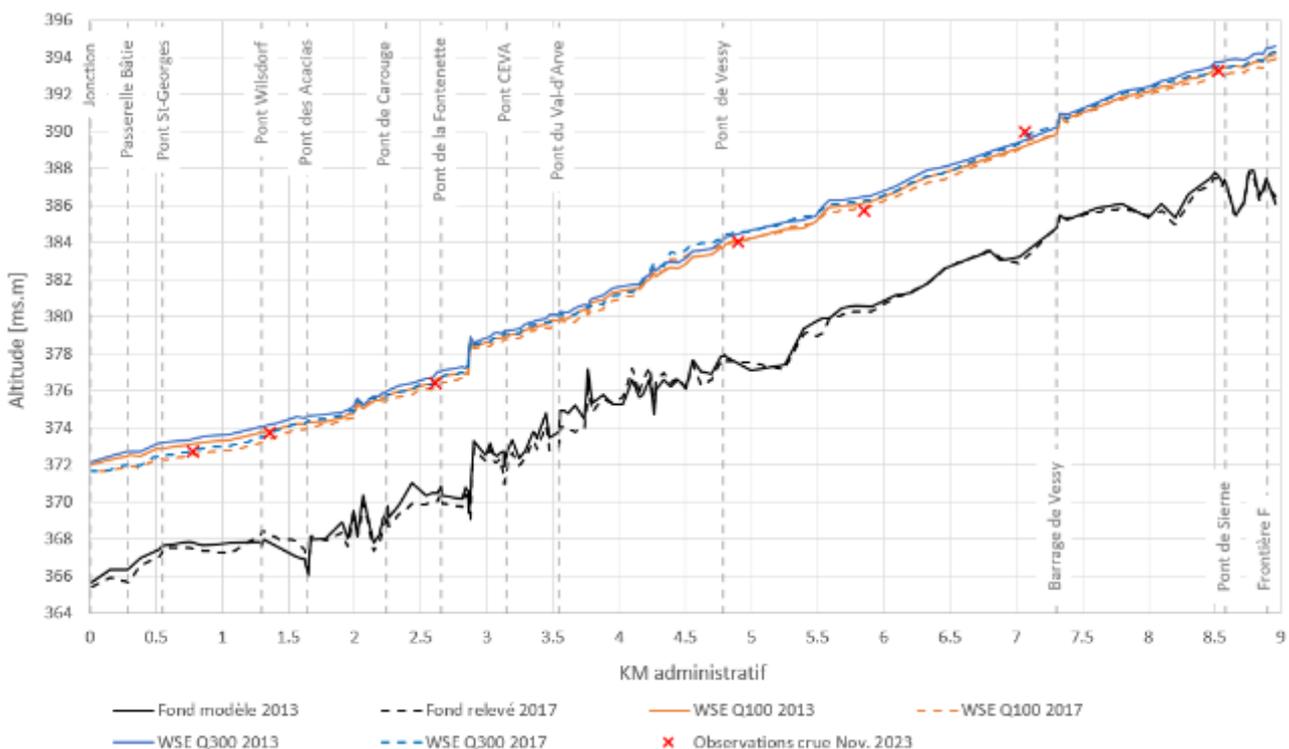
D'après le Tableau 4, la carte des dangers décrit plutôt bien l'extension des inondations observées mais tend néanmoins à légèrement surestimer les lignes d'eau. Les secteurs 3. "Boucle de Vessy" et 8. "Chemin de la Gravière" présentent des différences en terme d'emprise de l'inondation comme illustré en Figure 39.

Il convient de préciser que cette légère surestimation n'est pas un problème. Elle permet de prendre en compte une marge de sécurité, au vu des incertitudes présentes dans le processus de détermination des zones inondables. En effet, la dynamique alluviale de l'Arve (graviers + MES) est importante, et le lit de l'Arve peut changer de manière non négligeable entre 2 crues, et modifier ainsi les écoulements.



**Figure 39 : Différences d'extension de l'inondation pour les secteurs Ch. de la Gravière et Boucle de Vessy**

Les lignes d'eau observées correspondent dans l'ensemble plutôt bien aux lignes d'eau modélisées en 2017 après mise à jour de la géométrie de l'Arve suite à la crue majeure de 2015 (Figure 40).



**Figure 40 : Lignes d'eau Q100 et Q300 calculées après relevé post-crue de 2015 (traitillé), lignes d'eau de la carte des dangers de 2013 et observations lors du pic de crue de novembre 2023**

L'adéquation des lignes d'eau observées par l'équipe CelSuCr durant la crue historique de novembre 2023 avec les lignes d'eau simulées en 2017 après mise à jour de la géométrie de

l'Arve tend à démontrer la stabilité du profil en long et l'absence d'alluvionnement ou d'érosion majeures sur la période 2017 – 2023.

Un relevé de la géométrie du cours d'eau viendra compléter l'analyse hydraulique et permettra de visualiser la dynamique du lit de l'Arve suites aux épisodes de crues successifs de novembre et décembre 2023.

## **6.5 Inspection post-crues 2023 des rives et des ouvrages**

Suite à la crue de l'Arve de mai 2015, une inspection des rives et des ouvrages avait été effectuée. Avec le même objectif, une inspection des rives est prévue début 2024 et viendra compléter le bilan de la crue historique de novembre 2023, prenant en compte également les effets de l'importante crue de décembre 2023 (débit maximum mesuré à Genève de 793 m<sup>3</sup>/s). Le but de cette inspection sera en particulier :

- D'inspecter l'état des rives, des ouvrages de protection le long de l'Arve et les ouvrages de franchissement (piles et culées notamment) ;
- De mettre en évidence les zones de dépôts et d'érosion.

## **6.6 Embâcles**

Un cours d'eau n'est pas uniquement une masse d'eau en mouvement, c'est un écosystème complexe qui inclut notamment le lit (mineur et majeur) et les zones riveraines généralement boisées. Les arbres qui constituent la ripisylve (boisement des rives) grandissent, vieillissent ou sont sujets à des maladies. Soumis aux coups de vent ou à l'instabilité de la berge où ils sont implantés, ils peuvent tomber, se casser et être emportés par le cours d'eau.

C'est particulièrement le cas lors des crues où les arbres tombés sont emportés et flottent jusqu'à rencontrer une section trop étroite ou un obstacle (pont, etc...). On parle alors d'embâcles.

Au niveau cantonal, l'entretien des cours d'eau est une tâche permanente effectuée par l'OCAN (Office Cantonal de l'Agriculture et de la Nature). Ses actions permettent notamment de préserver l'intégralité des ouvrages de protection et de maintenir la capacité d'écoulement des cours d'eau.

Une quantité de flottants relativement faible a été constatée lors la crue de novembre 2023, inférieure à celle observée lors de la crue importante de 2015.

- Pendant la crue de novembre 2023 :
  - Aucune intervention n'a dû être réalisée durant la crue ou à la décrue ;
  - Les observations ont permis d'assurer que ni les biens ni les personnes étaient en danger, les ponts présentant une faible revanche ayant été fermés à la circulation ;
  - Un début d'embâcle a été observé au pont du Val-d'Arve (Figure 41) ;

- Des troncs et branchages accrochés aux piles de la passerelle de la Bâtie ont été relevés lors de la décrue.



Figure 41 : Début d'embâcle observée au pont du Val-d'Arve



Figure 42 : Tronc d'environ 8 m de longueur observé depuis le pont Saint-Georges

- Après les crues de novembre et décembre 2023 :

Suite aux crues majeures successives de novembre et décembre 2023, la Ville de Genève a mandaté une entreprise pour venir dégager les bois restés bloqués au pont du Val-d'Arve et à la passerelle de la Bâtie. Cette opération doit débuter tout début 2024 afin de profiter des faibles débits hivernaux de l'Arve.

## 6.7 Gestion sédimentaire

Le transport solide est un phénomène important de L'Arve, puisque cette rivière charrie des quantités très importantes de matériaux de toute taille. Pendant une crue, le phénomène est

amplifié. Il convient toutefois de considérer deux types de phénomènes, en fonction de la granulométrie des matériaux :

### 1. **Matières en suspension (MES)**

Suite à la crue de 2015, les études engagées par SIG avaient montré que l'événement avait amené énormément de matériaux fins, qui s'étaient au final déposés dans la retenue de Verbois. Les bathymétries effectuées ont permis d'estimer que les volumes déposés par la crue de 2015 étaient comparables au volume annuel moyen déposé par l'Arve.

- ➔ Suite à la crue de novembre 2023 et à celle de décembre 2023, des bathymétries seront effectuées début 2024 afin de quantifier les volumes de MES qui ont été déposés par ces événements. Cette évaluation est particulièrement pertinente, au vu des opérations d'abaissement partiels prévus en 2025.
- ➔ Sur la base des données mesurées à la station turbidimétrique du Bout-du-Monde (SIG/OSR), il est possible d'obtenir une estimation des flux sédimentaires qui ont transité dans l'Arve au cours de l'événement (voir Figure 43ci-dessous). Ces éléments seront intégrés à l'analyse mentionnée ci-dessus.



Figure 43 : Concentration en MES pendant la crue du 15.11.2023 (Source : OSR à la station du Bout-du-Monde)

### 2. **Graviers**

Une étude sédimentaire détaillée va être effectuée début 2024, afin de mettre en évidence les volumes de matériaux grossiers qui ont été charriés durant l'événement, et pour quantifier l'effet induit sur la géométrie du lit de l'Arve (comparaison avec profils 2013 et 2017).

Suite à la crue de mai 2015, un bilan morphologique de l'Arve avait été effectué, finalisé en 2017, qui visait notamment à :

- Déterminer l'effet de la crue de 2015 sur le lit de la rivière,

- Vérifier l'hydraulique du système
- Identifier les points faibles du système
- Adapter les cartes de dangers au besoin.

La même analyse sera développée prochainement. La première étape primordiale sera d'effectuer un relevé morphologique du lit de l'Arve, en profitant de la période d'étiage de l'hiver 2024. En effet, il s'agit de faire les relevés des fonds du lit et des berges lors des basses eaux, et en profitant de l'absence de feuilles sur les arbres qui longent le cours d'eau.

Les techniques pour effectuer ces relevés sont multiples et en cours d'évaluation : bathymétries, relevés par géomètres, vol de drones, moyens hélicoptés, etc.

Le relevé post-crue de 2023 sera comparé avec la géométrie prise en compte lors de l'établissement des cartes de dangers de 2013, ainsi qu'avec celle relevée en 2017.

## 7 LES ENSEIGNEMENTS DE L'ÉVÉNEMENT

### 7.1 En bref

- La crue exceptionnelle de l'Arve de novembre 2023 a montré que le canton de Genève était bien préparé pour faire face à ce type d'événement, et que le niveau de protection du centre-ville était adéquat.
- L'analyse de l'événement de 2023, ainsi que celui de 2015, permet d'identifier les points positifs et les pistes d'amélioration qui subsistent.
- Ces pistes d'améliorations sont de trois types :
  - Les mesures pour augmenter le **niveau de sécurisation des sites sensibles** : travaux de protection de bâtiments, quais, infrastructures, etc.
  - Les mesures pour améliorer le **système de prévision des crues**: élaboration et optimisation de modèles hydrométéorologiques de prévisions.
  - Les mesures pour améliorer la **gestion de crise**, pendant un tel événement : plan d'alerte, sites sensibles, seuils, responsabilités, etc.
- Une organisation de projet est en place depuis 2015 entre l'OCEau, la Ville de Genève et les SIG. De nombreuses mesures ont déjà été prises, sur la base d'une feuille de route qui est régulièrement mise à jour par un comité de pilotage.
- Cette feuille de route sera réactualisée avec les conclusions des études qui ont été engagées suite à la crue de novembre 2023, et les actions d'améliorations qui subsistent seront mises en place, afin de garantir un niveau de protection encore plus robuste.

### 7.2 Les mesures pour améliorer la protection des sites sensibles

Les sites sensibles aux inondations, sur les tronçons du Rhône urbain et de L'Arve sont mis en évidence sur les cartes de dangers (voir chapitre 6.2). Ils ont été confirmés par les observations lors de l'événement de 2015 et les investigations hydrauliques réalisées en 2017.

Suite à l'événement de 2015, une **feuille de route** a été établie pour la réalisation et le suivi des projets de mesures de protection au niveau des sites sensibles (cf. Figure 44) dont la dernière mise à jour est présentée en Figure 45. Celle-ci est suivie par le **comité de pilotage** intégrant l'OCEau, la ville de Genève et les SIG.

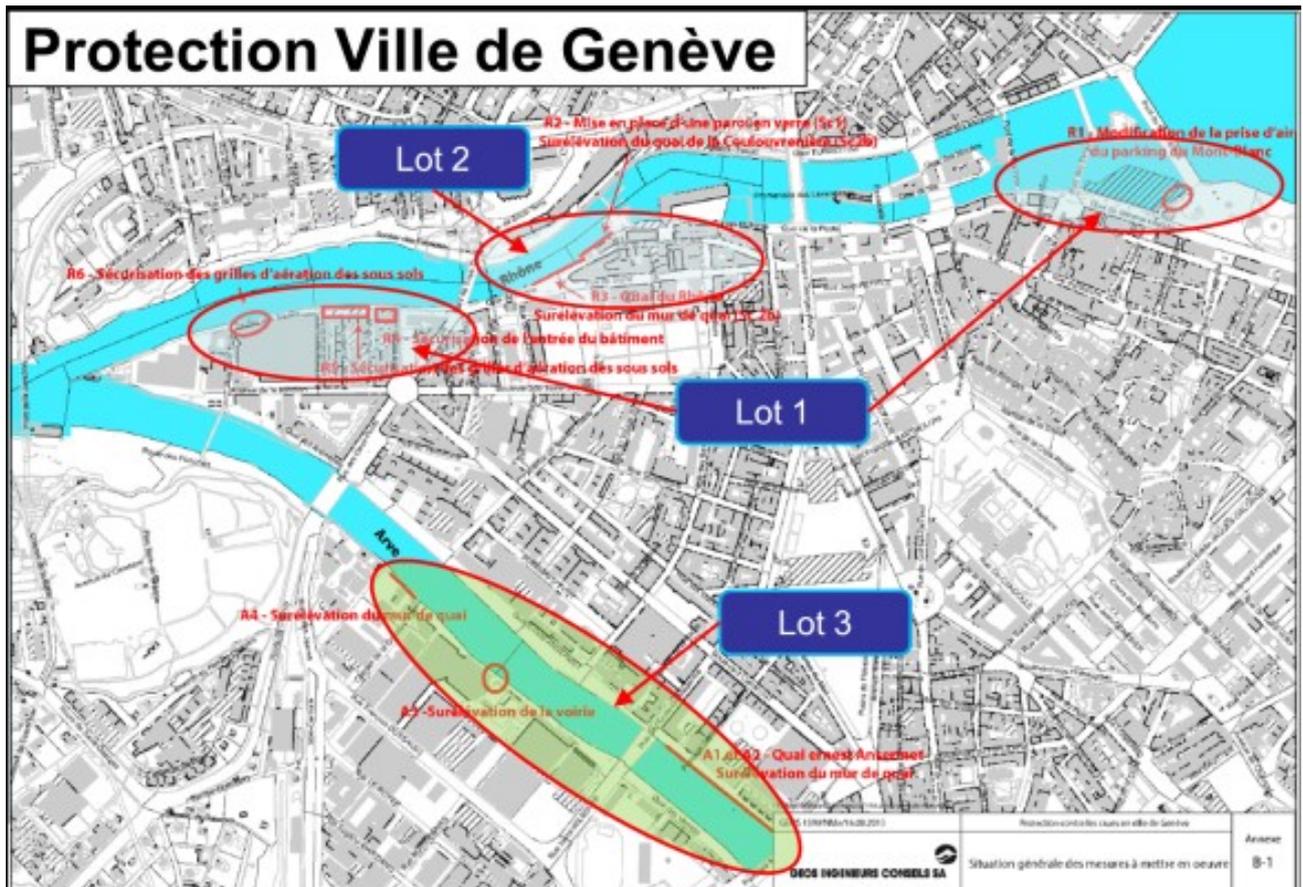


Figure 44: Situation générale des mesures de sécurisation à mettre en oeuvre

→ **Certaines mesures ont déjà été réalisées** et ont permis de sécuriser le territoire contre les risques d'inondation par débordement :

- Quai de la Coulouvrenière et Quai du Rhône : aménagement d'une digue de protection
- Sentier des Saules : clapets sur grilles d'aération + entrée de bâtiment (batardeaux mobiles)
- Quai Ansermet (amont Wilsdorf) : mise en place de protections mobiles contre les débordements

Ces mesures sont efficaces, mais nécessitent un suivi constant, afin de garantir leur pérennité. Des exercices réguliers doivent être mis en place.

→ **Certaines mesures de la ville de Genève au niveau du Lot 3 sont planifiées et doivent encore être réalisées :**

- Le projet « Quai Ansermet / RTS » est en cours de développement et devrait aboutir en 2025.
- Le lot 3b (Chemin de la Gravière, surélévation du quai) a été intégré aux réflexions dans le cadre du MEP « Pointe Nord » et de la Voie-Verte d'agglomération.

→ Certaines mesures ont été déclarées non nécessaires à mettre en œuvre, suite à des études plus détaillées et une précision des niveaux d'eau.

- Modification de la prise d'air au niveau du parking du Mont-Blanc (Lot 1 – R1); (niveau de protection suffisant)
- Surélévation de la voirie au niveau de la Queue d'Arve (Lot 3- A3).

Projets "Ville de Genève"		Pilote	Partenaire	2016				2017				2018				2019				2020				2021				2022				2023				2024				2025			
				1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
LOT 1 Rhône	R1 - Parking Mt-Blanc	OCEau	VdG / SIG																																								
	R4 - Entrée bâtiment																																										
	R5 - Grilles aération																																										
	R6 - Grilles aération																																										
LOT 2 Rhône	R2 - Quai Coulouvreinière	OCEau	VdG / SIG																																								
	R3 - Quai du Rhône																																										
LOT 3a Arve	A1 - Quai Ansemet 1	VdG	OCEau / SIG																																								
	A2 - Quai Ansemet 2 - RTS																																										
LOT 3b Arve	A3 - Queue d'Arve	VdG	OCEau / SIG																																								
	A4 - Chemin Gravière																																										
Projets connexes		Pilote	Partenaire	2016				2017				2018				2019				2020				2021				2022				2023				2024				2025			
Rhône	Pont des Bergues - ouvrage	VdG	SIG/OCEau																																								
Rhône	Pont des Bergues - affouillements	SIG/OCEau	VdG																																								
Arve	Ouvrages (Bâtie, Carouge, Acacias, Fontenette)	VdG																																									
Arve	Pont Sierne - Restaurant	OCEau	-																																								

Le graphique ci-après présente, pour l'évènement du 15 novembre 2023, les incertitudes en fonction de l'horizon de la prévision (déclenchement de l'alerte au pic de l'évènement). En effet, plus l'évènement se rapproche plus l'incertitude se réduit (cf. Détails en Annexe IV).

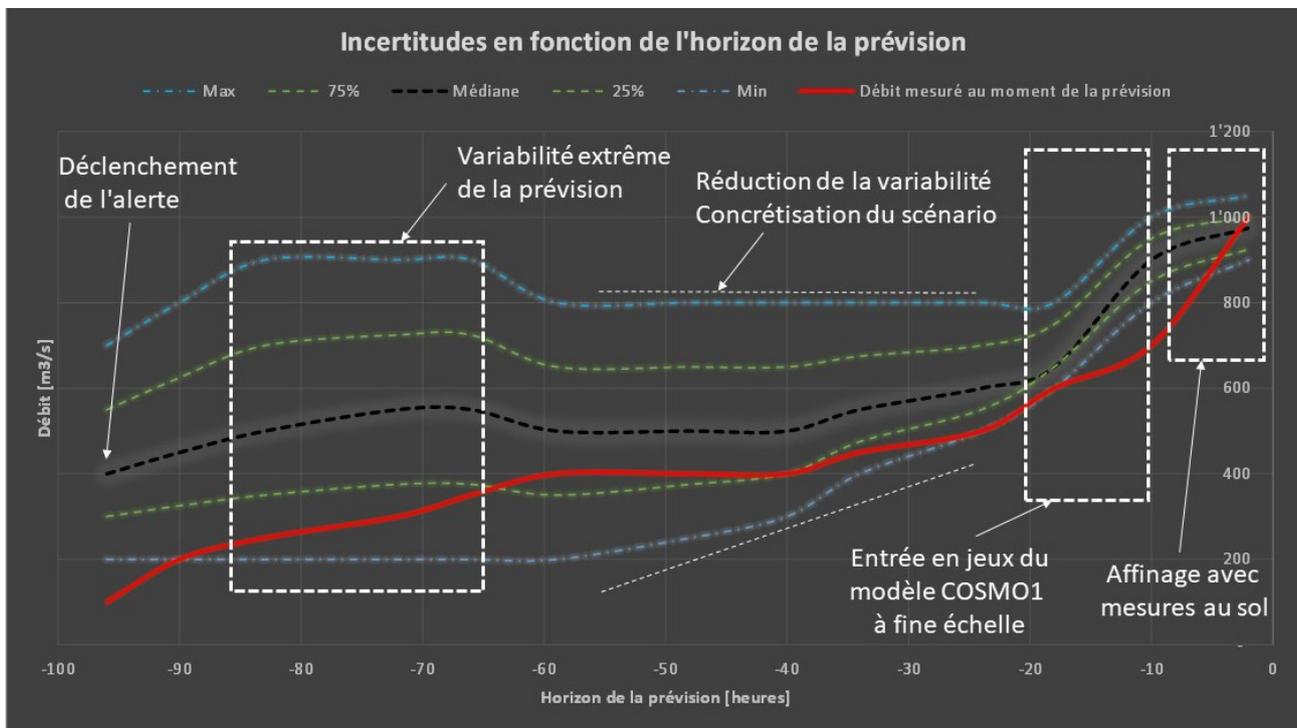


Figure 46: Incertitudes dans les prévisions

La possibilité d'anticiper un évènement avec suffisamment d'avance dépend aussi de la capacité du système de monitoring en temps réel à transmettre les informations rapidement et de les centraliser pour que les modèles puissent intégrer l'information et les cellules de crise puissent prendre des décisions en connaissance de cause.

Les détails des améliorations apportées au modèle suite à la crue de 2015 ainsi que les perspectives pour la suite sont détaillées en Annexe IV.

## 7.4 Les mesures pour améliorer la gestion de crise

### → Systèmes d'alerte et seuils d'alerte

L'existence de plusieurs modèles de prévision (OFEV, Genève, SIG, France, etc.) est une réelle avancée pour le déclenchement de l'alerte et la gestion de crise.

Toutefois, une clarification et une uniformisation des seuils d'alerte entre les différents acteurs pourrait être envisagée, par soucis de cohérence. Ce point sera traité dans les prochaines semaines (voir § suivant).

Par exemple : un écart entre les seuils de la confédération et les seuils d'action du canton de Genève pour l'Arve.

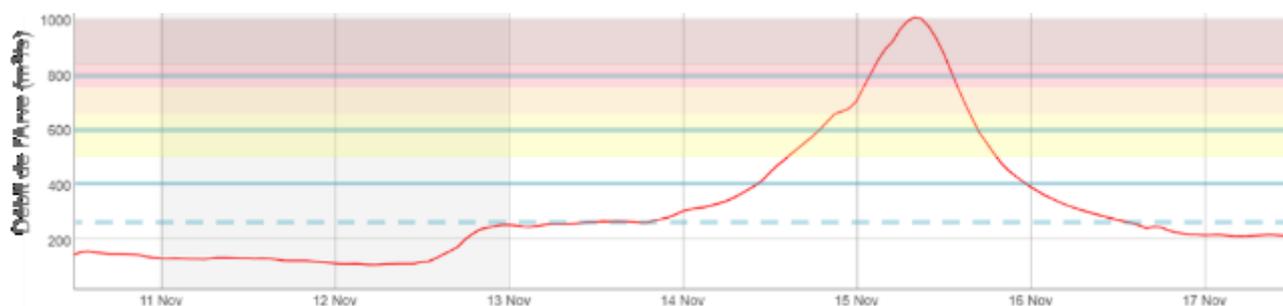


Figure 47: Niveau de crue : 5 niveaux de dangers (en couleur - OFEV ) et 4 seuils d'actions (traits bleu - OCEau)

### → Coordination des différents partenaires

La Cellule de Surveillance des crues (CeSuCr) de l'Office cantonal de l'eau a rempli son rôle, et une bonne coordination a pris place pour la gestion de la crue. La gestion de la crue de novembre 2023 a été très efficace grâce à la réactivité des partenaires pour les interventions nécessaires.

Les différents acteurs ont entamé un processus de débriefing, afin d'améliorer la gestion de crise, à la lumière des enseignements récoltés. Le SIS est la structure centrale de coordination pour améliorer cette procédure. Un document « plan d'urgence » devrait être formalisé par le SIS dans les prochains mois.

### → Coordination transfrontalière

Dans le canton de Genève, l'OCEau est la structure en charge de suivre l'évolution de la situation hydrométéorologique, et d'assister les forces d'intervention pendant l'événement. Du côté français, le SM3A est notre partenaire pour la gestion globale de l'Arve et le portage de travaux d'aménagement des eaux, sur tout le bassin versant.

Une optimisation des échanges en période de crue et après événement entre l'OCEau et le SM3A et la préfecture de Haute Savoie est à prévoir. Seul un échange post-événement pour l'établissement de ce bilan a été réalisé. Afin d'améliorer la visibilité également sur l'amont du bassin versant une bonne coordination est nécessaire. Une rencontre est prévue début 2024 pour

un échange à la suite des événements de crues de 2023, avec la présence de la DREAL et de la DDT.

## 8 CONTEXTE ET PERSPECTIVE

### 8.1 En Bref

- ➔ L'année 2023 a enchaîné les extrêmes : une période de sécheresse record puis une période de précipitations record saturant le bassin versant et créant les conditions propices pour l'évènement survenu le 15 novembre 2023.
- ➔ L'année 2023 bat également des records en terme de température. La remontée de l'isotherme, cumulée au contexte spécifique de l'Arve a contribué à intensifier l'évènement de crue. Le lien avec le changement climatique et son effet sur les prévisions reste difficile à établir, bien qu'un changement radical des conditions environnementales connues est à prévoir.
- ➔ De nombreuses investigations sont prévues afin d'améliorer la connaissance de l'effet de l'évènement sur l'Arve et également pour améliorer la prévention pour les évènements futurs.

### 8.2 Contexte

#### 8.2.1 Contexte hydrologique 2023 : une fin d'année très humide

Les précipitations mensuelles ont été généralement déficitaires pendant la première partie de l'année. Toutefois à partir du mois d'octobre elles ont été très fortement excédentaires. La Figure 48 ci-dessous présente les précipitations mensuelles pour deux stations de plaine : Jussy (CH) et Bonneville (FR), ainsi que pour deux stations d'altitude, Morgins (CH) et Le Tour (FR) situées dans le bassin versant de l'Arve ou à proximité. Ainsi en novembre on a mesuré autour de 500 mm dans les stations d'altitude comme Morgins et Le Tour, ce qui représente 3 fois la norme. En plaine on a enregistré autour de 200 mm ce qui représente plus du double de la norme.



Figure 48: Précipitations mensuelles 2023 pour quatre stations situées dans le bassin versant de l'Arve ou à proximité.

Les cumuls dans les jours qui ont précédé l'événement ont été importants. Ainsi à la station d'Emosson on a enregistré 140 mm du 1<sup>er</sup> au 10 novembre et 310 mm du 11 octobre au 10 novembre.

La Figure 49 ci-dessous présente les débits moyens mensuels de l'année 2023 et les compare aux moyennes interannuelles de la période de référence 1991-2020. Sont aussi représentés les déciles 10% et 90% de la distribution des débits moyens mensuels sur la même période. On peut constater que les débits moyens mensuels ont été inférieurs aux moyennes interannuelles de mai à septembre, voir largement inférieurs en juillet et août. Au contraire les débits mensuels des mois de novembre et de décembre ont été très largement supérieurs (plus du triple) aux moyennes interannuelles. Pour le mois de décembre il s'agit de la plus grande valeur enregistrée depuis le début des mesures systématiques en 1904. Pour le mois de novembre il s'agit de la 2<sup>ème</sup> plus grande valeur, après le record de 190 m<sup>3</sup>/s établi en 1944.

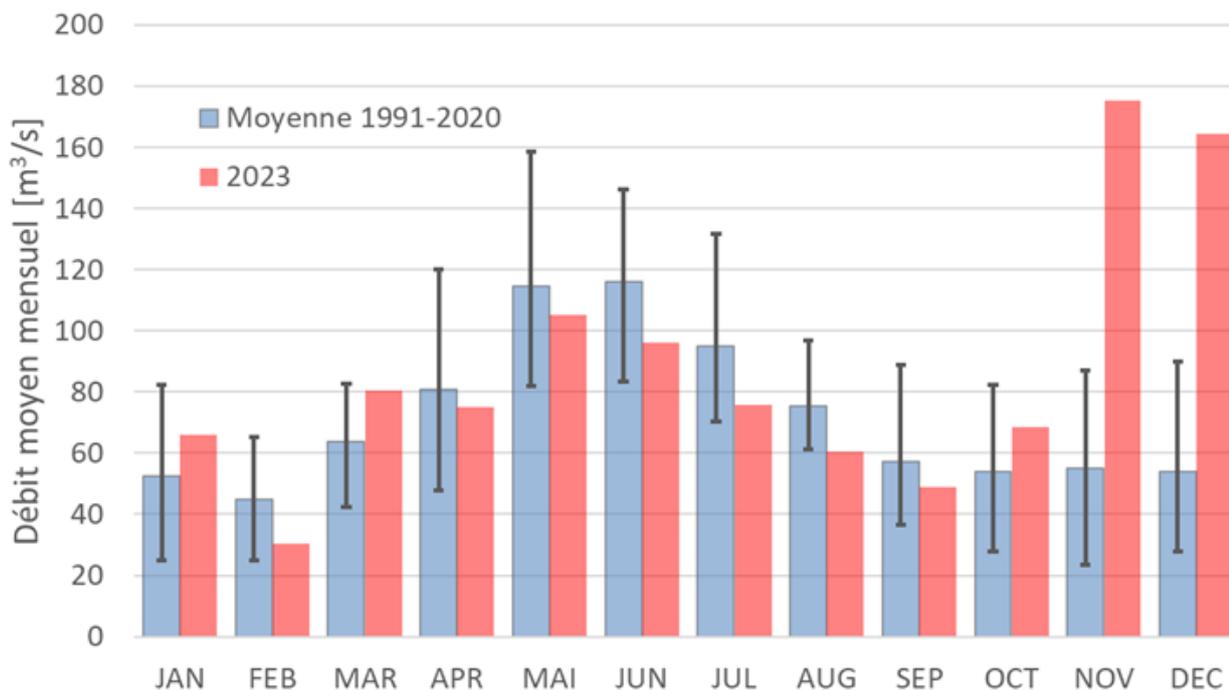


Figure 49: L'Arve à Genève Bout-du-Monde : débit mensuels 2023 et comparaison avec la période de référence 1991-2020.

La Figure 50 ci-après présente les débits journaliers de l'Arve à Genève Bout-du-Monde pendant l'année 2023 et les compare à la médiane et aux déciles 10% et 90% calculés sur la période de référence 1991-2020. On constate qu'à partir de mi-mai jusqu'à mi-octobre les débits journaliers ont été généralement inférieurs à la médiane et, entre mi-août et mi-octobre, souvent proches du décile 90%, ce qui traduit une situation de sécheresse hydrologique. A partir de fin octobre et jusqu'au 20 décembre les débits journaliers sont supérieurs au décile 10% pratiquement sans interruption. Les précipitations tombées en abondance à partir du 15 octobre ont comblé les déficits hydriques des bassins versants et ont créé un état antécédent très humide, favorable à une forte réponse hydrologique.

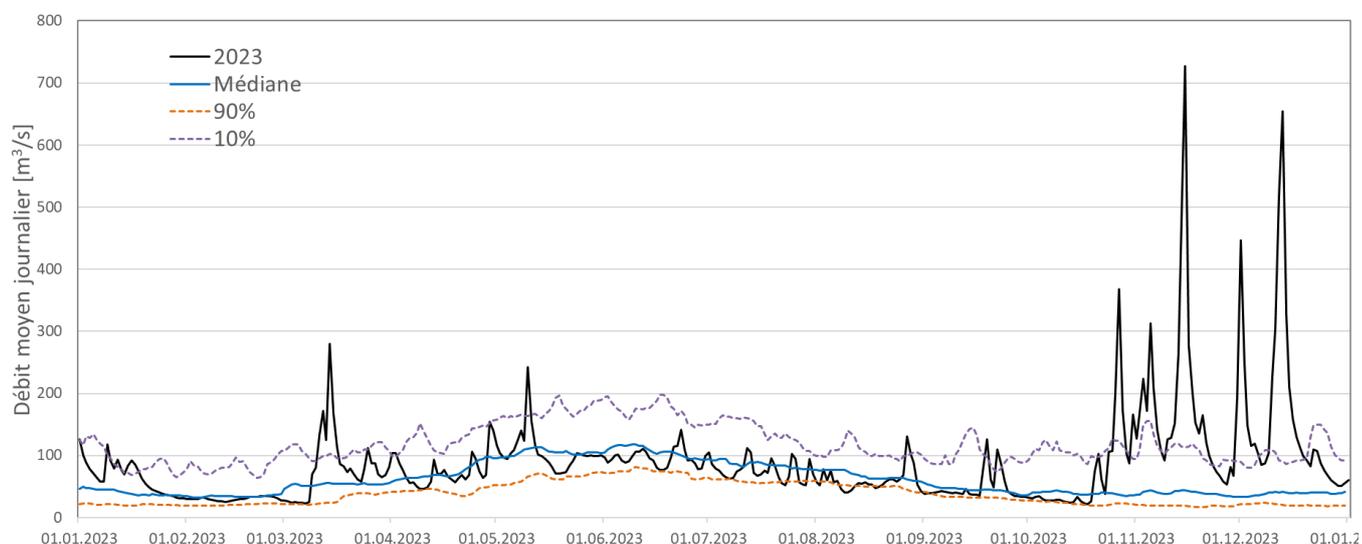


Figure 50: L'Arve à Genève : débit moyen journalier 2023 et comparaison à la médiane et aux déciles 10% et 90% calculés sur la période 1991-2020.

## 8.2.2 Changement climatique

L'année 2023 a été officiellement désignée comme la plus chaude jamais enregistrée, avec des températures mondiales approchant la limite de 1,5 °C au-dessus des niveaux préindustriels. La moyenne mondiale de la température en 2023 était de 14,98 °C, soit 0,17 °C de plus que le précédent record établi en 2016<sup>4</sup>.

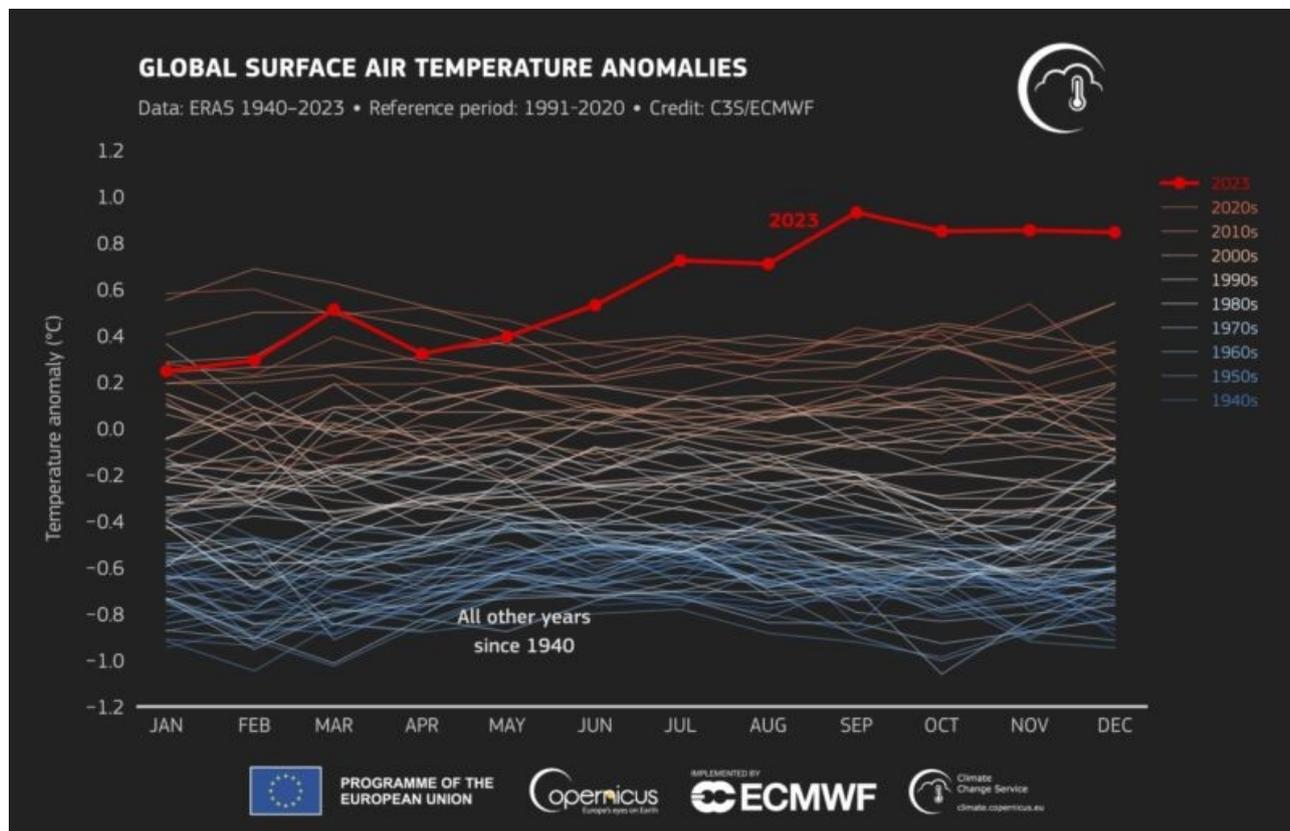


Figure 51: Anomalie de température à l'échelle mondiale, comparaison interannuelle (source: C3S/ECMWF)

Des conditions météorologiques exceptionnelles ont été observées de juin à décembre. Juillet et août ont été les deux mois les plus chauds jamais enregistrés. De plus, septembre 2023 a affiché la plus grande déviation de température par rapport à la moyenne de 1991-2020 dans le jeu de données ERA5. La transition vers El Niño observée en 2023, avec des conditions La Niña se dissipant au printemps, n'est que partiellement responsable de ces records atteints au niveau mondial.

<sup>4</sup> Press Release – Global Climate Highlight 2023 - Copernicus: 2023 is the hottest year on record, with global temperatures close to the 1.5°C limit.

En Europe, l'année 2023 a été la deuxième plus chaude jamais enregistrée, avec des températures au-dessus de la moyenne pendant 11 mois. L'automne a été le deuxième plus chaud jamais enregistré.

Le mois de novembre étant parmi les plus pluvieux de l'année en Haute-Savoie (11,7 jours par mois en moyenne, source: Météo France pour Annecy-Meythet), avec des précipitations de l'ordre de 100 mm à Chamonix, une hausse de température et de l'isotherme zéro comporte une modification sensible des conditions hydrologiques: compte tenu d'une température moyenne pour novembre à Chamonix de 2.7 °C (source: Météo France), l'isotherme zéro moyenne au mois de novembre se situe dans des conditions normales aux alentours de 1500 m.s.m. L'évènement du 15 novembre 2023 s'est caractérisé par une première chute de neige au-dessus des 1500 m.s.m. (donc en ligne avec les moyennes de saison), suivi par la fonte des précipitations entre 1500 et 2500 m liée à une hausse de plusieurs degrés de la température.

Les intensités de précipitations relativement élevées enregistrées sur les bassins versants alpins de la vallée de l'Arve durant l'après-midi du 14 novembre (10 mm/h à 18 h à Chamonix-Mont-Blanc) sont une prérogative du début d'automne plutôt que du 15 novembre. Ce facteur, survenant dans un contexte déjà marqué par la saturation des sols et la fonte nivale en cours, semble avoir exacerbé la situation, favorisant ainsi une réponse hydrologique extrêmement rapide. Ces éléments seront examinés en détail dans des études spécifiques à venir.

CHAMONIX - Précipitations (mm/h)

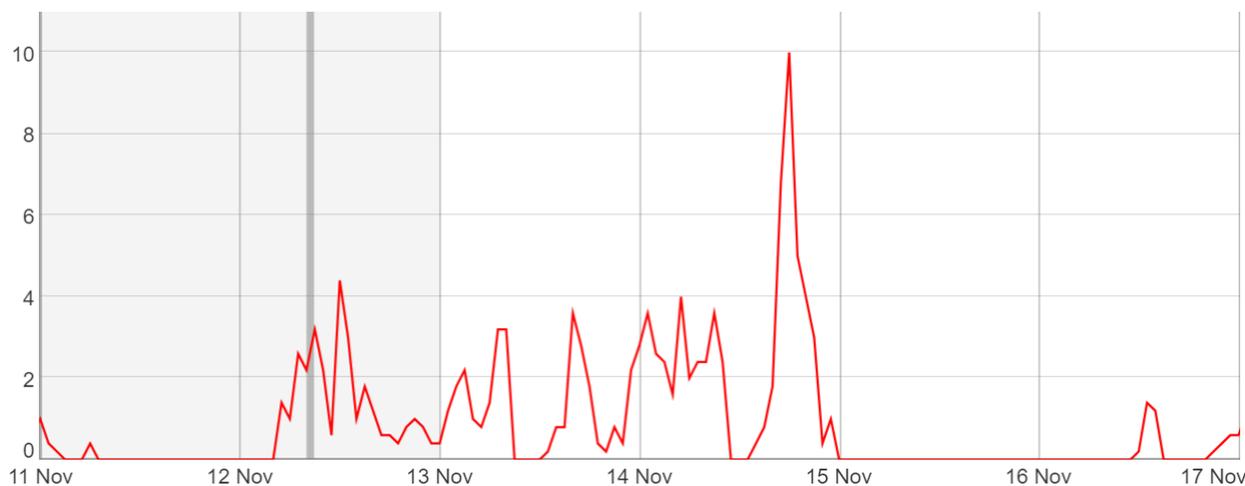


Figure 52: Chamonix-Mont-Blanc: intensité de précipitation mesurée (Météo France)

En conclusion, établir de manière certaine un lien entre le changement climatique en cours et la crue de l'Arve demeure difficile. Cependant, les anomalies de températures constituent une preuve tangible d'une transformation climatique à l'échelle mondiale. Appliquées au contexte spécifique de l'Arve en novembre (végétation en fin de cycle, saturation totale des sols, début des précipitations solides), elles ont certainement contribué à l'intensification de la crue. La crue de décembre 2023

constitue un autre exemple de ce changement en cours. Évaluer la sévérité de ces événements dans le cadre d'une évolution climatique devient une tâche complexe.

Définir les évolutions futures représente également un défi, car les mécanismes de rétroaction positive et négative peuvent amplifier ou atténuer certains phénomènes. Étant donné que l'humanité n'a jamais été confrontée à de tels changements, formuler des prévisions sur l'évolution future du climat reste ardu. Cependant, il est impératif que la société se prépare à une transformation radicale de notre environnement quotidien.

### 8.3 Perspectives pour la suite

Afin de compléter l'analyse et la compréhension de l'effet de l'évènement sur l'Arve et son bassin versant ainsi que de réduire le risque de dommage pour le futur, un certain nombre d'analyses, d'études et d'actions seront mises en œuvre en fonction des ressources disponibles dans les mois à venir. En voici une liste, pour l'instant non exhaustive :

**Tableau 5: Liste des investigations à mener et objectifs temporels**

Type d'action	Sujets	Objectifs temporels	Responsable
Analyse	Rapport d'évènement de crue	Mars 2024	Canton
	Evaluation des hypothèses statistiques et pertinence de l'hypothèse de stationnarité <i>Une analyse hydrométéorologique plus poussée des régions de moyenne montagne du bassin pourrait apporter un éclairage pertinent.</i>	S1 - 2024	Canton
	Rapport d'évènement du modèle de prédiction suite aux crues de fin 2023, y c. impact des hausses de température et du phénomène pluie-neige.	S1 – 2024	Canton
Etudes	Relevés et étude morphologique : évolution du fond du lit, érosion des rives, charriage de matériaux	S1 – 2024	Canton
	Etude hydraulique : nouvelle modélisation hydraulique, cohérence de la carte des dangers, influence sur les lignes d'eau	S2 – 2024	Canton
Mesures de protections	Mise en œuvre de mesures de protection contre les inondations, selon Feuille de route et après évaluation de la pertinence	2024 - 2025	Canton Ville de Genève
Gestion de l'évènement	Débriefing des crues 2023 et identification des pistes d'amélioration	Janv.-Fév. 2024	SIS / Canton Ville Genève
	Gestion transfrontalière : améliorer la communication, l'alerte et la récolte de données. Séance SM3A + DREAL + Canton SIS+ DDT 74	Mars 2024	Canton SM3A
	Améliorer la communication de fin d'alerte et la transmission d'information	S1 – 2024	Canton / SIS Médias

**ANNEXE I.    PRECIPITATIONS JOURNALIERES CUMULEES [MM] AUX  
STATIONS PLUVIOMETRIQUES DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE**

**ANNEXE II. CRUE DE L'ARVE DE NOVEMBRE 2023 –RETROSPECTIVE  
HYDROLOGIQUE**

**ANNEXE III. IMPACTS DE LA CRUE DE L'ARVE SUR LE RESEAU  
D'ASSAINISSEMENT**

## **ANNEXE IV. EVALUATION SOMMAIRE DES MODELES DE PREVISION DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE**