Evaluation sommaire des modèles de prévision du bassin versant de l'Arve

Généralité

La chaîne de prévision hydrologique doit tenir compte de la grande variabilité des phénomènes naturels et de la propagation des incertitudes le long de chaque étape:

- Modèles météorologiques:
    - Incertitudes dans la détermination des conditions atmosphériques régionales à partir d'une série de mesures ponctuelles (ballons-sondes) ou de dispositifs de télédétection (satellites, radars, avions);
    - Inclusion de la variabilité intrinsèque des phénomènes atmosphériques et leur propagation, ce qui influe sur la capacité de prédire le comportement météorologique dans le temps;
    - Incertitude dans la détermination des cumuls et de la typologie de précipitation ainsi que de la temporalité et localisation des événements pluvieux;
- Modèles hydrologiques:
    - Pour les bassins versants alpins, incertitudes liées à l'estimation de l'équivalent en eau de la neige, ce qui peut influencer de manière importante le débit notamment en cas de remontée de l'isotherme 0.
    - Influence de la température de l'air, notamment une remontée de l'isotherme 0 lors d'un phénomène hydrométéorologique peut engendrer un changement dans la temporalité de la réponse hydrologique (p.ex. phénomène "pluie sur neige").
    - Incertitude dans l'estimation de la lame d'eau précipitée à partir soit des données radar (données de faible précision mais spatialisés) soit des données aux stations pluviométriques au sol (données de haute précision mais extrêmement locales);
    - Incertitudes dans la détermination des capacités de rétention et évapotranspiration offerte par la canopée végétale et à la saturation des sols, qui influence la capacité de rétention du terrain et la capacité d'infiltration des eaux;
    - Incertitudes concernant le contexte géologique et hydrogéologique des bassins versants (p.ex. caractérisation des nappes profondes et de la réponse des aquifères karstiques);
    - Incertitudes concernant la réponse hydrologique des bassins versants et les caractéristiques géomorphologiques des cours d'eau;

- Incertitudes liées à la mesure de débit aux stations limnimétriques, utilisées pour ajuster les quantités d'eau et la temporalité de la propagation des crues;
- Moins important en période de crue, les incertitudes liées à la manipulation des organes des nombreuses centrales hydroélectriques présentes sur le bassin versant peuvent néanmoins avoir un impact sur le calage des paramètres hydrologiques des modèles.

La possibilité d'anticiper un événement avec suffisamment d'avance dépend aussi de la capacité du système de monitoring en temps réel de 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 paragraphes suivants listent les différentes améliorations apportées, suite à la mauvaise expérience de la crue du mai 2015 où, en l'absence de modèles hydrologiques et sans une prévision météorologique fiable, la crue avait été sous-estimé par l'ensemble des opérateurs, y compris l'Office cantonal de l'eau et les exploitants hydroélectriques.

Prévision météorologique

Ces dernières années, nous avons assisté à une formidable amélioration des modèles de prévision météorologique grâce à la montée en puissance des centres de calcul. Aujourd'hui il est possible, à partir d'une condition atmosphérique de départ et d'une prévision d'évolution des paramètres atmosphériques, de construire un groupe de prévisions ayant toutes la même probabilité d'occurrence, utilisables pour qualifier la fiabilité de la prévision.

Les prévisions probabilistes permettent de prendre en compte toutes les incertitudes concernant les conditions atmosphériques et d'en reproduire la variabilité. Les différentes simulations sont calculées à partir de conditions initiales légèrement différentes et des perturbations sont insérées afin de créer un panel (ensemble) de simulations pouvant ensuite être analysées d'un point de vue statistique, car chaque élément de l'ensemble est également probable et indépendant. Dans ces conditions, il est possible de calculer une probabilité d'occurrence pour un certain événement. La dispersion au sein de l'ensemble des simulations permet également de qualifier la fiabilité de la prévision.

Depuis la crue de mai 2015, nous avons assisté à une amélioration significative des performances des modèles de prévision météorologique du côté de MétéoSuisse, avec l'intégration, depuis le printemps 2016, d'un système de modèles numériques COSMO comprenant, pour la région alpine :

- le modèle déterministe COSMO-1, d'une maille de 1.1 km, à un horizon de 33 heures mis à jour 7 fois par jour;

- le modèle probabiliste COSMO-E, d'une maille de 2.2 km à un horizon de 96 heures, mis à jour 2 fois par jour.

Des améliorations du système d'assimilation de la donnée ont été apportées, avec l'implémentation du Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF).

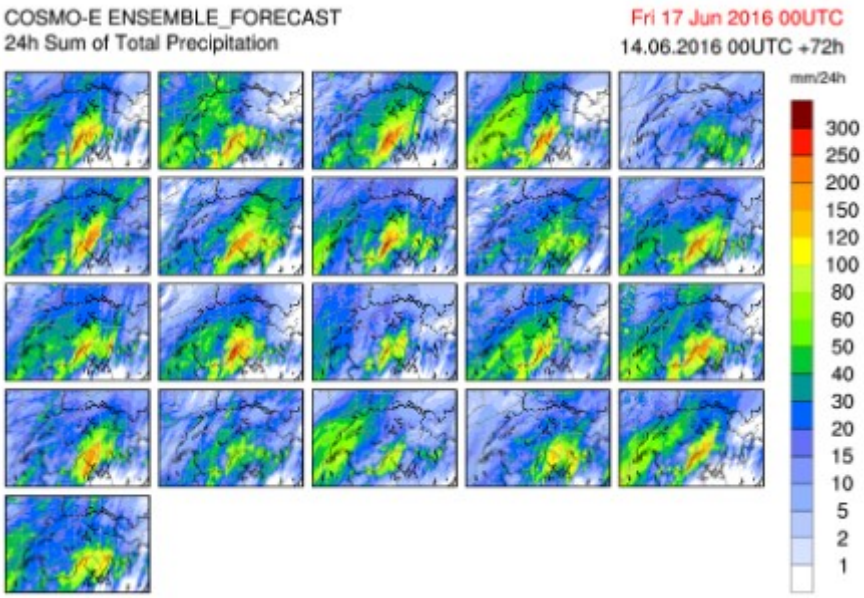


Figure 1 – Exemple de prévision d'ensemble de la précipitation sur 24 heure par COSMO-E, composée de 21 membres (source: MétéoSuisse).

En 2019, les modèles probabilistes COSMO-1E (33h) et COSMO-2E (96h) ont été intégrés, avec une résolution spatiale respectivement de 1,1 km et 2,2 km. La résolution fine permet, par rapport aux modèles européens (p.ex. IFS avec un maillage de 20 km), de mieux prendre en compte la topographie complexe de la Suisse. Il est à noter une amélioration ultérieure du système d'assimilation, avec l'intégration du système d'assimilation de données d'ensemble KENDA (Kilometer Scale Ensemble Data Assimilation) développé au sein du consortium COSMO.

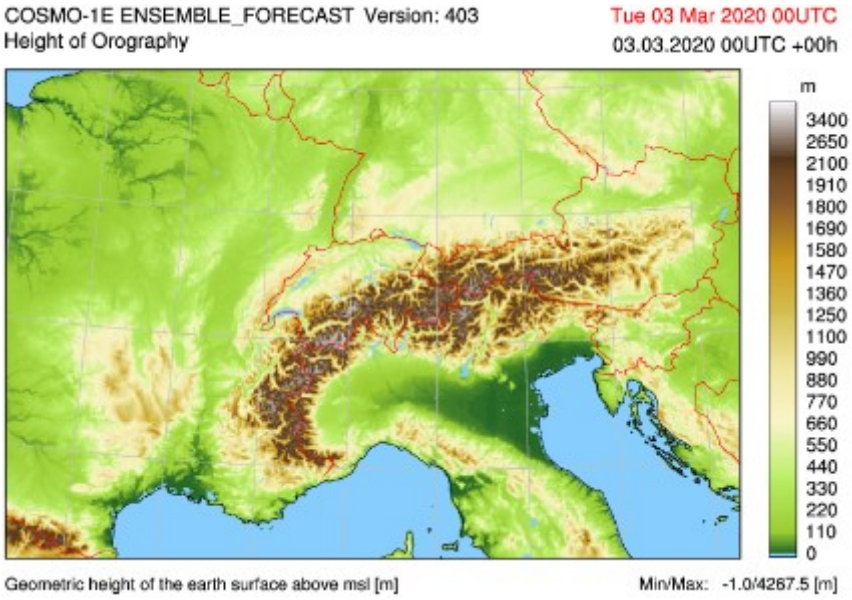


Figure 2 – Représentation de la résolution du relief offerte par le modèle de prévision d'ensemble COSMO-1^{E} (source: MétéoSuisse)

Pour 2024, une nouvelle amélioration de la modélisation météorologique est prévue. Dans le cadre du projet ICON-22, le modèle ICON (Icosahedral Nonhydrostatic Weather and Climate Model) sera introduit dans l'exploitation opérationnelle pour les prévisions météorologiques numériques de MétéoSuisse, en remplacement des modèles COSMO actuellement utilisé. Le grand avantage est le maillage triangulaire au lieu de rectangulaire, ce qui permet de limiter les distorsions dans les zones périphériques du modèle et de mieux reproduire la topographie complexe de la Suisse.

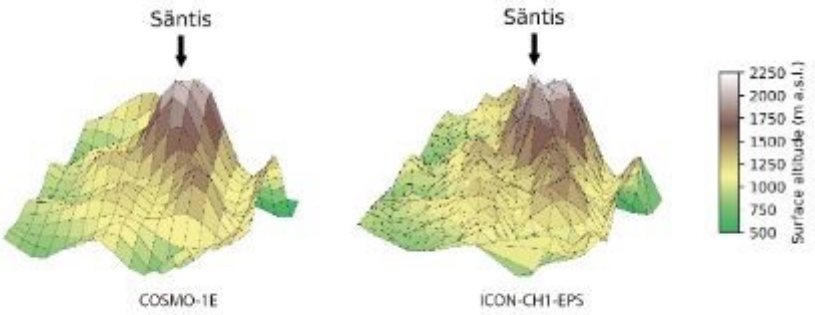


Figure 3 – Exemple de la meilleure représentation spatiale de l'orographie offerte par la maille triangulaire de ICON en comparaison à la maille rectangulaire propre à COSMO (source: MétéoSuisse).

Au fil des années, ces améliorations nous ont permis d'améliorer la confiance dans la prévision météorologique et donc de réduire une bonne partie des incertitudes liées au modèles. Les incertitudes liées à la variabilité intrinsèque des phénomènes atmosphériques ne pourront

néanmoins pas diminuer à l'état futur, d'autant plus que le changement climatique tend à intensifier les phénomènes extrêmes et donc limite notre capacité de prédiction.

Prévision hydrologique

Depuis la crue de mai 2015, l'Office cantonal de l'eau, en collaboration avec ses partenaires, a mené des discussions et engagé des travaux pour améliorer le système de prévision des débits de L'Arve.

Les progrès dans ce domaine sont les suivants :

- Les Services Industriels de Genève ont développé un modèle de prévision purement hydrologique, appelé RS, également fourni avec une approche probabiliste. Ce modèle est orienté à la production hydroélectrique. Il est consultable par l'Office cantonal de l'eau dans une logique d'échange d'informations et transparence.

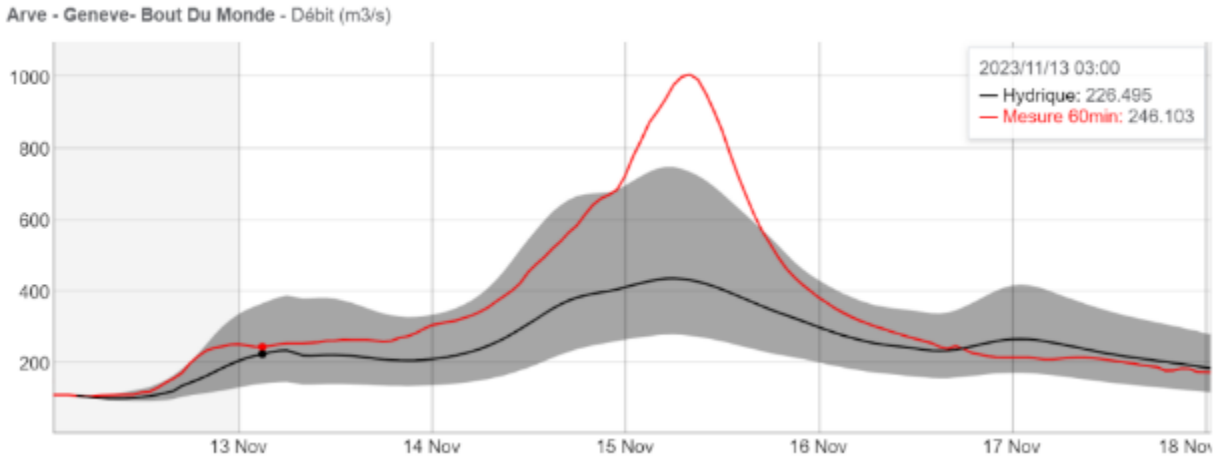


Figure 4 – Modèle SIG: visualisation des prévisions pour L'Arve (Cosmo-2E) initialisation le 12.11 à 03h00. Les graphiques illustrent la médiane, et l'aléa d'incertitude lié à la variabilité des prévisions et à une variation de température de +/- 2°C.

- Afin de disposer d'un deuxième (aujourd'hui troisième) avis sur les risques hydrologiques, l'OCEau a développé en 2021 un modèle du système Arve-Rhône basé sur les techniques d'intelligence artificielle, le modèle ML (Machine Learning). Il a été initialement entrainé avec les prévisions COSMO 2016-2021 dans le but de prévoir les débits de L'Arve sur la base des évènements du passé. Tous les deux ans, un réapprentissage est effectué pour augmenter le nombre d'épisodes significatifs du passé. Par définition, il s'agit d'un modèle qui nécessite de plusieurs années avant de pouvoir devenir fiable, car les évènements de crues sont rares et avec peu d'évènement il est difficile de généraliser des comportements hydrologiques. Ce modèle a néanmoins démontré des atouts intéressants, en particulier il est capable de reproduire les comportements des exploitants hydroélectriques et donc, sur des bassins versants où l'hydrologie est fortement influencée par les ouvrages

hydroélectriques, peu fournir une alternative indépendante et crédible aux modèles purement hydrologiques. L'avantage de la plateforme est de pouvoir disposer également en temps réel de quelques stations pluviométrique et stations limnimétriques sur le bassin versant de L'Arve et d'une estimation du manteaux neigeux (cf. image).

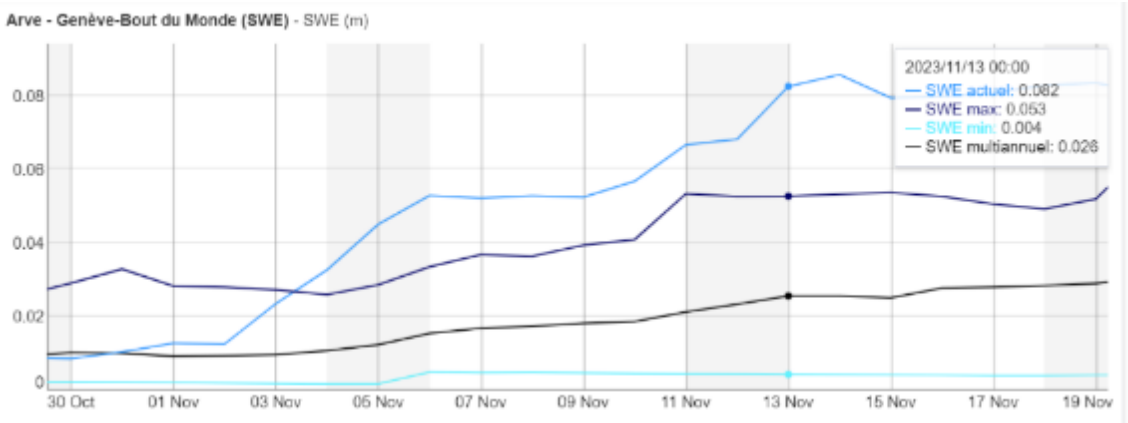


Figure 5 – Modèle Hydrique-OCeau pour la gestion Arve-Rhône: module SWE pour l'estimation de l'équivalent en eau de la neige. On peut constater que le 13 novembre, début de l'évènement météorologique, sur le bassin versant de L'Arve, une lame d'eau équivalente de 8.2 cm était déjà présente, ce qui correspond à environ 3 fois le niveau médian pour cette période de l'année et environ 150% du niveau maximum enregistré.

Un avantage supplémentaire du modèle est celui de pouvoir simuler les effets de scénarios fictifs, de façon à anticiper les problématiques à venir (p.ex. montée du niveau du lac suite à la fermeture du barrage du Seujet pour laisser transiter la crue de L'Arve).

- L'OFEV a intégré formellement L'Arve comme cours d'eau d'importance nationale, ce qui a ouvert officiellement la voie pour le développement d'un projet de prévision hydrologique au niveau national suisse. Les travaux ont débuté en 2018 et le modèle de prévision de L'Arve de l'OFEV a été mis à disposition à partir de 2021, avec un niveau de détail adapté, sur le site Hydrodaten de la station ainsi que sur le portail GIN des dangers naturels. Après une première année de rodage, le modèle offre aujourd'hui des bonnes performances.

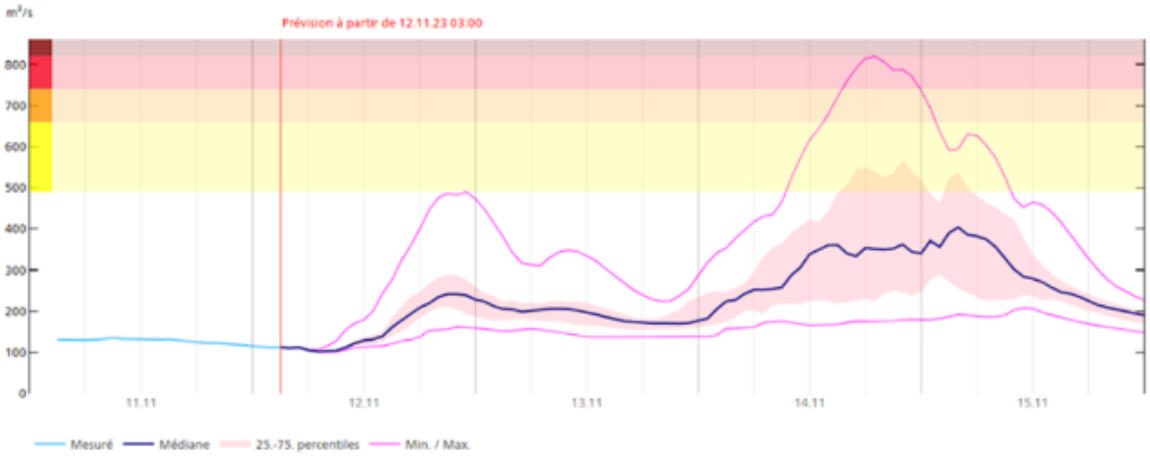


Figure 6 – Plateforme Hydrodaten: visualisation des prévisions pour L'Arve (Cosmo-2E) initialisation le 12.11 à 03h00. Les graphiques illustrent, pour le modèle COSMO-2E, la médiane, les quartiles 25 et 75% ainsi que le max-min des ensemble.

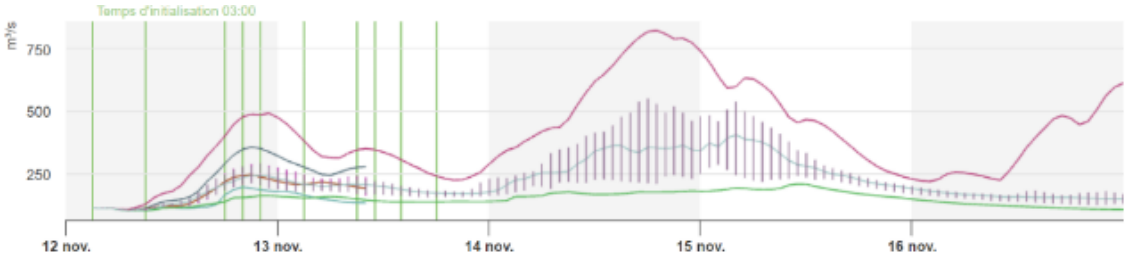


Figure 7 – Plateforme GIN: visualisation des prévisions pour L'Arve (Cosmo-1E + Cosmo-2E) initialisation le 12.11 à 03h00. Les graphiques illustrent, pour les deux modèles, la médiane, les quartiles 25 et 75% ainsi que le max-min des ensemble.

Les trois modèles ci-décrits sont transmis à l'ensemble des partenaires et sont alimentés par les mêmes données d'entrée, à savoir la prévision COSMO-1E et COSMO-2E fournie par MétéoSuisse. Par conséquence, les trois modèles hydrologiques proposent une prévision probabiliste des débits, sans introduire de perturbation ultérieure[1].

En parallèle, le SM3A est en train de développer un modèle de prévision des crues de L'Arve. A cette fin, l'OCEau transmets en temps réel les données d'une de ses stations, celle sur le Foron du Chablais genevois, avant-dernier affluent important de L'Arve avant de rejoindre la ville de Genève.

Nowcasting et mesures en temps réel

Les modèles météo-hydrologiques permettent de prédire et anticiper le comportement du bassin versant, avec une incertitude élevée. En cours d'évènement, la prévision à court terme des conditions à l'aval peuvent être déterminées sur la base des données en temps réel. Sur le bassin versant de L'Arve, d'une surface d'environ 2'000 km2, le temps d'anticipation avoisine les 6-8 heures et permet donc de mettre en place des mesures en temps utile.

[1] Un aléa d'incertitude lié à une variation soudaine de température de l'air pouvant influencer la fonte nivale est implémentée dans le modèle SIG.

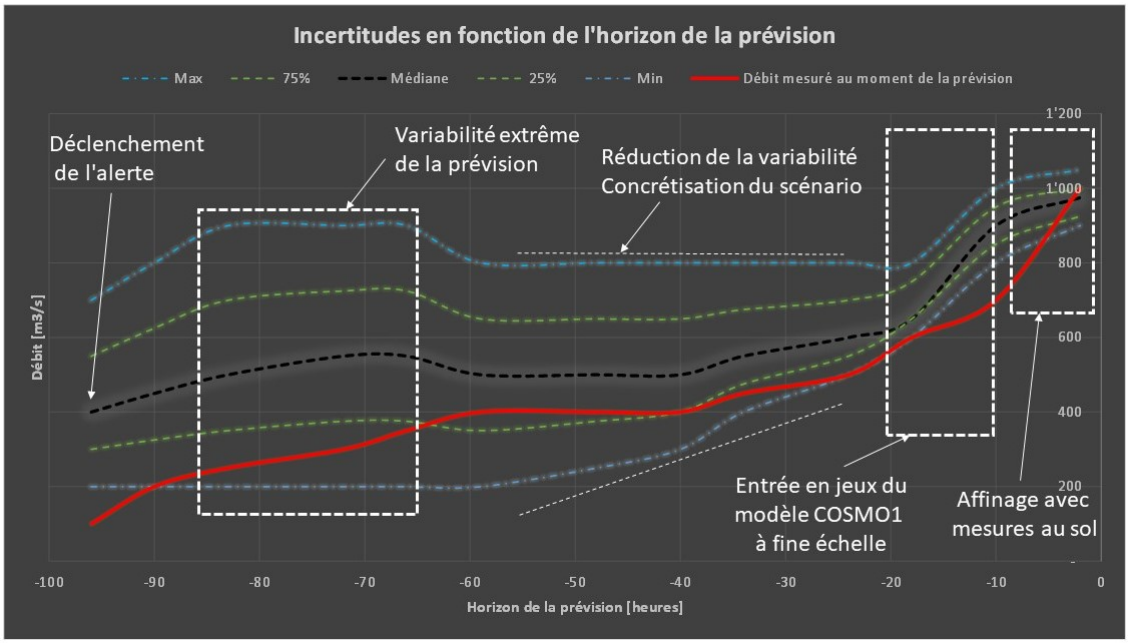


Figure 8: Incertitudes dans les prévisions

Pour cette raison, il semble pertinent d'effectuer une comparaison des données en temps réel disponibles en consultation entre la crue de 2015 et celle de novembre 2023.

- Stations pluviométriques

Etant donné le caractère transfrontalier du bassin versant de L'Arve, la connaissance des paramètres météorologiques et hydrologiques à Genève dépend fortement des partenaires sur le territoire français.

Les stations MéteoFrance n'étant pas encore en libre accès courant 2023, nous avons pu nous servir uniquement des stations transmises par les voies officielles entre la Confédération et l'Etat français.

Nous avons pu compter sur les données de pluviométrie et température en temps quasi-réel en provenance des stations météorologiques suivantes:

- Bonneville
- Morzine - Le Plenay
- Grand-Bornand
- Chamonix - Mont-Blanc

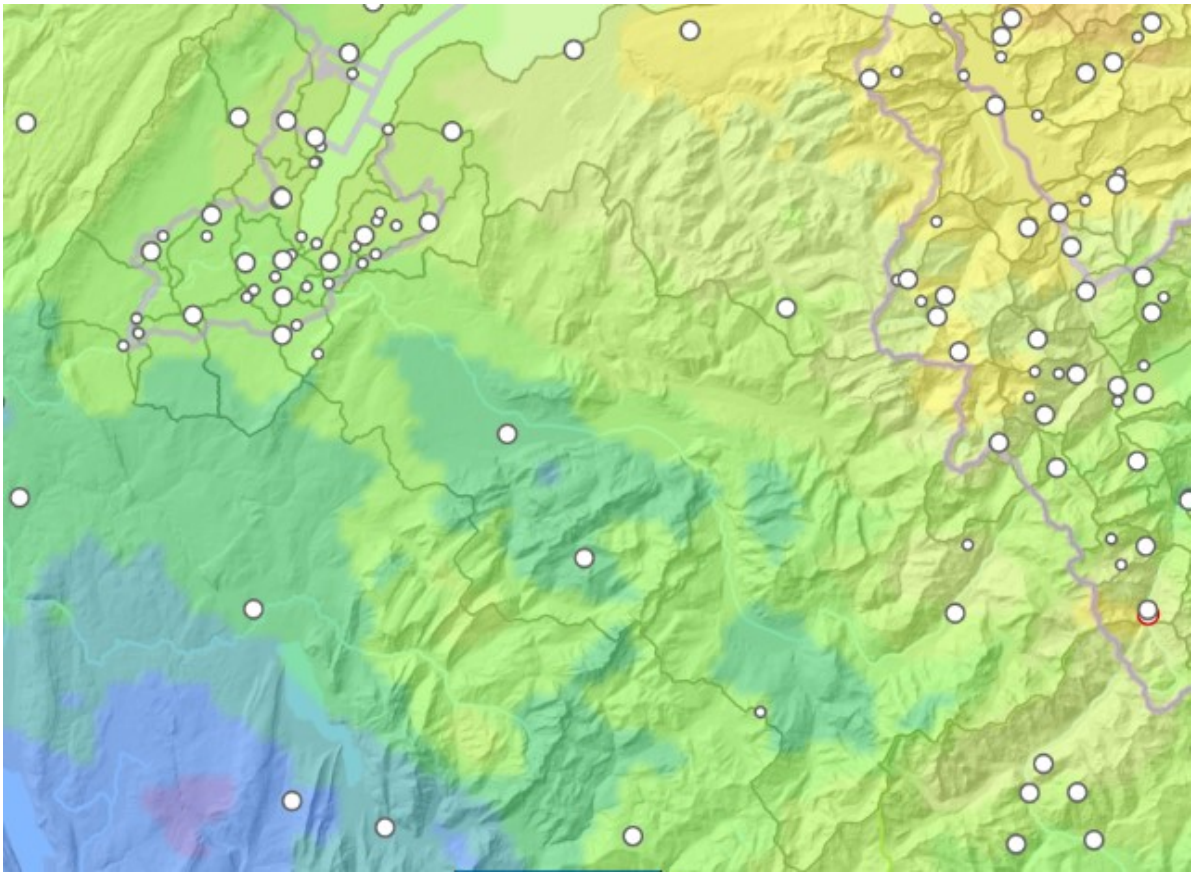


Figure 9 – Carte du bassin versant de L'Arve avec image radar du 14.11.2023 à 12h (somme précipitation sur 6h) et localisation des stations MétéoFrance transmises sur GIN. Les petits cercles identifient des stations non fonctionnelles (Aiguilles Rouges à Chamonix et Mont d'Arbois à St-Gervais)

- Stations limnimétriques

En ce qui concerne les stations limnimétriques, des nombreuses stations sur le bassin versant de L'Arve ont été rajoutées à la liste des données diffusées en temps réel, comme le montre le tableau ci-après.

Tableau 1 – Liste des stations françaises sur le bassin versant de L'Arve. En gras, les stations utilisées de façon active dans le suivi en temps réel. En grisé, les stations non fonctionnelles / non utilisées durant le suivi de la crue de novembre 2023.

Code	Cours d'eau	Station	Hauteur d'eau	Débit	2015	2023
V0002010	**Arve**	**Chamonix-Pont Favrands**	✓	✓	✓	✓
V000 2012	Arve	Chamonix-Pont Aiguille	✓	×	×	✓
V001 0001	Diosaz	Les Houches	✓	✓	×	✓
V002 0002	Bon Nant	Saint-Gervais-les-Bains	✓	×	×	✓
V003 2010	**Arve**	**Sallanches**	✓	✓	✓	✓
V003 2012	Arve	Passy	✓	✓	✓	×
V005 6410	Nant d'Orlier	Magland	✓	✓	✓	×
V005 6510	Nant du Crêt	Magland	✓	✓	✓	×
V012 0002	Giffre	Samoëns	×	×		×
V014 0002	Giffre	Mieussy	×	×		×
V015 4010	**Giffre**	**Marignier**	✓	✓		✓
V020 5422	Bronze	Bonneville	✓	✓		✓

V020 5420	Borne	St-Jean-de-Sixt	✓	✓		✓
V020 5422	**Arve**	**Bonneville**	✓	✓		✓
V022 0002	Arve	Reignier-Esery (Arthaz)	✓	✗		✓
V023 5020	**Menoge**	**Bonne**	✓	✓		✓

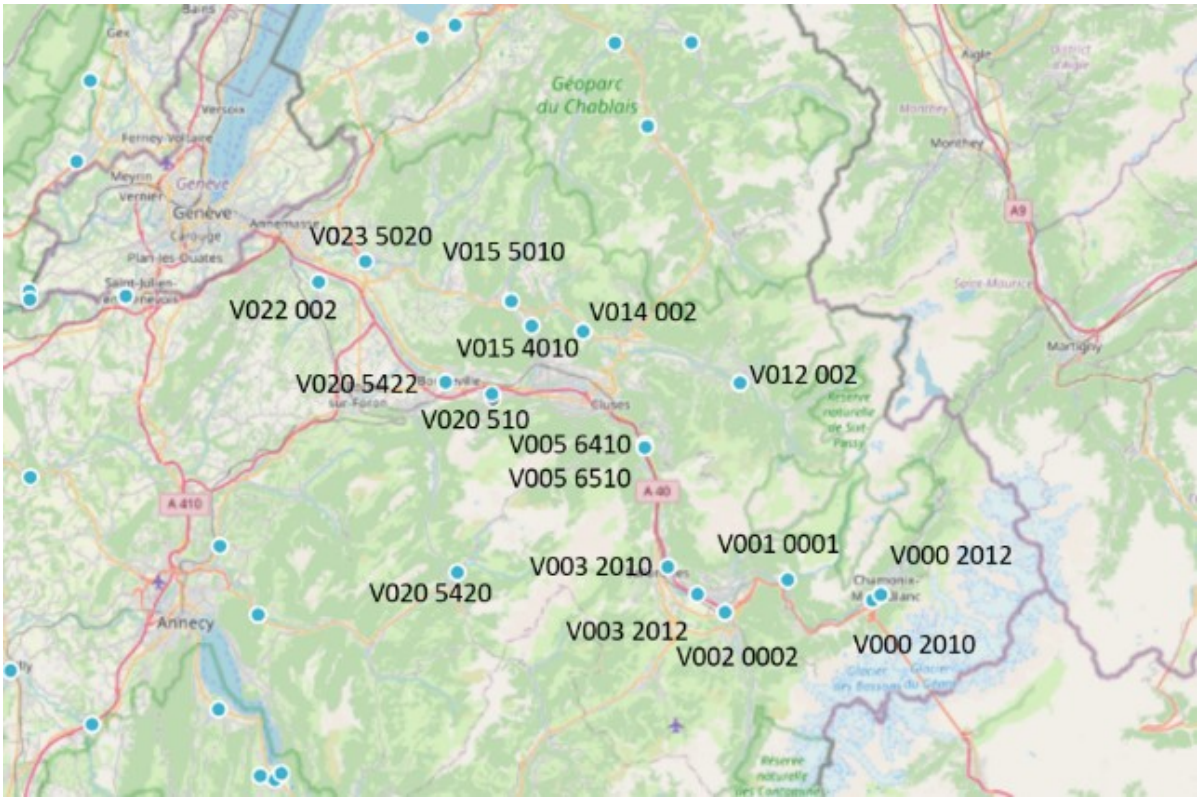


Figure 10 – Carte des stations françaises sur le bassin versant de L'Arve avec identifiant.

Quant à la visualisation, sur France plusieurs portails permettant de visualiser les données en temps réel:

- Hydroréel: Hydroréel est le portail de la Dreal et regroupe les stations du bassin versant Rhône-Méditerranée. Les données en temps réel sont présentées par département et affichées en format statique (graphiques). Le portail sera fermé le 30.06.2024.

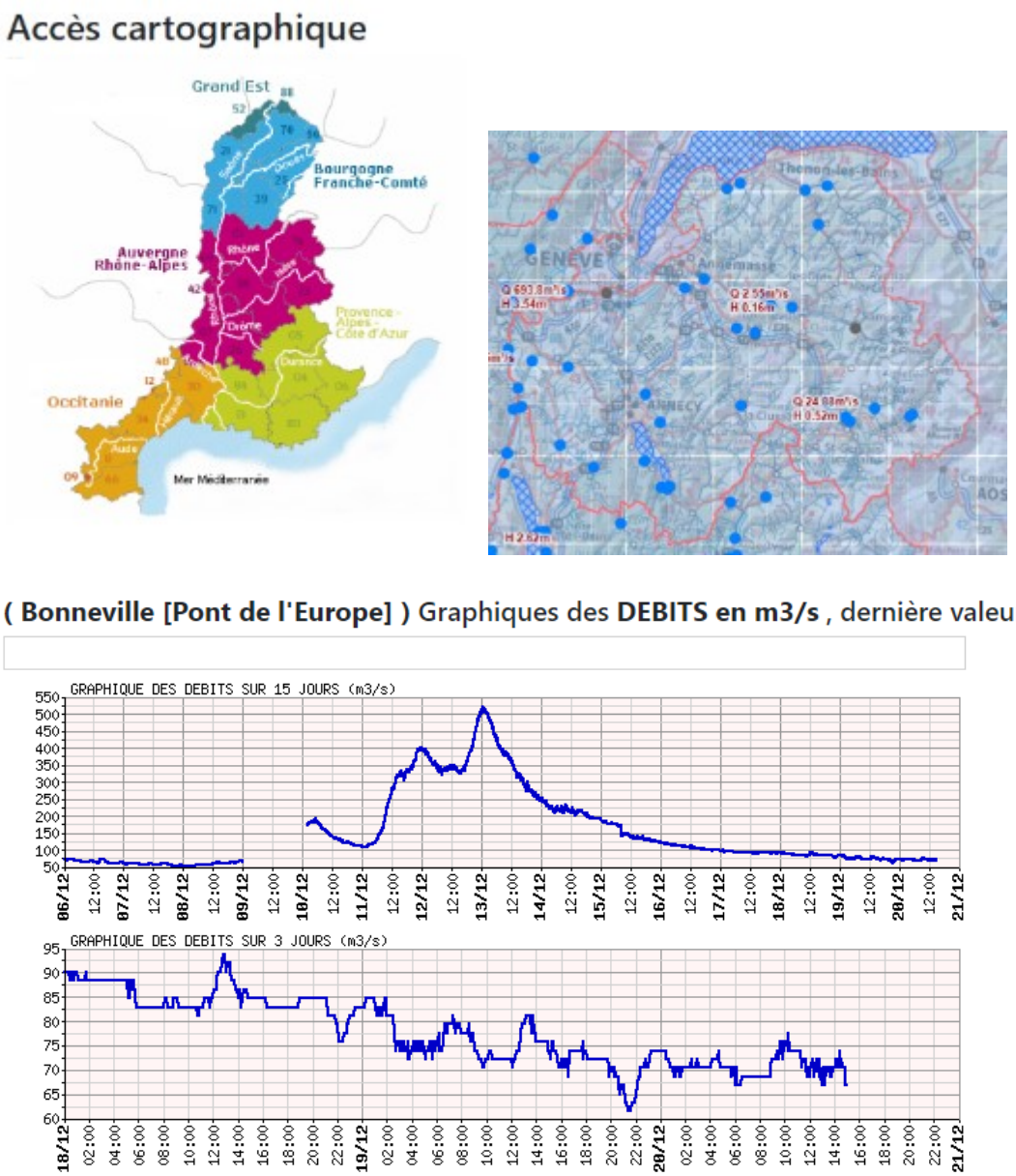
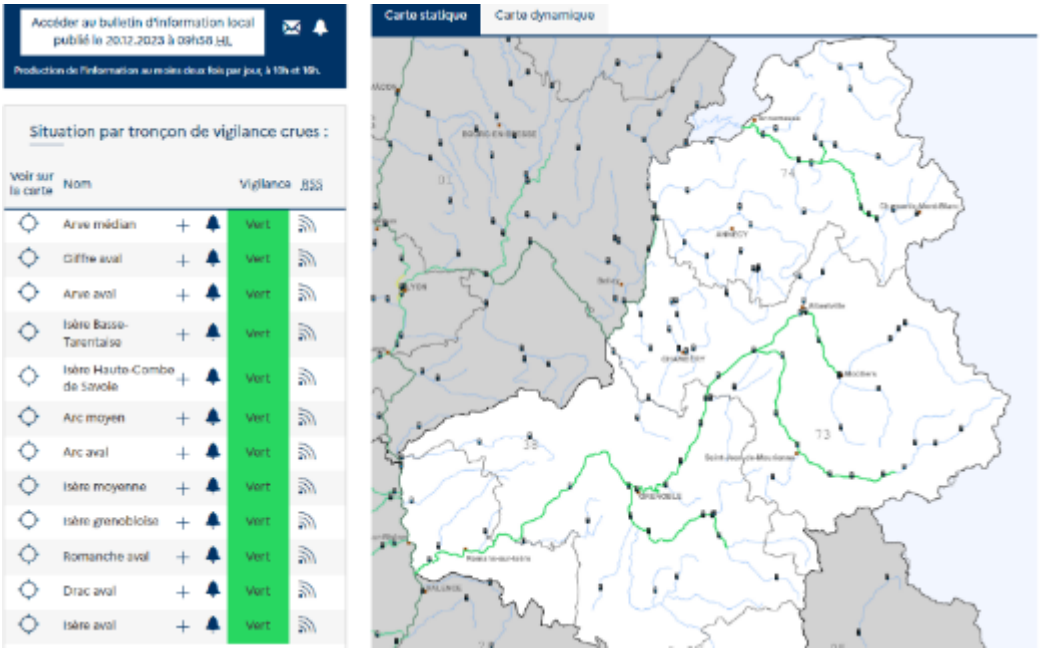


Figure 11 – Format d'affichage des graphiques de débit sur Hydroréel pour L'Arve à Bonneville, sur 15 et 3 jours respectivement.

- Vigicrues: il s'agit du service d'information sur les risques de crue, permet d'avoir une vision d'ensemble des risques sur le territoire français et des niveaux de vigilance. Des graphiques interactifs sont disponibles pour chaque station, avec la possibilité de superposer différents graphiques.



a)

b)

Figure 12 – Image synoptique du niveau de vigilance pour le territoire "Alpes du Nord" (a) et graphique interactif pour le Bronze à Bonneville.

- Hydroportail: l'Hydroportail est l'outil le plus complet à disposition. Dans ses points forts, la possibilité de visualiser l'état de validation de la donnée et, si elles existent, les données qui ont permis d'établir les courbes de tarage.

Seules les stations de Chamonix et Bonneville sont transmises sur GIN, ce portail est donc insuffisant pour suivre en temps réel la propagation de la crue de L'Arve.

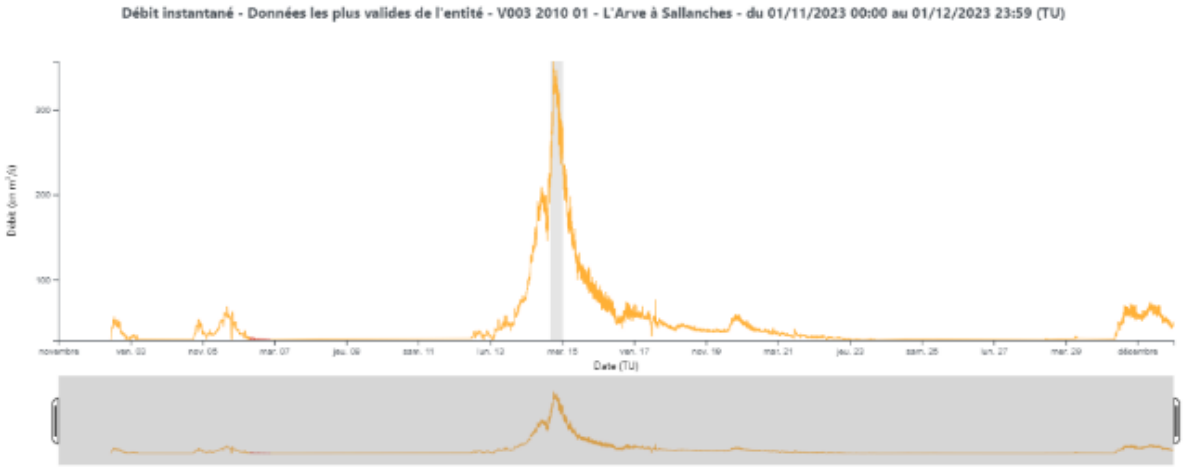


Figure 13 – Débit de L'Arve pour le mois de novembre 2023 à Sallanches.

Le portail Vigicrues est utilisable en temps réel pour suivre l'évolution en temps réel de la crue. Notamment, il a été possible d'identifier le temps de propagation de la crue et, sur cette base, prévoir l'arrivée du pic de crue à Genève. Les temps de transit estimés sont les suivants:

- Reignier-Esery (Arthaz): 3 heures
- Bonneville: 7 heures
- Chamonix: 11 heures

Ces temps d'écoulement ont pu être confirmés lors de la crue du 13 décembre 2023.

Le temps de propagation de la crue du Giffre a pu être estimée à 8 heures lors de la crue du 15 novembre 2023; celui pour la Menoge a pu être clairement identifié à 40 min lors de la crue du 13 décembre 2023.

Evidemment, ces temps d'écoulement sont valables uniquement lors des phénomènes de crue importante / extrême. Ils sont réduits lors des crues ordinaires ou des eaux normales, car la rugosité apparente du cours d'eau est supérieure.